Science Popularization

Bacterial Biodegradation of Microplastics

Mitra Pirhaghi[1,*]

Article Info

Article type:
Popularization of Science

Article history:
Receive Date
17 August 2025
Revise Date
02 September 2025
Accept Date
10 September 2025
Available online:
21 December 2025

Keywords:
microplastics, plastic pollution, environmental destruction, biodegradation, bacteria.

Microplastics, due to their persistence, ubiquity, and potential to bioaccumulate, have emerged as a significant environmental and public health concern. Their widespread distribution across terrestrial, aquatic, and atmospheric compartments, coupled with the use of harmful additives in plastic manufacturing, complicates their degradation and removal using conventional industrial methods. In light of these challenges, microbial biodegradation has gained increasing attention as a sustainable and eco-friendly approach to mitigate microplastic pollution. This article explores the current understanding of bacterial degradation of MPs, highlighting the mechanisms, degradation stages, and the key role of microbial enzymes such as esterases, lipases, laccases, and depolymerases. Several bacterial genera have demonstrated promising degradative capabilities against common polymers such as PE, PET, PS, and PP. Despite its potential, microbial degradation faces limitations, including low degradation rates and lengthy processing times. Addressing these challenges through strain optimization, enzymatic enhancement, and improved culture conditions is essential for advancing biotechnological solutions for microplastic remediation.

Cite this article: Pirhaghi M. (2025). 'Bacterial Biodegradation of Microplastics', Science Cultivation, 15(2),189-197.

© Author(s) retain the copyright and full publishing rights.
Publisher: Foundation for the Advancement of Science and Technology in Iran (FAST-IRAN) and Iran Society of Biophysical Chemistry (ISOBC)

* Corresponding Author. Assistant professor, Tel: (+98 24) 3315 3311, E-mail: m.pirhaghi@iasbs.ac.ir

[1] Department of Biological Sciences, Institute for Advanced Studies in Basic Sciences (IASBS), Zanjan, Iran

2783-0934 https:/www.sciencecultivation.ir Online ISSN 2008-935X Print ISSN

زیست‌تجزیه‌پذیری میکروپلاستیک‌ها با استفاده از باکتری‌ها

میترا پیرحقی*[1]

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مقاله ترویجی

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت
۲۶ مرداد ۱۴۰۴
تاریخ بازنگری
۱۱ شهریور ۱۴۰۴
تاریخ پذیرش
۱۹ شهریور ۱۴۰۴
تاریخ انتشار
۳۰ آذر ۱۴۰۴

کلیدواژه‌ها:
میکروپلاستیک، آلودگی پلاستیکی، تخریب محیط‌زیست، تجزیه زیستی، باکتری.

چکیده

میکروپلاستیک‌ها به‌دلیل پایداری بالا، پراکندگی وسیع در محیط‌های زمینی، آبی و جوی، و همچنین توانایی تجمع زیستی، به‌عنوان یکی از معضلات مهم زیست‌محیطی و بهداشتی شناخته می‌شوند. استفاده از مواد افزودنی مضر در فرآیند تولید پلاستیک و دشواری تجزیه‌پذیری آنها، حذف این آلاینده‌ها را با روش‌های صنعتی سنتی پیچیده کرده است. در این میان، زیست‌تجزیه‌پذیری میکروپلاستیک‌ها با استفاده از میکروارگانیسم‌ها به‌عنوان روشی پایدار و دوستدار محیط‌زیست مورد توجه قرار گرفته است. این مقاله به بررسی فرایند تجزیه میکروپلاستیک‌ها توسط باکتری‌ها می‌پردازد و مراحل تجزیه، آنزیم‌های کلیدی مانند استرازها، لیپازها، لاکازها و دپلیمرازها، و گونه‌های باکتریایی مؤثر را معرفی می‌کند. اگرچه این روش پتانسیل بالایی دارد، اما با چالش‌هایی مانند نرخ پایین تجزیه و زمان‌بر بودن فرآیند مواجه است. بنابراین، بهینه‌سازی سویه‌های میکروبی، بهبود عملکرد آنزیم‌ها و شرایط کشت می‌تواند نقش مهمی در توسعه راهکارهای زیست‌فناورانه برای حذف میکروپلاستیک‌ها ایفا کند.

استناد: پیرحقی میترا. (۱۴۰۴). 'زیست‌تجزیه‌پذیری میکروپلاستیک‌ها با استفاده از باکتری‌ها', نشاء علم، ۱۵ (۲)، ۱۸۹-۱۹۷.

ناشر: بنیاد پیشبرد علم و فناوری در ایران و انجمن بیوشیمی فیزیک ایران
© نویسندگان حق نشر و کلیه حقوق انتشار را برای خود حفظ می‌کنند.

* عهده‌دار مکاتبات: استادیار، تلفن: ۳۳۱۵۳۳۱۱ (۹۸۲۴)، آدرس الکترونیکی: m.pirhaghi@iasbs.ac.ir
[1] دانشکده علوم زیستی، دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان، زنجان، ایران

مقدمه

میکروپلاستیک‌ها به‌عنوان آلاینده‌های نوظهور شناخته می‌شوند؛ زیرا در بخش‌های مختلف محیط‌زیست شامل جو، آب‌ها و خاک یافت می‌شوند. میکروپلاستیک‌ها به ذرات پلاستیکی با اندازه کمتر از ۵ میلی‌متر اطلاق می‌شوند که یا مستقیماً به‌صورت ذرات ریز تولید می‌شوند (میکروپلاستیک‌های اولیه) یا در اثر تجزیه فیزیکی، شیمیایی و زیستی پلاستیک‌های بزرگ‌تر در محیط ایجاد می‌گردند (میکروپلاستیک‌های ثانویه). میکروپلاستیک‌ها به دلیل خاصیت پایداری و تجمع زیستی برای حیات‌وحش و انسان‌ها مضر هستند. این خطر ناشی از افزودنی‌های مختلفی است که هنگام تولید پلاستیک‌ها مانند رنگ‌ها، نرم‌کننده‌ها و بازدارنده‌های شعله به آنها اضافه می‌شود. این ذرات به دلیل اندازه کوچک و پایداری شیمیایی بالا، به‌راحتی در محیط‌های آبی، خاک و حتی هوا پراکنده می‌شوند و وارد زنجیره‌های غذایی می‌گردند [۱, ۲].

اولین پلاستیک ساخته‌شده توسط انسان در سال ۱۸۶۲ توسط شیمیدان انگلیسی الکساندر پارکس[1] با نام پارکزین[2] معرفی شد که از سلولز طبیعی مشتق شده بود؛ اما نخستین پلاستیک کاملاً مصنوعی و غیرمشتق از مواد طبیعی در سال ۱۹۰۷ توسط شیمیدان بلژیکی–آمریکایی لئو بیکلند[3] با نام باکلیت[4] و بر پایه رزین فنول–فرمالدهید ساخته شد، برای سال‌ها در ساخت تلفن‌ها استفاده شد. اختراعات مهم بعدی بین دو جنگ جهانی رخ داد: سلوفان (۱۹۱۳)، پلی‌وینیل کلرید (۱۹۲۷)، پلی‌استایرن و نایلون (۱۹۳۸)، و پلی‌اتیلن (۱۹۴۲). پس از جنگ جهانی دوم، تولید پلاستیک با سرعتی شگفت‌انگیز رشد کرد: بین ۱۹۵۰ تا ۱۹۷۰ بیست برابر شد و به بیش از ۲۵ میلیون تن رسید. این دوران با ورود پلاستیک به زندگی روزمره همراه بود؛ محصولاتی مانند ظروف تاپرور (۱۹۴۶) و وسایل خانگی در دهه‌ی ۱۹۵۰ و ۱۹۶۰ که پلاستیک را به نماد «سبک زندگی آمریکایی» تبدیل کردند. حتی در دنیای مد و مبلمان نیز پلاستیک به اوج محبوبیت رسید. در سال ۱۹۶۸ نخستین بطری‌های پلاستیکی وارد بازار شدند [۳]. تولید پلاستیک سالانه به طور چشمگیری افزایش یافته است؛ به‌طوری‌که در سال ۲۰۱۵ حدود ۳۸۰ میلیون تن در سال رسید. مجموع تولید پلاستیک از سال ۱۹۵۰ تا ۲۰۱۵ بیش از ۷۸۰۰ میلیون تن بوده که حدود ۶۳۰۰ میلیون تن آن به‌صورت زباله پلاستیکی باقی مانده است. پیش‌بینی می‌شود تولید پلاستیک تا سال ۲۰۲۵ به ۵۰۰ میلیون تن در سال برسد. این روند نگرانی‌های زیادی ایجاد کرده است؛ زیرا میکروپلاستیک‌ها عمدتاً از تجزیه پلیمرهای بزرگ‌تر و تحت‌تأثیر عوامل فیزیکی، شیمیایی و زیستی به وجود می‌آیند [۴].

مطالعات متعدد نشان داده‌اند که این ذرات می‌توانند باعث آسیب فیزیولوژیک در موجودات دریایی، تغییرات ژنتیکی، اثرات التهابی و همچنین انتقال آلاینده‌های شیمیایی نظیر فلزات سنگین و ترکیبات آلی سمی شوند. علاوه بر این، ورود میکروپلاستیک‌ها به بدن انسان از طریق آب، غذا و هوا، نگرانی‌هایی جدی در زمینه سلامت عمومی ایجاد کرده است [۱, ۲].

به دلیل گسترش جهانی این آلودگی و توان پایین روش‌های طبیعی در حذف آن، یافتن راهکارهای مؤثر و پایدار برای تجزیه میکروپلاستیک‌ها به یک اولویت مهم در زیست‌فناوری و محیط‌زیست تبدیل شده است. برخی از میکروارگانیسم‌های موجود در اکوسیستم (باکتری‌ها و قارچ‌ها) می‌توانند تأثیر قابل‌توجهی در تجزیه میکروپلاستیک‌ها داشته باشند. یکی از رویکردهای نوین و امیدوارکننده در این زمینه، استفاده از باکتری‌ها و فرایندهای زیستی برای شکستن و معدنی‌سازی این ترکیبات است. باکتری‌ها یکی از اصلی‌ترین گروه‌های موجودات زنده هستند و بیشترین تنوع گونه‌ای را در میان آنها دارند. تاکنون گزارش‌های زیادی درباره توانایی تجزیه میکروپلاستیک‌ها توسط باکتری‌ها منتشر شده است. فارغ از نوع میکروارگانیسم (باکتری یا قارچ)، اصل مهم در تجزیه زیستی میکروپلاستیک‌ها، تبدیل آنها به مواد غیرآلی بی‌ضرر از طریق متابولیسم میکروبی است. پلی‌اتیلن (PE)، پلی‌استایرن (PS) و پلی‌اتیلن‌ترفتالات (PET) از رایج‌ترین پلاستیک‌هایی هستند که به طور گسترده در زندگی روزمره استفاده می‌شوند. میکروپلاستیک‌هایی که پس از خرد شدن این مواد ایجاد می‌شوند، توسط میکروارگانیسم‌ها تجزیه می‌گردند.

این مقاله با هدف بررسی نقش باکتری‌ها در تجزیه میکروپلاستیک‌ها نگارش شده و تلاش دارد ضمن معرفی گونه‌های مؤثر باکتریایی، مکانیسم‌های زیست‌مولکولی تجزیه را تحلیل کرده و عوامل محیطی مؤثر بر کارایی این فرایند را تبیین نماید [۱, ۲]. تمرکز مقاله بر روی موارد زیر است:

[1] Alexander Parkes
[2] Parkesine
[3] Leo Baekeland
[4] Bakelite

شاپا چاپی 2008-935X شاپا الکترونیکی https:/www.sciencecultivation.ir 2783-0934

- تعریف و شناسایی مراحل زیست‌تجزیه میکروپلاستیک‌ها توسط باکتری‌ها؛
- معرفی گونه‌های مهم باکتریایی و آنزیم‌های کلیدی در این فرایند؛
- تحلیل نقش بیوفیلم‌ها در جذب و تخریب ذرات پلاستیکی؛
- بررسی محدودیت‌ها، چالش‌ها و راهکارهای پیشنهادی برای بهبود کارایی تجزیه؛
- مرور مطالعات موردی و دستاوردهای نوین در حوزه زیست‌فناوری پلاستیک‌زدایی

با پرداختن به این محورها، مقاله سعی دارد چشم‌اندازی کاربردی برای پژوهشگران، مهندسان محیط‌زیست و سیاست‌گذاران ارائه دهد تا زمینه‌ساز توسعه روش‌های زیستی مؤثر برای مقابله با بحران جهانی میکروپلاستیک‌ها باشد.

ضرورت تجزیه زیستی میکروپلاستیک‌ها

روش‌های فیزیکی و شیمیایی موجود برای حذف یا کاهش میکروپلاستیک‌ها –نظیر فیلتراسیون پیشرفته، اکسیداسیون شیمیایی، یا لخته‌سازی– معمولاً دارای محدودیت‌هایی از جمله هزینه بالا، مصرف انرژی زیاد، و تولید محصولات جانبی سمی هستند. این روش‌ها اغلب در مقیاس‌های بزرگ صنعتی قابل‌پیاده‌سازی نیستند یا کارایی محدودی در برابر ذرات بسیار ریز و پایدار دارند. همچنین، برخی از این تکنیک‌ها تنها باعث انتقال آلودگی از یک محیط به محیط دیگر می‌شوند (مثلاً از آب به لجن یا خاک)، نه تخریب واقعی آلاینده [۵].

در مقابل، تجزیه زیست[1] به‌عنوان یک راهکار سبز، پایدار و کم‌هزینه مطرح شده است که از ظرفیت موجودات زنده (مانند باکتری‌ها، قارچ‌ها یا آنزیم‌های زیستی) برای تجزیه میکروپلاستیک‌ها به ترکیبات ساده‌تر، غیرسمی و قابل‌جذب در طبیعت بهره می‌برد. این فرآیند با استفاده از آنزیم‌های خاص می‌تواند پیوندهای پلیمری مقاوم در ساختار پلاستیک را شکسته و منجر به تجزیه تدریجی یا حتی کامل مواد شود. همچنین، قابلیت ترکیب‌پذیری این روش با سیستم‌های تصفیه فاضلاب یا بیورآکتورهای زیستی، امکان به‌کارگیری آن را در محیط‌های واقعی افزایش داده است [۵].

چالش‌های موجود در تجزیه زیستی میکروپلاستیک‌ها

میکروپلاستیک‌ها و پلاستیک‌ها به دلیل نداشتن گروه‌های عاملی غنی و پیوندهای قابل هیدرولیز، بستر مناسبی برای چسبیدن میکروارگانیسم‌ها و انجام واکنش‌های آنزیمی نیستند [۶]. ترکیب ذاتی و ویژگی‌هایی مانند پایداری و مقاومت بالا در برابر تخریب، مانعی برای تجزیه زیستی آنها محسوب می‌شود. پلیمرهای مقاوم به‌سختی تجزیه می‌شوند و در نتیجه، جذب آنها در محیط‌زیست دشوار است [۷]. این پلیمرهای مقاوم، به‌ویژه آنهایی که زنجیره‌های بلند و انعطاف‌ناپذیری دارند، فقط در صورت فعالیت آنزیمی گسترده و طی مدت‌زمان طولانی، به مونومرهای کوچکتر تجزیه می‌شوند. این فرآیند نیازمند ایجاد پیوندهای حساس آنزیمی با گروه‌های شیمیایی موجود در زنجیره‌ی جانبی یا اصلی پلیمر و در نهایت شکست آنها است.

در فرآیند تجزیه زیستی، یکی از مشکلات پلاستیک‌های سنتی مبتنی بر نفت، این است که پس از قرارگرفتن در معرض عوامل غیرزیستی نظیر تابش UV، دما و فشار فیزیکی طی زمان طولانی، تنها به قطعات کوچکتر تبدیل می‌شوند؛ اما به طور کامل توسط میکروارگانیسم‌ها تجزیه و جذب نمی‌شوند. پلاستیک‌ها به دلیل ساختار ماکرومولکولی، زنجیره‌های بلند، وزن مولکولی بالا، آب‌گریزی و کریستالی بودن، تجزیه‌پذیری میکروبی بسیار کمی دارند؛ چرا که این ویژگی‌ها در اصل برای افزایش عملکرد صنعتی آنها طراحی شده‌اند. برای مثال، پلاستیک‌هایی که فاقد ترکیبات پرواکسیدان هستند، معمولاً گروه‌های عاملی یا پیوندهای استری حساس به آنزیم ندارند و در نتیجه به‌سختی مورد حمله آنزیم‌ها قرار می‌گیرند. در مقابل، پلاستیک‌های زیست‌تجزیه‌پذیر ممکن است دارای گروه‌های عاملی یا پیوندهای استری حساس باشند که تحت‌تأثیر آنزیم‌ها، نور یا گرما تجزیه شوند [۸، ۹].

پلیمرهای با وزن مولکولی بالا نسبت به پلاستیک‌های نوظهور زیست‌تجزیه‌پذیر، سخت‌تر تجزیه می‌شوند، چرا که این دسته پلاستیک‌های جدید معمولاً زنجیره‌های کوتاه‌تر، وزن مولکولی پایین‌تر و گروه‌های عاملی بیشتر و انعطاف‌پذیرتری دارند؛ بنابراین، مشکل اصلی در تجزیه پلاستیک‌ها، به ترکیب شیمیایی خاص آنها در پلاستیک‌های سنتی برمی‌گردد. در نتیجه، لازم است ظرفیت و

[1] Biodegradation

شاپا چاپی 2008-935X شاپا الکترونیکی https:/www.sciencecultivation.ir 2783-0934

کارایی تجزیه میکروبی ارتقا یابد یا گونه‌های کارآمدتری از میکروارگانیسم‌ها شناسایی و مورد استفاده قرار گیرند [۹, ۱۰].

از سوی دیگر، یکی از دلایل اصلی اهمیت موضوع تجزیه پلاستیک‌ها در پژوهش‌های محیط‌زیستی این است که تبدیل پلاستیک‌ها به ذرات ریزتر (میکروپلاستیک) می‌تواند سمیت آزاد کند. برای مثال، فتالات‌ها (PAEs) که به طور گسترده به‌عنوان نرم‌کننده در محصولات پلاستیکی به کار می‌روند، خواصی نظیر انعطاف‌پذیری، دوام و خاصیت شکل‌پذیری را به پلاستیک می‌دهند. انسان عمدتاً از طریق غذا در معرض PAEs قرار می‌گیرد و این مواد می‌توانند مشکلات جدی‌ای مانند اختلالات غدد درون‌ریز، نارسایی‌های متابولیکی و سمیت‌های تولیدمثل ایجاد کنند [۱۱]. ترکیب دیگری به نام بیسفنول A (BPA) نیز که یک ماده مختل‌کننده غدد درون‌ریز شناخته شده است، بخش بزرگی از پلیمرهای سنتزی و نرم‌کننده‌ها را تشکیل می‌دهد. این ترکیب به‌صورت گسترده در سطح جهانی تولید شده و عمدتاً در تولید پلی‌کربنات‌ها و سایر مواد پلیمری استفاده می‌شود [۱۲]. پلاستیک‌ها در حالت کلی به‌عنوان ماکرومولکول‌های نسبتاً بی‌خطر شناخته می‌شوند که در بدن انسان جذب نمی‌شوند، اما بیشترین خطر مربوط به افزودنی‌های سمی‌ای است که در فرآیند تولید آنها افزوده می‌شود یا به علت واکنش‌های ناقص طی سنتز ایجاد می‌گردند. در این میان، ترکیبات کوچک‌تر مانند مونومرها سمیت بالاتری دارند [۱۳].

ویژگی‌های میکروپلاستیک‌ها و آلاینده‌های آلی پایدار (POPs) و همچنین شرایط محیطی، در میزان جذبPOPها روی سطح میکروپلاستیک‌ها نقش دارند. زمانی که مقدار زیادی ازPOPها روی سطح میکروپلاستیک‌ها جذب شود، در مرحله مونومری سمیت آن افزایش می‌یابد. با اینکه انتقال POPهای بلعیده‌شده در زنجیره غذایی هنوز به طور دقیق مشخص نیست، اما دامنه آن بسیار گسترده است. تماس انسان با مونومرها وPOPها می‌تواند از طریق استنشاق، بلع یا تماس پوستی، تعادل طبیعی میکروبیوتای روده را مختل کند [۱۴, ۱۵].

در مجموع، طیف گسترده‌ای از سمیت و آلودگی میکروپلاستیک‌ها و پلاستیک‌ها، هم محیط‌زیست و هم سلامت انسان را تحت‌تأثیر قرار می‌دهد. ازاین‌رو، یافتن دلایل و مکانیسم‌های زیست‌تجزیه توسط میکروارگانیسم‌ها به طور فوری ضروری است.

امکان‌سنجی در تجزیه زیستی میکروپلاستیک‌ها

تنوع میکروبی یکی از عوامل کلیدی در فرآیند تجزیه زیستی است. میکروارگانیسم‌ها شامل باکتری‌ها، قارچ‌ها و برخی جلبک‌ها هستند که دارای ویژگی‌ها و توانایی‌های برجسته‌ای همچون اندازه‌ی کوچک، جذب و متابولیسم سریع، سازگاری بالا، قابلیت جهش‌پذیری آسان و پراکندگی وسیع هستند. این موجودات میکروسکوپی به‌صورت ذاتی یا اکتسابی قادرند حتی در محیط‌های بسیار نامساعد نیز زنده بمانند. جوامع میکروبی قادرند خود را با محیط‌های جدید تطبیق داده، به آنها بچسبند و آنزیم‌هایی ترشح کنند که به آنها اجازه می‌دهد آلودگی پلاستیکی ماندگار را به‌عنوان تنها منبع کربن مورد استفاده قرار دهند [۱۶, ۱۷].

تجزیه میکروبی پلاستیک‌ها و میکروپلاستیک‌ها تحت‌تأثیر رشد میکروارگانیسم‌ها و شرایط محیطی خارجی قرار دارد. متغیرهای محیطی و نوع زیستگاه تحت مطالعه، از عوامل اصلی تعیین‌کننده‌ی تنوع و غنای میکروبی هستند. علاوه بر خود میکروارگانیسم‌ها، ویژگی‌های سطحی مواد پلاستیکی؛ از جمله زبری، برهم‌کنش الکترواستاتیکی، مورفولوژی سطح، آب‌گریزی و انرژی آزاد سطحی نیز در فرآیند تجزیه زیستی نقش دارند [۱۸–۲۰].

امکان تجزیه مؤثر پلیمرها با استفاده از میکروارگانیسم‌های مختلف در حال افزایش است. در زیستگاه‌های دریایی، بیوفیلم‌هایی که توسط جوامع میکروبی تشکیل می‌شوند، به تجزیه پلاستیک‌ها و میکروپلاستیک‌ها کمک می‌کنند. تشکیل بیوفیلم میکروبی یکی از روش‌های اصلی تجزیه پلیمرها است. ابتدا میکروارگانیسم‌ها به سطح پلاستیک می‌چسبند و بیوفیلم تشکیل می‌دهند که به آن اصطلاحاً پلاستی‌سفر[1] گفته می‌شود [۲۱].

جوامع میکروبی وابسته به بیوفیلم‌ها هستند. این بیوفیلم‌ها حاوی مجموعه‌ای متنوع از میکروارگانیسم‌ها بوده و ممکن است گونه‌های تجزیه‌کننده پلاستیک را در خود جای‌داده باشند. برای مثال، آب‌گریزی PE در تشکیل بیوفیلم اختلال ایجاد می‌کند، اما جمعیت‌های میکروبی با سطح سلولی بسیار آب‌گریز، می‌توانند بهتر به سطح PE بچسبند و بیوفیلم تشکیل دهند [۲۲].

مطالعات مختلف نشان داده‌اند که در طبیعت، باکتری‌ها معمولاً به‌صورت «اجتماع» همکاری می‌کنند. جوامع میکروبی شامل مجموعه‌ای از میکروارگانیسم‌ها هستند که به طور هم‌افزا در تجزیه

[1] Plastisphere

شاپا چاپی 2008-935X شاپا الکترونیکی https:/www.sciencecultivation.ir 2783-0934

مشارکت می‌کنند و در مقایسه با گونه‌ی منفرد، کارایی تجزیه بالاتری دارند. این اجتماعات می‌توانند ترکیبات پیچیده را به مونومرهای ساده تجزیه کنند، چرا که چندین گونه به طور همزمان و در کنار یکدیگر عمل می‌کنند.

مکانیسم تجزیه میکروپلاستیک‌ها توسط باکتری‌ها

باکتری‌ها با ایجاد سوراخ‌ها و ناهمواری‌ها روی سطح میکروپلاستیک‌ها باعث تغییر ساختار، چسبیدن و تخریب آنها می‌شوند. به‌عنوان‌مثال، برخی گونه‌های *Bacillus* توانسته‌اند وزن پلی‌پروپیلن را تا ۶/۴٪ و PE را تا حدود ۶٪ کاهش دهند. همچنین *Pseudomonas aeruginosa* قادر به تجزیه PS و PLA تا ۱۰٪ بوده است. برخی پلاستیک‌ها مانند PVC و PET به دلیل وجود افزودنی‌های زیاد و ساختار پیچیده‌تر، تجزیه زیستی دشواری دارند و در برابر باکتری‌ها مقاوم‌ترند؛ بنابراین، مطالعات روی تجزیه پلاستیک‌های ساده‌تر و قابل‌تجزیه زیستی مانند PS، PE و PLA تمرکز بیشتری دارند [۴]. فرآیند تجزیه میکروپلاستیک‌ها توسط باکتری‌ها یک مسیر چندمرحله‌ای، پیچیده و وابسته به شرایط محیطی و نوع پلیمر است. فرایند تجزیه باکتریایی معمولاً شامل تبدیل پلیمرهای بزرگ به ذرات کوچک‌تر، سپس به اولیگومرها، دایمرها و مونومرها و نهایتاً معدنی شدن توسط میکروارگانیسم‌ها است. این فرایند با کمک آنزیم‌های مختلفی انجام می‌شود که محصولات میانی تولید می‌کنند. این مسیر به‌طورکلی شامل چهار مرحله اصلی می‌شود (شکل ۱):

۱- اتصال اولیه و تشکیل بیوفیلم[1]

پس از ورود میکروپلاستیک‌ها به محیط طبیعی، سطح آنها به‌سرعت توسط میکروارگانیسم‌ها، از جمله باکتری‌ها، اشغال می‌شود. این فرآیند منجر به تشکیل بیوفیلم می‌گردد؛ ساختاری ژلاتینی متشکل از سلول‌های باکتری و ماتریکس خارج سلولی[2] (EPS) که سطح پلاستیک را می‌پوشاند. تشکیل بیوفیلم موجب تسهیل در تجمع آنزیم‌ها، حفاظت باکتری در برابر تنش‌های محیطی، و افزایش تماس مستقیم با پلیمر می‌شود [۲, ۲۳]. بیوفیلم نه‌تنها به باکتری‌ها امکان چسبندگی بهتر می‌دهد، بلکه به‌عنوان یک میکروزیست‌بوم[3] عمل می‌کند که تعامل میان گونه‌ها را تنظیم می‌کند (از طریق quorum sensing).

۲- تخریب سطحی پلیمر[4]

در مرحله بعد، باکتری‌ها از طریق آنزیم‌های خارج سلولی و متابولیت‌های فعال خود (مانند اسیدهای آلی، پراکسیدها و رادیکال‌های آزاد)، موجب اکسیداسیون یا شکستن پیوندهای ضعیف‌تر در سطح پلیمر می‌شوند. این مرحله معمولاً باعث ایجاد ترک‌های سطحی، حفره و کاهش وزن میکروپلاستیک می‌گردد. برخی فرآیندهای فیزیکی-شیمیایی مانند نور UV و دما نیز ممکن است به شروع این مرحله کمک کنند [۲۴, ۲۵].

۳- تجزیه آنزیمی پلیمر[5]

این مرحله هسته اصلی زیست‌تجزیه محسوب می‌شود. در این بخش، باکتری‌ها از آنزیم‌های خاص برای شکستن زنجیره‌های بلند پلیمر به الیگومرها و مونومرهای ساده‌تر استفاده می‌کنند. نوع آنزیم‌ها بسته به نوع پلاستیک متفاوت است [۴, ۵, ۲۵]، از جمله:

- Polyesterases و Lipases برای پلی‌اتیلن ترفتالات (PET)
- Hydrolases و Esterases برای پلی‌یورتان (PU)
- Alkane hydroxylases برای پلی‌اتیلن (PE) و پلی‌پروپیلن (PP)
- Laccases و Peroxidases برای پلی‌استایرن (PS)

این آنزیم‌ها باعث شکستن پیوندهای استری، اتر یا آلکانی موجود در ساختار پلیمر می‌شوند که نتیجه آن تولید ترکیبات ساده‌تر قابل‌مصرف برای باکتری است.

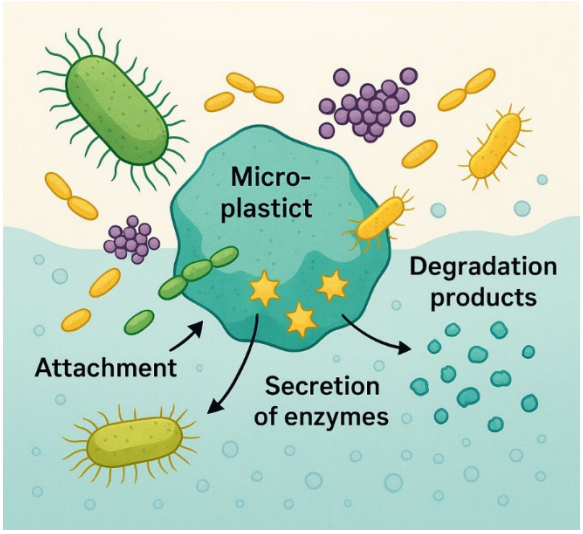
آنزیم PETase که از باکتری *Ideonella sakaiensis* استخراج شده است، توانایی تجزیه PET را دارد. این آنزیم با شکستن پیوندهای استری در PET، آن را به مونومرهای قابل‌جذب مانند هیدروکسی‌اتیل‌تریفتالیک‌اسید (MHET) و بیس‌هیدروکسی‌اتیل‌تریفتالیک‌اسید (BHET) تبدیل می‌کند. در ادامه، آنزیم MHETase این ترکیبات را به ترفتالیک‌اسید و اتیلن‌گلیکول تجزیه می‌کند که می‌توانند توسط باکتری جذب شوند و به انرژی تبدیل شوند. تحقیقات اخیر نشان داده‌اند که با مهندسی ژنتیکی PETase، می‌توان کارایی آن را در تجزیه PET افزایش داد [۲۶-۲۸].

[1] Biofilm Formation
[2] Extracellular Polymeric Substances
[3] plastisphere
[4] Surface Weathering
[5] Enzymatic Depolymerization

شاپا چاپی 2008-935X شاپا الکترونیکی https:/www.sciencecultivation.ir 2783-0934

۴- متابولیزه کردن و جذب نهایی[1]

پس از تجزیه پلیمر به مونومرهای قابل‌استفاده، این ترکیبات توسط باکتری‌ها جذب و وارد مسیرهای متابولیک سلولی می‌شوند. این فرایند منجر به تولید انرژی، رشد سلولی و در نهایت معدنی شدن[2] ترکیبات به آب (H_2O)، دی‌اکسیدکربن (CO_2) یا متان (CH_4) در شرایط بی‌هوازی می‌گردد. در برخی موارد، تجزیه کامل انجام نمی‌شود و فرآورده‌های حدواسط سمی مانند الیگومرها یا مواد اکسید شده تولید می‌شوند که در ادامه نیاز به پردازش بیشتر دارند [۵, ۲۳, ۲۴].



شکل ۱: مکانیزم تجزیه میکروپلاستیک‌ها توسط باکتری

نمونه‌هایی از باکتری‌های مؤثر در تجزیه میکروپلاستیک‌ها

مطالعات متعددی نشان داده‌اند که برخی از باکتری‌ها قادر به تجزیه انواع خاصی از میکروپلاستیک‌ها هستند. این باکتری‌ها با ترشح آنزیم‌های خاص می‌توانند پلیمرهای پیچیده را به ترکیبات ساده‌تر تجزیه کرده و در چرخه متابولیکی خود قرار دهند. آنزیم‌های مهم در این فرایند شامل استرازها، لیپازها، لیگنین پراکسیدازها، لاکازها، دپلیمرازها، کاتینازها و منگنز پراکسیدازها هستند که باعث افزایش آب‌دوستی پلاستیک و بهبود چسبندگی باکتری‌ها می‌شوند [۴]. جدول ۱، خلاصه‌ای از مهم‌ترین باکتری‌های گزارش‌شده و آنزیم‌های کلیدی آنها در تجزیه میکروپلاستیک‌ها را ارائه می‌دهد.

عوامل مؤثر بر کارایی تجزیه زیستی میکروپلاستیک‌ها

فرایند تجزیه میکروپلاستیک‌ها توسط باکتری‌ها به‌شدت وابسته به شرایط محیطی و ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی پلاستیک و باکتری است. در ادامه، مهم‌ترین عوامل مؤثر بررسی می‌شوند [۲, ۳۶, ۳۷]:

۱- نوع و ساختار پلاستیک

نوع پلیمر، وزن مولکولی، کریستالینیتی (درصد بلورینگی)، و وجود افزودنی‌ها (مانند پایدارکننده‌ها یا رنگ‌ها) تأثیر مستقیمی بر قابلیت تجزیه زیستی دارد. پلاستیک‌هایی مانند PET و PU دارای گروه‌های قابل هیدرولیز (ester, urethane) هستند و بهتر توسط

جدول ۱: خلاصه‌ای از مهمترین باکتری‌های تجزیه‌کننده میکروپلاستیک‌ها و آنزیم‌های کلیدی آنها.

ردیف	گونه باکتری	نوع پلاستیک هدف	آنزیم‌های کلیدی	شرایط بهینه	منبع
۱	*Ideonella sakaiensis*	PET	PETase, MHETase	۳۰–۳۷ °C، pH خنثی، هوازی	[۲۹]
۲	*Rhodococcus ruber*	PE	Alkane hydroxylase	دمای ۳۰ °C، محیط خاکی	[۳۰]
۳	*Streptomyces sp.*	PLA	Cutinase	شرایط خاکی، دمای ۲۸–۳۰ °C	[۳۱]
۴	*Corynebacterium sp.*	PU	Urethanase	محیط کشت خاص، ۳۰ °C	[۳۲]
۵	*Pseudomonas putida*	PE ،PU ،PS	Monooxygenase, esterase	دمای ۲۵–۳۵ °C، شرایط هوازی	[۳۳]
۶	*Bacillus subtilis*	PLA ،PE	Protease ،lipase	pH قلیایی، دمای متوسط	[۳۳]
۷	*Alcanivorax borkumensis*	PP ،PE	Oxygenase	محیط دریایی، دمای ۲۵°C	[۳۴]
۸	*Thermobifida fusca*	PLA ،PET	Cutinase, esterase	دمای بالا (۵۵ °C)، pH قلیایی	[۳۵]

[1] Assimilation and Mineralization
[2] Mineralization

شاپا چاپی 2008-935X شاپا الکترونیکی https:/www.sciencecultivation.ir 2783-0934

آنزیم‌ها تجزیه می‌شوند. پلیمرهای با زنجیره‌های بلند، بلورین بالا و ساختار غیرقطبی مانند PE و PP، مقاومت بیشتری دارند. پلاستیک‌های آمورف (بی‌شکل) با پیوندهای قابل‌دسترس‌تر، سریع‌تر تجزیه می‌شوند.

۲- گونه و سازگاری باکتری

نوع باکتری، توانایی تولید آنزیم‌های خاص و قدرت تشکیل بیوفیلم از عوامل کلیدی هستند. باکتری‌های گرمادوست مانند *Thermobifida fusca* در دماهای بالا مؤثرتر عمل می‌کنند. باکتری‌های پلاستیک دوست مانند *Pseudomonas spp.* دارای مسیرهای متابولیکی تطبیق‌یافته‌اند. ترکیب چندگونه از میکروب‌ها (کنسرسیوم‌های میکروبی) معمولاً عملکرد بهتری از تک‌گونه‌ها دارند.

۳- دما

دما فعالیت آنزیمی، نفوذپذیری سطح پلاستیک، و رشد باکتری را تحت‌تأثیر قرار می‌دهد. دمای بهینه برای اکثر باکتری‌ها ۳۰ تا ۴۵ درجه سانتی‌گراد است. دماهای پایین سرعت فرآیند را کاهش می‌دهد، درحالی‌که دماهای بالا ممکن است ساختار پلاستیک را نرم و دسترس‌پذیرتر کند.

۴- pH محیط

pH بر پایداری آنزیم‌ها و متابولیسم سلولی تأثیر دارد. دامنه pH بهینه برای بیشتر آنزیم‌های تجزیه‌کننده پلاستی ۶ تا ۸ است. درpHهای اسیدی یا قلیایی شدید، آنزیم‌ها دناتوره شده یا از کار می‌افتند.

۵- دسترسی به اکسیژن

اکثر تجزیه‌های میکروپلاستیکی در شرایط هوازی انجام می‌شود، چرا که اکسیژن برای فعالیت آنزیم‌های اکسیداتیو ضروری است. در محیط بی‌هوازی، برخی مسیرهای متابولیکی فعال نیستند. با این‌حال، برخی باکتری‌های بی‌هوازی نیز توانایی تجزیه دارند، به‌ویژه در محیط‌های گل‌ولای یا لجن فاضلاب.

۶- تشکیل بیوفیلم

بیوفیلم‌ها نقش مهمی در افزایش ماندگاری، تمرکز آنزیم و تحمل تنش‌های محیطی دارند. تشکیل بیوفیلم موجب افزایش تماس مؤثر بین باکتری و سطح پلاستیک می‌شود. گونه‌هایی مثل *Rhodococcus ruber* و *Bacillus subtilis* بیوفیلم‌سازهای قوی هستند.

۷- اندازه و سطح ذرات پلاستیکی

ذرات کوچک‌تر و میکروپلاستیک‌ها (با سطح ویژه بیشتر) سریع‌تر مورد حمله آنزیمی قرار می‌گیرند. پلاستیک‌های صاف و با زبری کم، چسبندگی میکروبی کمتری دارند.

۸- دسترسی به منابع تغذیه مکمل

در محیط‌هایی که مواد آلی دیگر وجود دارند (مثلاً خاک یا فاضلاب)، تجزیه پلاستیک ممکن است کاهش یابد، زیرا: باکتری‌ها ترجیح می‌دهند ابتدا کربن ساده‌تر را مصرف کنند (اثر catabolite repression). بااین‌حال، در شرایط گرسنگی، آنها به سراغ میکروپلاستیک می‌روند. بهینه‌سازی این عوامل، چه در محیط طبیعی و چه در سیستم‌های مهندسی‌شده مانند بیورآکتورها، می‌تواند به شکل چشمگیری سرعت و کارایی تجزیه زیستی میکروپلاستیک‌ها را افزایش دهد.

مزایا، محدودیت‌ها و چالش‌های زیست‌تجزیه میکروپلاستیک‌ها توسط باکتری‌ها

برخلاف روش‌های شیمیایی یا حرارتی که گازهای گلخانه‌ای یا مواد سمی تولید می‌کنند، زیست‌تجزیه معمولاً فرآیندی تمیز و فاقد پساب‌های خطرناک است. بسیاری از باکتری‌ها قادر به رشد در شرایط خاک، آب شیرین، فاضلاب و حتی محیط‌های دریایی هستند. می‌توان از سویه‌های طبیعی یا مهندسی ژنتیکی شده برای افزایش توان تجزیه استفاده کرد (مثلاً باکتری‌های دارای PETase تقویت‌شده). برخی باکتری‌ها قادرند میکروپلاستیک‌ها را تا مراحل نهایی و معدنی شدن (CO_2، H_2O، CH_4) پیش ببرند. امکان پرورش و اعمال کنترل‌شده باکتری‌ها در سیستم‌های صنعتی مانند رآکتورهای زیستی فراهم است.

زیست‌تجزیه میکروپلاستیک‌ها با کمک باکتری‌ها روشی پایدار و سازگار با محیط‌زیست به‌شمار می‌آید، اما با چالش‌های فنی، زیست‌محیطی و اقتصادی نیز مواجه است. زیست‌تجزیه پلاستیک فرآیندی کند است و ممکن است ماه‌ها یا سال‌ها طول بکشد. وجود انواع افزودنی‌ها، رنگ‌ها، فلزات سنگین و ساختار بلورین بالا در برخی میکروپلاستیک‌ها باعث کاهش تجزیه‌پذیری می‌شود. در برخی موارد، محصولات حدواسط مانند الیگومرها یا ترکیبات اکسیدشده می‌توانند برای محیط‌زیست یا سایر موجودات مضر باشند. در حضور مواد آلی ساده‌تر، باکتری‌ها تمایلی به مصرف پلاستیک ندارند. بسیاری از گونه‌های مؤثر در آزمایشگاه، در محیط

شاپا چاپی 2008-935X شاپا الکترونیکی https:/www.sciencecultivation.ir 2783-0934

واقعی زنده نمی‌مانند یا کارایی پایینی دارند (به دلیل تغییرات دما، pH، رقابت زیستی و...). استفاده از میکروارگانیسم‌های اصلاح‌شده ژنتیکی در طبیعت ممکن است با محدودیت‌های قانونی و نگرانی‌های زیست‌اخلاقی مواجه شود.

نتیجه‌گیری

میکروپلاستیک‌ها، به‌عنوان یکی از مهم‌ترین آلاینده‌های نوظهور قرن بیست ویکم، تهدیدی جدی برای محیط‌زیست، موجودات زنده و حتی سلامت انسان به شمار می‌آیند. پایداری بالا، فراوانی گسترده در محیط‌های طبیعی و قابلیت انتقال در زنجیره غذایی، اهمیت مقابله با این ذرات ریزپلاستیکی را دوچندان می‌کند. در میان راهکارهای مختلف مقابله با آلودگی میکروپلاستیک، استفاده از میکروارگانیسم‌هایی مانند باکتری‌ها، رویکردی پایدار، زیست‌سازگار و درحال‌توسعه است. باکتری‌ها با ترشح آنزیم‌های خاص مانند PETase، cutinase و alkane hydroxylase، قادر به شکستن زنجیره‌های پلیمری و تبدیل آنها به ترکیبات ساده‌تر هستند. تاکنون گونه‌هایی مانند *Ideonella sakaiensis*، *Pseudomonas putida*، *Bacillus subtilis* و *Rhodococcus ruber* عملکرد مؤثری در تجزیه انواع پلاستیک‌ها از جمله PET، PE و PU از خود نشان داده‌اند. هرچند این رویکرد مزایای قابل‌توجهی دارد، از جمله دوستدار محیط‌زیست بودن، قابلیت به‌کارگیری در شرایط متنوع و پتانسیل استفاده صنعتی، اما با چالش‌هایی نیز همراه است. از جمله این چالش‌ها می‌توان به‌سرعت پایین تجزیه، تأثیر شرایط محیطی، تولید احتمالی ترکیبات سمی میانی و محدودیت عملکرد در مقیاس طبیعی اشاره کرد. بااین‌حال، توسعه سویه‌های مهندسی‌شده، استفاده از کنسرسیوم‌های میکروبی بومی، بهینه‌سازی شرایط رشد و ترکیب زیست‌تجزیه با سایر فناوری‌های مکمل (مثل پیش‌تصفیه نوری یا شیمیایی)، افق‌های روشنی را برای حذف مؤثر میکروپلاستیک‌ها از محیط فراهم کرده است. ناگفته نماند کرم موم بزرگ (*Galleria mellonella*) توانایی شگفت‌انگیزی در تجزیه پلاستیک‌هایی مانند پلی‌اتیلن دارد. بزاق این کرم حاوی آنزیم‌هایی از خانواده اکسیداز فنولی است که می‌توانند پیوندهای شیمیایی پلی‌اتیلن را اکسید کرده و به قطعات کوچکتر تجزیه کنند. در نهایت، استفاده هوشمندانه از توانایی‌های باکتری‌ها، می‌تواند گامی مهم در جهت پاک‌سازی زیستی محیط‌زیست و کاهش آلودگی پلاستیکی جهانی باشد.

این مقاله و یا جزیی از آن در جایی دیگر قبلا به چاپ نرسیده و این مقاله توسط ماشین و هوش مصنوعی نگارش نشده است.

فهرست منابع

[1]. Thakur, B., Et Al. (2023). Biodegradation of Different Types of Microplastics: Molecular Mechanism and Degradation Efficiency. Science of The Total Environment, 877, 162912.

[2]. Cai, Z., Et Al., (2023). Biological Degradation of Plastics and Microplastics: A Recent Perspective on Associated Mechanisms and Influencing Factors. Microorganisms, 11(7), 1661.

[3]. Chalmin, P. (2019). The History of Plastics: From The Capitol to The Tarpeian Rock. Field Actions Science Reports. The Journal of Field Actions, (Special Issue 19), 6-11.

[4]. Da Silva ,M.R.F., Et Al. (2024). Exploring Biodegradative Efficiency: A Systematic Review on The Main Microplastic-Degrading Bacteria. Frontiers in Microbiology, 15, 1360844.

[5]. Gao, W., Et Al. (2024). Microbial Degradation of (Micro) Plastics: Mechanisms, Enhancements, and Future Directions. Fermentation, 10(9), 441.

[6]. Al Hosni, A. S., Pittman, J. K., & Robson, G. D. (2019). Microbial Degradation of Four Biodegradable Polymers in Soil and Compost Demonstrating Polycaprolactone as An Ideal Compostable Plastic. Waste Management, 97, 105-114.

[7]. Geyer, R., Jambeck, J. R., & Law, K. L. (2017). Production, Use, and Fate OF All Plastics Ever Made. Science Advances, 3(7), E1700782.

[8]. Urbanek, A. K., Rymowicz, W., & Mirończuk, A. M. (2018). Degradation of Plastics and Plastic-Degrading Bacteria in Cold Marine Habitats. Applied Microbiology and Biotechnology, 102(18), 7669-7678.

[9]. Narancic, T., & O'Connor, K. E. (2019). Plastic Waste As A Global Challenge: Are Biodegradable Plastics The Answer To The Plastic Waste Problem?. Microbiology, 165(2), 129-137.

[10]. Lear, G., Et Al. (2025). Plastic Leachates Alter The Composition of Marine Microbial Communities, Not Functional Potential for Plastic Degradation. FEMS Microbiology Ecology, Fiaf087.

[11]. Zhou, B., Et Al. (2020). Spatial Distribution of Phthalate Esters and The Associated Response of Enzyme Activities and Microbial Community Composition in Typical Plastic-Shed Vegetable Soils in China. Ecotoxicology and Environmental Safety, 195, 110495.

شاپا چاپی 2008-935X شاپا الکترونیکی https:/www.sciencecultivation.ir 2783-0934

Mechanism, Analytical Methods, Innovations, and Omics Approaches. Journal Of Hazardous Materials Advances, 100777.
[26]. Di Rocco, G., Et Al. (2023). A Petase Enzyme Synthesised in The Chloroplast of The Microalga Chlamydomonas Reinhardtii Is Active Against Post-Consumer Plastics. Scientific Reports, 13(1), 10028.
[27]. Sevilla, M.E., Et Al. (2023). Degradation of PET Bottles By An Engineered Ideonella Sakaiensis Petase. Polymers, 15(7), 1779.
[28]. Burgin, T ,.Et Al. (2024). The Reaction Mechanism of The Ideonella Sakaiensis Petase Enzyme. Communications Chemistry, 7(1), 65.
[29]. Yoshida, S., Et Al. (2016). A Bacterium That Degrades and Assimilates Poly (Ethylene Terephthalate). Science, 351(6278), 1196-1199.
[30]. Hadar, Y., & Sivan, A. (2004). Colonization, Biofilm Formation and Biodegradation of Polyethylene By A Strain of Rhodococcus Ruber. Applied Microbiology and Biotechnology, 65(1), 97-104.
[31]. Shalem, A., Yehezkeli, O., & Fishman, A. (2024). Enzymatic Degradation of Polylactic Acid (PLA). Applied Microbiology and Biotechnology, 108(1), 413.
[32]. Nakajima-Kambe, T., Et Al. (1999). Microbial Degradation of Polyurethane, Polyester Polyurethanes and Polyether Polyurethanes. Applied Microbiology and Biotechnology, 51(2), 134-140.
[33]. Shah, A.A., Et Al. (2008). Biological Degradation of Plastics: A Comprehensive Review. Biotechnology Advances, 26(3), 246-265.
[34]. Koike, H., Miyamoto, K., & Teramoto, M. (2023). Alcanivorax Bacteria As Important Polypropylene Degraders in Mesopelagic Environments. Applied and Environmental Microbiology, 89(12), E01365-23.
[35]. Qiu, J., Et Al. (2024). A Comprehensive Review on Enzymatic Biodegradation of Polyethylene Terephthalate. Environmental Research, 240, 117427.
[36]. Bule Možar, K., Et Al. (2023). Potential of Advanced Oxidation as Pretreatment for Microplastics Biodegradation. Separations, 10(2), 132.
[37]. Lin, Z., Et Al. (2022). Current Progress on Plastic/Microplastic Degradation: Fact Influences and Mechanism. Environmental Pollution, 304, 119159.
[12]. Konieczna, A., Rutkowska, A., & Rachon, D. J. R. P. Z. H. (2015). Health Risk of Exposure to Bisphenol A (BPA). Roczniki Państwowego Zakładu Higieny, 66(1).
[13]. Wright, S. L., & Kelly, F. J. (2017). Plastic and Human Health: A Micro Issue?. Environmental Science & Technology, 51(12), 6634-6647.
[14]. Fu, L., Li, J., Wang, G., Luan, Y., & Dai, W. (2021). Adsorption Behavior of Organic Pollutants on Microplastics. Ecotoxicology and Environmental Safety, 217, 112207.
[15]. Andrady, A. L. (2011). Microplastics in The Marine Environment. Marine Pollution Bulletin, 62(8), 1596-1605.
[16]. Yuan, J., Et Al. (2020). Microbial Degradation and Othe
r Environmental Aspects of Microplastics/Plastics. Science of The Total Environment, 715, 136968.
[17]. Wang, G.X., Et Al. (2021). Seawater-Degradable Polymers—Fighting The Marine Plastic Pollution. Advanced Science, 8(1), 2001121.
[18]. Papadopoulou, A., Hecht, K., & Buller, R. (2019). Enzymatic PET Degradation. Chimia, 73(9), 743-743.
[19]. Yang, Y., Et Al. (2020). Microplastics Provide New Microbial Niches in Aquatic Environments. Applied Microbiology and Biotechnology, 104(15), 6501-6511.
[20]. Yang, H., Chen, G., & Wang, J. (2021). Microplastics in The Marine Environment: Sources, Fates, Impacts and Microbial Degradation. Toxics, 9(2), 41.
[21]. Anjana, K., Hinduja, M., Sujitha, K., & Dharani, G. (2020). Review on Plastic Wastes in Marine Environment–Biodegradation and Biotechnological Solutions. Marine Pollution Bulletin, 150, 110733.
[22]. Bardají, D.K.R., Et Al. (2020). A Mini-Review: Current Advances in Polyethylene Biodegradation. World Journal of Microbiology and Biotechnology, 36(2), 32.
[23]. Ren, S. Y., & Ni, H. G. (2023). Biodeterioration of Microplastics By Bacteria Isolated from Mangrove Sediment. Toxics, 11(5), 432.
[24]. Cao, Y., Et Al. (2024). Progress and Prospects of Microplastic Biodegradation Processes and Mechanisms: A Bibliometric Analysis. Toxics, 12(7), 463.
[25]. Khurana, S., Et Al. (2025). Bioremediation of Microplastic Pollution: A Systematic Review on

شاپا چاپی 2008-935X شاپا الکترونیکی https:/www.sciencecultivation.ir 2783-0934