

The Plastisphere: Microbial Communities and Their Role in Microplastic Biodegradation in Aquatic Environments: A Review

Yalda Hashempour¹,
 Mohammad Ali Zazouli²,
 Atefeh Jabari³

¹ Assistant Professor, Department of Environmental Health Engineering, Health Sciences Research Center, Faculty of Health, Mazandaran University of Medical Sciences, Sari, Iran

² Professor, Department of Environmental Health Engineering, Health Sciences Research Center, Faculty of Health, Mazandaran University of Medical Sciences, Sari, Iran

³ Master's Student in Environmental Health Engineering, Student Research Committee, Mazandaran University of Medical Sciences, Sari, Iran

(Received September 21, 2025; Accepted January 7, 2026)

Abstract

Microplastic pollution has become a major environmental concern in aquatic ecosystems, posing significant risks to biodiversity and public health. These polymeric particles originate either from the fragmentation of larger plastic debris or from direct industrial production and exhibit a strong capacity to adsorb contaminants, including heavy metals, pathogens, and persistent organic pollutants. The plastisphere refers to the complex microbial communities colonizing plastic surfaces, including bacteria, fungi, algae, and other microorganisms, and mediates their interactions with the surrounding environment. This review examines the role of plastisphere-associated microbial communities in the biodegradation of microplastics in aquatic environments, with a focus on microbial diversity, colonization dynamics, and enzymatic degradation mechanisms. The study was based on a review of articles published in PubMed, Scopus, Web of Science, and ScienceDirect up to July 2025. Keywords included "Microplastic," "Plastisphere," "Biodegradation," and "Microbial Communities." Only English-language, full-text studies addressing aquatic microbial communities and their biodegradation potential were included, whereas non-biological and terrestrial studies were excluded. Data were extracted and evaluated using the SANRA checklist. Plastisphere-associated microorganisms, such as cyanobacteria (*Phormidium*, *Stanieria*) and diatoms, play key roles in microplastic colonization and potential biodegradation.

Plastisphere-associated microorganisms, such as cyanobacteria (*Phormidium*, *Stanieria*), diatoms (*Mastogloia*, *Nitzschia*), and proteobacteria (*Pseudomonas*, *Vibrio*), form biofilms on microplastic (MP) surfaces and can utilize recalcitrant polymers, such as polyethylene and polypropylene, as carbon sources. These microbes secrete enzymes, including hydrolases and oxidoreductases, which facilitate the breakdown of polymers into simpler compounds such as carbon dioxide and water. Environmental factors, including salinity, temperature, and surface properties, strongly influence the composition of plastisphere communities. However, the enrichment of pathogenic taxa and the dissemination of antibiotic resistance genes raise ecological and public health concerns.

Overall, the findings underscore the significant potential of plastisphere microorganisms, particularly *Pseudomonas* and *Bacillus* species, in microplastic degradation. Future research should focus on identifying efficient strains, optimizing enzymatic activity, and developing biodegradable materials to support sustainable management of aquatic ecosystems.

Keywords: plastisphere, microplastic, biodegradation, microbial communities, aquatic environments, degrading enzymes, biofilm

J Mazandaran Univ Med Sci 2026; 35 (253): 110-128 (Persian).

Corresponding Author: Atefeh Jabari - Student Research Committee, Mazandaran University of Medical Sciences, Sari, Iran.
 (E-mail: Jabariatefeh66@gmail.com)

مروری بر مکانیسم‌های میکروبی پلاستیسفر: بررسی نقش آن‌ها در تجزیه زیستی میکروپلاستیک‌ها در اکوسیستم‌های آبی

یلدا هاشم پور^۱

محمدعلی ززولی^۲

عاطفه جباری^۳

چکیده

سابقه و هدف: آلودگی میکروپلاستیک‌ها به یکی از بحران‌های زیست محیطی عمده در اکوسیستم‌های آبی تبدیل شده و تهدیدی جدی برای تنوع زیستی و سلامت عمومی است. این ذرات پلیمری، ناشی از تجزیه پلاستیک‌های بزرگ یا تولید صنعتی، قابلیت جذب آلاینده‌هایی مانند فلزات سنگین، پاتوژن‌ها و مواد آلی پایدار را دارند. پلاستیسفر به جوامع میکروبی ساکن روی سطوح پلاستیک‌ها اشاره دارد که شامل باکتری‌ها، قارچ‌ها، جلبک‌ها و سایر میکروارگانیسم‌ها است و تعاملات آن‌ها با محیط را توصیف می‌کند. این پژوهش مروری بر نقش جوامع میکروبی پلاستیسفر در تجزیه زیستی میکروپلاستیک‌ها در محیط‌های آبی، با تأکید بر تنوع، کلونیزاسیون و مکانیزم‌های آنزیمی تمرکز دارد. مطالعه مروری حاضر، بر اساس بررسی مقالات منتشر شده در پایگاه‌های PubMed، Scopus، Web of Science و ScienceDirect تا ژوئیه ۲۰۲۵ انجام شد. کلمات کلیدی شامل "Microplastic"، "Plastisphere"، "Biodegradation" و "Microbial Communities" بودند. معیارهای انتخاب شامل مقالات انگلیسی با متن کامل، تمرکز بر جوامع میکروبی آبی و نقش در تجزیه زیستی، و حذف مطالعات غیرزیستی یا خشکی محور بوده است. داده‌ها استخراج و فرآیند با چک لیست SANRA تحلیل شد.

میکروارگانیسم‌های پلاستیسفر، شامل سیانوباکتری‌ها (*Stanieria*، *Phormidium*)، دیاتوم‌ها (*Mastogloia*)، *Nitzschia* و پروتئوباکتريا (*Vibrio*، *Pseudomonas*)، با تشکیل بیوفilm بر سطوح میکروپلاستیک‌ها، پلیمرهای مقاوم مانند پلی اتیلن، پلی پروپیلن را به عنوان منبع کربن استفاده می‌کنند. این میکروب‌ها با ترشح آنزیم‌هایی نظیر هیدرولازها و اکسیدوردوکتازها، تجزیه را تسریع کرده و پلیمرها را به ترکیبات ساده مانند کربن دی اکسید و آب تبدیل می‌کنند. عوامل محیطی مانند شوری، دما و ویژگی‌های سطحی بر ترکیب جوامع تأثیر گذارند. با این حال، غنی سازی پاتوژن‌ها و گسترش ژن‌های مقاومت آنتی بیوتیکی، خطرات اکولوژیکی و بهداشتی ایجاد می‌کند.

نتایج نشان دهنده پتانسیل بالای گونه‌هایی مانند *Sordomonas* و *Bacillus* در تخریب پلیمرهای متنوع است. این مطالعه بر نقش پلاستیسفر در کاهش آلودگی تأکید دارد. تحقیقات آینده باید بر شناسایی سویه‌های کارآمد، بهینه سازی آنزیم‌ها و توسعه مواد زیست سازگار تمرکز کنند تا راهکارهای پایدار برای حفاظت اکوسیستم‌های آبی ارائه شود.

واژه های کلیدی: پلاستیسفر، میکروپلاستیک، تجزیه زیستی، جوامع میکروبی، محیط‌های آبی، آنزیم‌های تجزیه کننده، بیوفilm

E-mail: Jabariatefeh66@gmail.com

موفق مسئول: عاطفه جباری - ساری، کیلومتر ۱۸ جاده فرح آباد، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی مازندران، ساری، ایران

۱. استادیار گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی مازندران، ساری، ایران

۱. استاد گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی مازندران، ساری، ایران

۳. دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی بهداشت محیط، کمیته تحقیقات و فناوری دانشجویی، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی مازندران، ساری، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۶/۳۰ تاریخ ارجاع جهت اصلاحات: ۱۴۰۴/۷/۶ تاریخ تصویب: ۱۴۰۴/۱۰/۱۷

مقدمه

آلودگی پلاستیکی به یکی از گسترده‌ترین و مقاوم‌ترین انواع آلودگی‌های محیطی تبدیل شده است. در سال ۲۰۱۹، تولید سالانه پلاستیک به ۳۶۸ میلیون تن رسید و پیش‌بینی می‌شود که این مقدار تا سال ۲۰۵۰ به ۳۳ میلیارد تن افزایش یابد (۱). برآوردها نشان می‌دهد که ۷۶ درصد از کل پلاستیک‌های تولید شده یا در محل‌های دفن زباله قرار می‌گیرند یا در محیط طبیعی پراکنده می‌شوند. به‌طوری که هر ساله بین ۴/۸ تا ۱۲/۷ میلیون تن زباله به اقیانوس‌ها وارد می‌شود (۲، ۳).

قطعات بزرگ پلاستیکی در محیط زیست تحت تأثیر عوامل بیولوژیکی و غیرزیستی تجزیه می‌شوند و به ذرات کوچک‌تر با اندازه‌های کم‌تر از ۵ میلی‌متر تبدیل می‌گردند که به آن‌ها میکروپلاستیک‌ها (Microplastics) گفته می‌شود (۴، ۵). میکروپلاستیک‌ها به دو دسته اولیه و ثانویه تقسیم می‌شوند. میکروپلاستیک‌های اولیه مستقیماً در فرآیند تولید ایجاد می‌شوند و در محصولات مراقبت شخصی مانند خمیر دندان و برخی لوازم آرایشی مورد استفاده قرار می‌گیرند (۶). در مقابل، میکروپلاستیک‌های ثانویه از طریق فعالیت‌های فیزیکی (مانند تأثیر امواج، سایش و اختلال آب)، شیمیایی (شامل چرخه انجماد-ذوب و تابش UV) و بیولوژیکی که به تجزیه و خرد شدن پلاستیک‌های بزرگ منجر می‌شود، تولید می‌گردند. این نوع میکروپلاستیک‌ها، غالب‌ترین شکل میکروپلاستیک‌ها در اقیانوس‌ها را تشکیل می‌دهند (۷).

میکروپلاستیک‌ها (MPs) به دلیل اندازه کوچک ذرات، مساحت سطح وسیع و ویژگی‌های پیچیده سطحی، توانایی جذب آلاینده‌ها شامل آلودگی‌های میکروبی، فلزات سنگین، آلاینده‌های آلی پایدار، پاتوژن‌ها و نانو مواد مهندسی شده هستند (۲، ۸). در محیط‌های آبی، این ذرات کوچک به عنوان حامل‌های آلودگی عمل کرده و تهدیدی جدی برای کیفیت آب و اکوسیستم‌های آبی محسوب می‌شوند (۹، ۱۰).

میکروپلاستیک‌ها به آسانی بلعیده می‌شوند و می‌توانند آلودگی‌ها را از طریق زنجیره غذایی منتقل کنند. در این فرآیند، آلاینده‌ها از میکروپلاستیک‌ها جدا شده و دسترسی زیستی آن‌ها افزایش می‌یابد، که به عنوان اثر اسب تروا شناخته می‌شود (۱۱، ۱۲). آزاد شدن این آلودگی‌ها در بدن موجودات زنده، سمیت آن‌ها را افزایش می‌دهد و تهدیدات قابل توجهی برای اکوسیستم و سلامت انسان به وجود می‌آورد (۱۳، ۱۴).

در سال‌های اخیر، شواهد متعددی از تأثیرات منفی زیست‌شناختی ناشی از آلودگی میکروپلاستیک‌ها شناسایی شده است. این تأثیرات شامل بلعیدن پلاستیک و انسداد روده، آزادسازی افزودنی‌های سمی، اختلالات در متابولیسم انرژی، القای التهاب و معرفی عوامل پاتوژنیک است که قادر به کلونیزه کردن پلاستیک‌ها هستند (۱۵، ۱۶).

با افزایش سریع تعداد میکروپلاستیک‌ها در اقیانوس‌ها، تحقیقات بر پلاستیسفر (Plastisphere) متمرکز شده است، اصطلاحی که به جوامع میکروبی ساکن بر پلاستیک‌ها اشاره دارد و ابتدا برای توصیف میکروب‌های دریایی ابداع شد. این جوامع شامل باکتری‌ها، قارچ‌ها، ویروس‌ها، آرکئا، جلبک‌ها و پروتوزوآها هستند و همچنین به بررسی تعاملات این میکروارگانیسم‌ها با محیط اطرافشان می‌پردازد. هر چند زیست توده پلاستیسفر تنها کم‌تر از ۰/۲ درصد از کل زیست توده در اقیانوس را تشکیل می‌دهد، اما اهمیت آن قابل توجه است؛ زیرا کم‌تر از ۱ درصد از پلاستیک‌ها در محیط دریایی شناسایی می‌شوند (۱۷، ۱۸). پلاستیسفر می‌تواند به‌طور قابل توجهی رفتارهای محیطی پلاستیک‌ها، از جمله حمل و نقل، انباشت آلودگی، خرد شدن و تجزیه آن‌ها را تحت تأثیر قرار دهد. این اثر به‌ویژه از طریق تغییر ویژگی‌های سطحی، دینامیک نشست مواد شیمیایی از میکروپلاستیک‌ها را تغییر می‌دهد (۱۹، ۲۰). جامعه میکروبی پلاستیسفر به‌طور قابل توجهی با محیط‌های اطراف خود متفاوت است و

کلونیزه کنندگان اولیه آن شامل دیاتوم‌ها، سیانوباکتری‌ها و اعضای گاما پروتئوباکتری‌ها و آلفا پروتئوباکتری‌ها هستند. همچنین، میکروب‌های پلاستیسفر نقش حیاتی در تجزیه زیستی میکروپلاستیک‌ها ایفا می‌کنند و فرآورده‌های آنزیمی را برای این منظور به کار می‌گیرند (۶). افزون بر این، پلاستیسفر به عنوان بستری شناخته می‌شود که غنی‌سازی و گسترش میکروارگانیسم‌های پاتوژن یا مقاوم به آنتی‌بیوتیک‌ها را تسهیل می‌کند (۱۷).

در سال‌های اخیر، تحقیقات متعددی بر جنبه‌های مختلف پلاستیسفر متمرکز شده است. برای مثال، در مطالعه Behera و همکاران (۲۰۲۳)، تأثیر تجزیه‌پذیری پلاستیسفر بر میکروپلاستیک‌ها و پتانسیل آن در اقتصاد برای تبدیل زباله به مواد ارزشمند مورد بررسی قرار گرفت. این تحقیق به بررسی نحوه تعامل پلاستیسفر با میکروپلاستیک‌ها و نقش آن در ایجاد فرصت‌های جدید اقتصادی پرداخته است (۲۱). Xu و همکاران (۲۰۲۲) در مطالعه خود به بررسی توانایی میکروپلاستیک‌ها در تقویت ژن‌های مقاومت آنتی‌بیوتیکی و عناصر ژنتیکی متحرک از طریق ایجاد پلاستیسفر پرداختند. این مطالعه به تحلیل نحوه تأثیر میکروپلاستیک‌ها بر گسترش مقاومت به آنتی‌بیوتیک‌ها و نقش پلاستیسفر در این فرآیند پرداخته است (۲۲). این مطالعات نشان دهنده آن است که میکروارگانیسم‌های متنوع در بیوفیلم پلاستیسفر می‌توانند عملکرد و متابولیسم خود را با محیط تطبیق دهند و به‌طور بالقوه باکتری‌های پاتوژن را گسترش دهند، که این امر تهدیدی جدی برای سلامت عمومی به شمار می‌رود (۱۷، ۲۳).

با وجود پیشرفت‌های اخیر در درک پلاستیسفر، دانش فعلی در برخی جنبه‌ها همچنان محدود است. برای نمونه، مطالعه Yang و همکاران (۲۰۲۵) نشان داد که جوامع میکروبی پلاستیسفر در رسوبات تالاب رودخانه پرل چین، با استفاده از باکتری‌هایی مانند *Bacillus* و *Pseudomonas*، توانایی تجزیه زیستی پلی‌اتیلن میکروپلاستیک‌ها را دارند (۲۰). هم‌چنین، Ren و Ni

(۲۰۲۳) گزارش کردند که میکروارگانیسم‌های رسوبات مانگرو در چین از طریق تشکیل بیوفیلم و ترشح آنزیم‌ها، پلیمرهایی مانند پلی‌اتیلن و پلی‌هیدروکسی آلکانوات را تجزیه می‌کنند (۲۴). این یافته‌ها پتانسیل میکروارگانیسم‌های پلاستیسفر در کاهش آلودگی میکروپلاستیک‌ها را نشان می‌دهند، اما نیاز به مطالعات بیش‌تر برای درک کامل ساختار و عملکرد این جوامع میکروبی احساس می‌شود.

این مقاله مروری با هدف بررسی جامع نقش جوامع میکروبی پلاستیسفر در تجزیه زیستی میکروپلاستیک‌ها در محیط‌های آبی طراحی شده است. این مطالعه با تحلیل دانش موجود، به بررسی میکروب‌های کلونیزه کننده، عوامل محیطی مؤثر بر ترکیب پلاستیسفر، و فرآورده‌های آنزیمی دخیل در تجزیه میکروپلاستیک‌ها می‌پردازد. نتایج به‌دست آمده می‌تواند به توسعه راهکارهای مؤثر برای کاهش آلودگی پلاستیکی و حفاظت از اکوسیستم‌های آبی کمک کند.

مواد و روش‌ها

این مطالعه یک مرور روایتی است که با هدف بررسی جوامع میکروبی پلاستیسفر و نقش آن‌ها در تجزیه زیستی میکروپلاستیک‌ها در اکوسیستم‌های آبی انجام شده است. برای اطمینان از کیفیت و ساختار مناسب مقاله مروری روایتی، این پژوهش بر اساس چک لیست استاندارد SANRA نگارش شده است. مطالعه حاضر با کد اخلاق IR.MAZUMS.REC.1403.556 در کمیته اخلاق معاونت تحقیقات و فناوری دانشگاه علوم پزشکی مازندران تصویب شده است.

استراتژی جستجو

جستجوی جامعی در پایگاه‌های داده علمی ScienceDirect، Web of Science، Scopus، PubMed انجام شد تا مقالات مرتبط منتشر شده تا ژوئیه ۲۰۲۵

زیستی (شامل مکانیسم‌های آنزیمی در صورت وجود) استخراج گردید.

یافته‌ها

ترکیب جوامع میکروبی در پلاستیسفر

پلاستیسفرهای میکروبی شامل جوامع میکروبی خاصی هستند که بر روی سطوح میکروپلاستیک‌ها شکل می‌گیرند و به‌طور طبیعی در اکوسیستم‌های آبی و زمینی یافت می‌شوند. این جوامع میکروبی به‌ویژه در معرض شرایط محیطی سخت، مانند دماهای متغیر و کمبود مواد مغذی، توانایی تشکیل بیوفilm را دارند (۲۵). بیوفilm‌ها ساختارهای پیچیده‌ای هستند که شامل سلول‌های میکروبی در یک ماتریس خارج سلولی است و به میکروب‌ها کمک می‌کند تا در برابر شرایط نامساعد مقاومت کنند (۲۶). در مطالعه‌ای که توسط Mayali و همکاران (۲۰۱۸) انجام شد، ارتباط بین انواع مختلف ارگانیسم‌های اتوتروف و سایر میکروارگانیسم‌ها در پلاستیسفر مورد بررسی قرار گرفت. این پژوهش نشان می‌دهد که ارگانیسم‌های اتوتروفي که در پلاستیسفر یافت می‌شوند، به‌عنوان تولید کنندگان اولیه در این اکوسیستم عمل کرده و مواد آلی مورد نیاز سایر میکروارگانیسم‌ها را فراهم می‌کنند (۲۷). هم‌چنین در مطالعه‌ای دیگر توسط Zhang و همکاران (۲۰۲۲)، مشاهده شد که در پلاستیسفر، متابولیت‌های متنوعی در طول زمان آزاد می‌شوند که می‌توانند توسط سایر میکروب‌ها مورد استفاده قرار گیرند. این فرآیند به ایجاد یک شبکه تعاملی از بیوفilm‌ها منجر می‌شود. علاوه بر این، میکروپلاستیک به‌عنوان زیستگاه‌های اکولوژیکی نوظهور برای مستعمره‌سازی میکروبی عمل می‌کند و در طول توسعه بیوفilm بر روی این سطوح می‌تواند منجر به تغییرات قابل توجهی در تنوع میکروبی گردد (۲۸).

مطالعات مختلفی گزارش کرده‌اند که در محیط دریایی، پلاستیسفر عمدتاً توسط میکروارگانیسم‌هایی از جمله دیاتوم‌ها، جلبک‌ها و باکتری‌های رشته‌ای کلونیزه

شناسایی شوند. هیچ محدودیت زمانی برای مقالات قدیمی‌تر اعمال نشد، اما تأکید بر مطالعات اخیر و با تأثیر بالا بود تا جدیدترین پیشرفت‌ها در زمینه پلاستیسفر پوشش داده شود. کلمات کلیدی شامل، «Plastisphere»، «Microbial Biodegradation»، «Microplastic Communities»، «Aquatic Environments»، «Biofilm» و «Degrading Enzymes» بودند که با استفاده از عملگرهای بولی ترکیب شدند تا مقالات مرتبط به‌طور مؤثر شناسایی شوند.

معیارهای انتخاب و حذف مقالات

این مرور شامل مطالعاتی به زبان انگلیسی با دسترسی به متن کامل مقالات بود که جوامع میکروبی ساکن بر سطوح میکروپلاستیک‌ها در اکوسیستم‌های آبی بررسی کرده و نقش آن‌ها در تجزیه میکروپلاستیک‌ها را کاوش کرده بودند. هر دو نوع مطالعه توصیفی با تمرکز بر تاکسون‌های میکروبی و تحقیقات درباره مسیرهای تجزیه آنزیمی مرتبط تلقی شدند. معیار اصلی انتخاب، مشارکت اجتماعات میکروبی در تجزیه زیستی میکروپلاستیک‌ها بود.

انتخاب مطالعات و استخراج داده‌ها

مطالعاتی که صرفاً بر مکانیسم‌های تجزیه غیرزیستی مانند فتوتجزیه، اکسیداسیون حرارتی یا هیدرولیز تمرکز داشتند، کنار گذاشته شدند. هم‌چنین، تحقیقاتی که محدود به اکوسیستم‌های خشکی بودند و ارتباط روشی با محیط‌های آبی نداشتند، حذف شدند. علاوه بر این، مطالعاتی که از نظر روش‌شناسی فاقد دقت لازم، شناسایی ناکافی میکروب‌ها یا داده‌های تجربی مرتبط با تجزیه میکروبی بودند، کنار گذاشته شدند. پس از غربالگری اولیه عناوین و چکیده‌ها، متن کامل مقالات بالقوه مرتبط به‌طور کامل بررسی شد و داده‌هایی در مورد تاکسون‌های میکروبی درگیر، انواع میکروپلاستیک‌های مورد مطالعه و شواهد فعالیت تجزیه

شده و گروه‌های باکتریایی غالب معمولاً شامل پروتئوباکتیریا، باکتریوئیدها، باکتری فیلامنتوس و سیانوباکتری ها هستند (۶، ۲۱). این جوامع نقش کلیدی در تولید مواد آلی و تجزیه هیدروکربن‌ها ایفا می‌کنند. جدول شماره ۱، خلاصه‌ای از مطالعات انجام شده بر روی پلاستیسفر بر اساس محل و روش نمونه‌برداری، نوع میکروپلاستیک و جامعه میکروبی را ارائه می‌دهد. تحقیقات در این زمینه معمولاً بر اساس روش‌های نمونه‌برداری میدانی و انکوباسیون در محل انجام می‌شود. انواع مختلف میکروپلاستیک‌های شناسایی شده شامل پلی‌اتیلن (PE)، پلی‌پروپیلن (PP)،

پلی‌استایرن (PS)، پلی‌اتیلن ترفتالات (PET)، پلی‌وینیل کلراید (PVC)، پلی‌یورتان (PU) و پلی‌اتیلن با چگالی بالا (HDPE) می‌باشد. این مطالعات به شناسایی و تجزیه و تحلیل جامعه میکروبی در پلاستیسفرها کمک کرده و تفاوت‌های قابل توجهی را با میکرو زیستگاه‌های موجود در همان محیط نشان می‌دهند. طبق نتایج جدول شماره ۱، خانواده رودوباکتراسه (Rhodobacteraceae)، به‌ویژه روزئوباکتر (*Roseobacter*)، جمعیت اصلی پلاستیسفر را تشکیل می‌دهد. این ارگانیسم‌ها به‌طور قابل توجهی بر روی میکروپلاستیک‌های دریایی غنی شده‌اند و نسبت به ذرات آلی و آب دریا بیش تر هستند.

جدول شماره ۱: ترکیب جوامع میکروبی در پلاستیسفر در محیط‌های آبی

ردیف	محل نمونه‌برداری	نوع میکرو پلاستیک	جوامع میکروبی	روش نمونه برداری	رفرنس
۱	دریای مدیترانه	PS, PP, PE	سیانوباکتری‌ها (Cyanobacteria) ۴۰٫۸ درصد، عمدتاً <i>Pleurocapsa</i> آلفا پروتئوباکتیریا <i>Roseobacter</i> sp (Alphaproteobacteria) ۳۲٫۲ درصد،	نمونه‌برداری میدانی	(۲۹)
۲	اقیانوس اطلس شمالی	PS PP, PE,	آلفا پروتئوباکتیریا (Alphaproteobacteria) ۱۷٫۶۷ ± ۵٫۲۸ درصد، گاما پروتئوباکتیریا (Gammaproteobacteria) ۴۰٫۷۶ ± ۸٫۴۳ درصد	نمونه‌برداری میدانی	(۳۰)
۳	دریای شمال	PE, PP	سیانوباکتری‌ها (Cyanobacteria) ۹٫۱۰۹ ± ۷٫۴۰ درصد، آلفا پروتئوباکتیریا (Alphaproteobacteria)، گاما پروتئوباکتیریا (Gammaproteobacteria)، باکتریوئیدس (Bacteroidetes)	نمونه‌برداری میدانی	(۳۱)
۴	مصب پانگ تسه	PP, PS PE,	پروتئوباکتیریا (Proteobacteria)، سیانوباکتری‌ها (Cyanobacteria)، باکتریوئیدس (Bacteroidetes)، اکتینوباکتیریا (Actinobacteria)	نمونه‌برداری میدانی	(۳۲)
۵	اقیانوس اطلس شمالی	PP, PE	ویبریو (<i>Vibrio</i> sp.)	نمونه‌برداری میدانی	(۳۳)
۶	اقیانوس اطلس استوایی	PA PVC, PE,	پروتئوباکتیریا (Proteobacteria) ۵۲ درصد، باکتریوئیدس (Bacteroidetes) ۱۰ درصد، کرن‌آرکئوتا (Crenarchaeota)	نمونه‌برداری میدانی	(۳۴)
۷	اقیانوس آرام شمال شرقی	PE, PP, PS	باسیلوس (<i>Bacillus</i>) و باسیلاریوفیسه آ (Bacillariophyceae)	نمونه‌برداری میدانی	(۳۵)
۸	دریای شمال	PP PE,	باکتریوئیدس (Bacteroidetes)، سیانوباکتری‌ها (Cyanobacteria)، پروتئوباکتیریا (Proteobacteria)	انکوباسیون در محل	(۳۱)
۹	دریای بالتیک	PS HDPE,	فلایوباکتریاسه (Flavobacteriaceae)، رودوباکتراسه (Rhodobacteraceae)، پلانکتومایتاسه (Planctomycetaceae)	انکوباسیون در محل	(۳۶)
۱۰	دریای بالتیک	PE, PP, PS	آلفا پروتئوباکتیریا (Alphaproteobacteria)، اسفینگوموناداسه (Sphingomonadaceae)	انکوباسیون در محل	(۳۷)
۱۱	دریای مدیترانه	PVC	گاما پروتئوباکتیریا (Gammaproteobacteria: Oceanospirillaceae)، آلتروموناداسه (Alteromonadaceae)، آلفا پروتئوباکتیریا (Alphaproteobacteria)	انکوباسیون در محل	(۳۸)
۱۲	دریای جنوبی چین	PS	رودوباکتراسه (Rhodobacteraceae)، اسفینگوموناداسه (Sphingomonadaceae)	انکوباسیون در محل	(۳۹)
۱۳	دریای مدیترانه	PE	روزئوباکتر (<i>Roseobacter</i>)، اولیپیلوس (<i>Oleiphilus</i>)، آنستواری‌باکتر (<i>Aestuariibacter</i>)	انکوباسیون در محل	(۴۰)
۱۴	دریای بالتیک	PE, PP, PS	گاما پروتئوباکتیریا (Gammaproteobacteria) ۴۷-۸۱ درصد، آلفا پروتئوباکتیریا (Alphaproteobacteria) ۷-۳۴ درصد، باکتریوئیدیا (Bacteroidia) ۳-۲۰ درصد	انکوباسیون در محل	(۴۱)
۱۵	دریای زرد	-	ویبریو (<i>Vibrio</i>)، سودوآلتروموناس (<i>Pseudoalteromonas</i>)، آلتروموناس (<i>Alteromonas</i>)	انکوباسیون در محل	(۴۲)
۱۶	دریای شمال	PE, PP, PS, PVC, PET	آلفا پروتئوباکتیریا (Alphaproteobacteria) ۱۸-۵۳ درصد، گاما پروتئوباکتیریا (Gammaproteobacteria) ۲۰-۷۵ درصد	انکوباسیون در محل	(۴۳)
۱۷	اقیانوس جنوبی	HDPE	گاما پروتئوباکتیریا (Gammaproteobacteria)، بتا پروتئوباکتیریا (Betaproteobacteria)	نمونه‌برداری میدانی	(۴۴)
۱۸	مانگرو در چین	PP	ویبریو (<i>Vibrio</i>)، رودوباکتراسه (Rhodobacteraceae)، آلتروموناداسه (Alteromonadaceae)، سودوآلتروموناداسه (Pseudoalteromonadaceae)	انکوباسیون در محل	(۴۵)
۱۹	دریای Bohai	PVC, PP PE, PS, PU	گاما پروتئوباکتیریا (Gammaproteobacteria: <i>Vibrio</i>)، <i>Pseudoalteromonas</i> ، باکتریوئیدس (Bacteroidetes)	انکوباسیون در محل	(۴۶)

رودوباکتراسه نه تنها یک کلونیزه کننده اولیه است، بلکه در تمام دوره‌های کلونیزاسیون نیز فراوان است و نقش مهمی در تشکیل بیوفیلم ایفا می‌کند. این امر به تولید ماده پلیمری خارج سلولی (EPS) توسط رودوباکتراسه پس از کلونیزاسیون سطوح جدید مربوط می‌شود که به افزایش نشست سایر میکروارگانیسم‌ها کمک می‌کند (۲۵، ۲۹). در میان گاما پروتئوباکتریا (*Gammaproteobacteria*)، راسته سودومونادالس (*Pseudomonadales*) مورد توجه قرار گرفته است. سودوموناس (*Pseudomonas*) پتانسیل تجزیه پذیری بر روی میکروپلاستیک‌ها را نشان داده و منجر به علاقه مندی به تحقیقات در زمینه تجزیه میکروپلاستیک‌ها شده است (۳۶، ۴۲، ۴۶). ویریو (*Vibrio*) نیز یکی دیگر از اعضای گاما پروتئوباکتریا است که به طور گسترده‌ای بر روی میکروپلاستیک‌ها در محیط‌های دریایی شناسایی شده است. بسیاری از گونه‌های ویریو بیماری‌زا هستند و به عنوان حاملین خطرناک بر روی میکروپلاستیک‌ها شناخته می‌شوند که انتشار آن‌ها را در محیط دریایی تسهیل می‌کنند. این گونه‌ها معمولاً کلونیزه کنندگان اولیه هستند و با توانایی رشد سریع، می‌توانند در مقایسه با سستون‌های طبیعی بر روی پلاستیسفر غالب شوند (۳۰، ۴۷).

کلاس فلاوباکتریا (*Flavobacteria*) به عنوان کلونیزه کننده‌های اصلی بر روی انواع میکروپلاستیک‌ها، از جمله PE، PS، PP و PET مشاهده شده‌اند (۳۰). این خانواده به عنوان یک گونه کلیدی در بیوفیلم‌ها شناخته شده است و از ترشحات دی‌نوفلاژلات‌ها و دیاتوم‌ها تغذیه می‌کند (۳۸). راسته اسفینگوباکتریالس (*Sphingobacteriales*) و جنس لوینلا (*Lewinella*) نیز به طور مکرر به عنوان کلونیزه کننده‌های پلاستیسفر گزارش شده‌اند. اسفینگوباکتریالس توانایی متابولیزه کردن هیدروکربن‌های حلقوی چندگانه (PAHs) را نشان داده است و در نمونه‌های میکروپلاستیک در دوره‌های

نمونه برداری (کوتاه مدت و بلند مدت) از دریای شمال به مقدار فراوان مشاهده شده‌اند (۴۳).

شاخه باکتریایی فیلامنتوس (*Firmicutes*) در جوامع میکروبی متعددی که بر روی نمونه‌های PS دریایی به وفور مشاهده شده‌اند، مشاهده شد. به ویژه، جنس *باسیلوس* (*Bacillus*) پتانسیل تجزیه پذیری وسیع و قدرتمندی بر روی انواع مختلف میکروپلاستیک‌ها، از جمله PE، PP، PS، PVC و PET نشان داده است (۳۵). این ترکیب نشان دهنده پتانسیل پلاستیسفر در تجزیه پلیمرها است، اما تفاوت‌های منطقه‌ای نیاز به تحقیقات گسترده‌تر دارد.

مکانیسم‌های کلونیزه شدن سطح میکروبی در پلاستیسفر کلونیزاسیون میکروارگانیسم‌ها بر سطوح پلاستیکی آزاد (پلاستیسفر) فرآیندی چند مرحله‌ای و تحت تأثیر عوامل محیطی مانند مواد مغذی، جریان آب و ویژگی‌های سطحی است. در اکوسیستم‌های دریایی، گروه‌های غالب بر سطوح میکروپلاستیک مشاهده می‌شوند (۴۸).

فرآیند کلونیزاسیون معمولاً با چسبندگی اولیه به سطح میکروپلاستیک آغاز می‌شود، این چسبندگی اولیه می‌تواند برگشت پذیر باشد، اما با گذشت زمان و با تشکیل بیوفیلم، این اتصال به یک ارتباط دائمی تبدیل می‌شود (۴۹، ۵۰). باکتری‌های گاما پروتئوباکتریا و آلفا پروتئوباکتریا به عنوان نخستین میکروارگانیسم‌هایی که سطح میکروپلاستیک را کلونیزه می‌کنند، شناخته شده‌اند. این باکتری‌ها در مراحل اولیه تشکیل بیوفیلم‌ها، به همراه گونه‌های دیگر مانند *روزئوباکتر* و *آلتروموناس*، با استفاده از مواد مغذی آلی فراهم شده توسط کلونیزه کنندگان اولیه، رشد می‌کنند. کلونیزه کنندگان ثانویه مانند خانواده فلاوباکتریاسه (از گروه باکتریوئیدتس) نیز بر سطوح میکروپلاستیک‌ها مستقر شده و گسترش می‌یابند (۲۸).

در مرحله اتصال غیرقابل برگشت، باکتری‌ها به شدت به سطح میکروپلاستیک چسبیده و تغییرات

ژنتیکی را آغاز می‌کنند (۱۵). این مرحله شامل فعال‌سازی ژن‌های بیوسنتز برای تولید مواد چسبنده است. با پیشرفت رشد بیوفیلم، باکتری‌ها در یک ساختار بالغ و سه‌بعدی سازمان‌دهی می‌شوند و شرایط متغیری را تجربه می‌کنند که به لایه‌بندی درون بیوفیلم منجر می‌شود. این فرایند پیچیده به باکتری‌ها این امکان را می‌دهد که به طور مؤثری به محیط اطراف خود پاسخ دهند و در نتیجه ساختار میکروبی را بهینه کنند (۵۱، ۵۲). در نهایت، مرحله پراکندگی رخ می‌دهد که در آن باکتری‌ها می‌توانند از بیوفیلم‌ها خارج شده و به محیط اطراف بازگردند. این پراکندگی می‌تواند به دلیل رقابت غذایی و گرادیان‌های شیمیایی در بیوفیلم‌ها افزایش یابد. در این مرحله، میکروارگانیسم‌ها قادر به مستعمره شدن در مکان‌های جدید می‌شوند و چرخه کلونیزاسیون دوباره آغاز می‌شود (۵۲، ۵۳). تحقیقات فعلی در این زمینه بر روی پتانسیل انتقال جوامع میکروبی کلونیزه کننده سطوح پلاستیکی، به ویژه باکتری‌ها، و تلاش برای کاهش اثرات منفی آن‌ها بر روی موجودات آبی و تهدیدات بالقوه برای انسان‌ها متمرکز است. تشکیل بیوفیلم توسط میکروارگانیسم‌های بیماری‌زا می‌تواند تأثیرات سمی و مضر گسترده‌ای داشته باشد و بنابراین درک دقیق‌تر این مکانیسم‌ها می‌تواند به توسعه راهکارهای مؤثر برای مدیریت آلودگی‌های پلاستیکی و حفاظت از اکوسیستم‌های آبی کمک کند (۱۵، ۴۸).

نوستون باکتریایی به عنوان منبعی از میکروارگانیسم‌ها برای تعامل با میکروپلاستیک‌ها

نوستون به عنوان یک زیستگاه میکروبی در لایه‌های سطحی منابع آبی، شامل غلظت بالایی از باکتری‌ها است که در فیلم‌های سطحی نازکی قرار دارند. این میکرو لایه، با ضخامت کم‌تر از ۱ میلی‌متر و معمولاً بین ۱۰ تا ۱۰۰ میکرومتر، غنی از مواد آلی و هیدروفوب است (۵۴). مطالعات نشان داده‌اند که غلظت باکتری‌ها در این لایه می‌تواند به ۳۰۰ میلیون در میلی‌لیتر برسد که

۱۰۰ تا ۱۰۰۰ برابر بیش‌تر از غلظت آن‌ها در لایه‌های زیرین آب است. این تجمع باکتری‌ها به دلیل شرایط خاص محیطی مانند نور ماوراء بنفش، دماهای ناپایدار و غلظت بالای مواد آلی در سطح آب امکان‌پذیر است (۲). ترکیب نوستون باکتریایی در آب‌های دریایی به طور قابل توجهی از تنوع باکتریایی کم‌تری نسبت به آب‌های آزاد برخوردار است. در این جوامع، گونه‌های غالب شامل ویبریو (۶۸ درصد) و سودوآئروموناس (۲۱ درصد) از کل کلون‌های موجود هستند (۵۵). مطالعات متعدد نشان می‌دهند که ترکیب باکتریایی نوستون با آب زیر سطحی متفاوت است. سویه‌های باکتریایی جدا شده از بیوفیلم سطحی شامل جنس‌های باکتریوم، کروموباکتریوم، سودوموناس، فلاووباکتریوم، کائولوباکتر، کوری‌نوباکتریوم و خانواده انتروباکتریاسه بودند (۲، ۵۶).

نوستون باکتریایی نقش کلیدی در تعامل با میکروپلاستیک‌ها ایفا می‌کند. میکروپلاستیک‌ها، به ویژه پلی‌اتیلن و پلی‌پروپیلن، به دلیل خواص هیدروفوب و چگالی پایین، به راحتی به باکتری‌ها متصل می‌شوند و بیوفیلم‌هایی را تشکیل می‌دهند که می‌توانند شامل باکتری‌های پاتوژنیک باشند (۵۷). مطالعات نشان داده‌اند که غلظت باکتری‌های پاتوژنیک در فیلم‌های سطحی ممکن است ۱۰ تا ۱۰۰۰ برابر بیش‌تر از لایه‌های زیرین آب باشد. تعداد قابل توجهی از سویه‌های پاتوژنیک از فیلم سطحی آب دریا جدا شده‌اند که شامل آئروموناس هیدروفیلا، اشیریشیا کولی، سودوموناس آئروژینوزا، سالمونلا، استافیلوکوکوس اورئوس، استرپتوکوکوس فکالیس، کلبسیلا پنومونیه، آکالاینس، میکروکوکوس و ویروس‌ها می‌باشند (۵۸). این افزایش غلظت باکتری‌های پاتوژنیک در نوستون‌ها نگرانی‌های جدی درباره کیفیت آب و خطرات بیولوژیکی را به همراه دارد، به ویژه در اکوسیستم‌های آبی که تحت تأثیر آلودگی میکروپلاستیکی قرار دارند. این افزایش غلظت باکتری‌های پاتوژنیک در نوستون‌ها

نگرانی‌های جدی درباره کیفیت آب و خطرات بیولوژیکی را به همراه دارد، به‌ویژه در اکوسیستم‌های آبی که تحت تأثیر آلودگی میکروپلاستیکی قرار دارند. این امر می‌تواند منجر به انتقال پاتوژن‌ها از طریق زنجیره غذایی شود و نیاز به مداخله‌های زیست محیطی مانند پایش مداوم و کاهش آلودگی پلاستیکی دارد.

کاهش میکروپلاستیک‌ها توسط جوامع میکروبی

تجمع میکروپلاستیک‌ها در محیط‌های آبی ناشی از توسعه سریع شهری و افزایش استفاده از محصولات پلاستیکی است. این میکروپلاستیک‌ها به طور پیچیده‌ای تحت تجزیه قرار می‌گیرند که شامل تجزیه فیزیکوشیمیایی و میکروبی است. تجزیه میکروبی این ذرات، پلیمرها را به ترکیبات ساده‌تر تبدیل می‌کند و تجزیه زیستی آن‌ها از مسیرهای مختلفی پیروی می‌کند (۵۹).

پتانسیل تجزیه میکروپلاستیک‌ها در محیط‌های آبی توسط بیوفیلم‌ها با استفاده از باکتری‌های مختلف مورد مطالعه قرار گرفته است (۲۱). تشکیل بیوفیلم می‌تواند به فرسایش سطوح پلاستیکی و تغییرات ساختاری و عملکردی میکروپلاستیک‌ها منجر شود. این فرآیند به چهار مرحله تقسیم می‌شود؛ چسبیدن میکروارگانیسم‌ها به سطح میکروپلاستیک، آزادسازی افزودنی‌ها و مونومرها، از دست دادن ثبات مکانیکی به واسطه آنزیم‌های خارج سلولی، و در نهایت نفوذ میکروارگانیسم‌ها به داخل میکروپلاستیک و تجزیه کامل آن‌ها می‌باشد (۶۰). میکروپلاستیک‌ها به عنوان یک زیرلایه برای چسبیدن بیوفیلم عمل کرده و می‌توانند منبعی از کربن و انرژی برای میکروارگانیسم‌ها باشند. بنابراین، تشکیل بیوفیلم بر روی سطوح پلاستیکی در محیط‌های آبی تسریع می‌شود و افزودنی‌ها و ترکیبات با وزن مولکولی پایین‌تر که از میکروپلاستیک‌ها آزاد می‌شوند، نیز می‌توانند توسط میکروارگانیسم‌ها مصرف شوند. این رویکرد پایدار

می‌تواند به کاهش آلودگی ناشی از پلاستیک‌ها در اکوسیستم‌های آبی کمک شایانی کند (۶۱).

تجزیه میکروپلاستیک‌ها توسط پلاستیسفر میکروبی

پلاستیسفر به عنوان یک محیط میکروبی منحصر به فرد، شرایط مساعدی برای تجزیه زیستی میکروپلاستیک‌ها فراهم می‌آورد. این محیط به دلیل غنی بودن از جوامع میکروبی متنوع، می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر تجزیه پلاستیک‌ها داشته باشد. برخی از میکروارگانیسم‌ها در پلاستیسفر به طور خاص برای تجزیه میکروپلاستیک‌ها شناسایی شده‌اند و می‌توانند با استفاده از پلیمرهای پلاستیکی به عنوان منبع کربن و انرژی، فرآیند تجزیه را تسهیل کنند. همچنین شایان ذکر است که پلاستیسفر می‌تواند از طریق انتخاب نوع میکروارگانیسم‌ها بر روی انواع مختلف میکروپلاستیک‌ها تغییر کند (۱۷، ۶۲).

عوامل مؤثر بر ترکیب پلاستیسفر پیچیده است و عمدتاً تحت تأثیر عوامل مکانی و فصلی قرار دارند؛ اما نوع پلیمر، ویژگی‌های سطحی و شکل نیز تأثیر گذارند (۷). میکروب‌ها، از جمله باکتری‌ها و قارچ‌ها، قادر به تجزیه پلاستیک‌ها هستند و بسیاری از مطالعات به بررسی تجزیه‌کننده‌های پلاستیک پرداخته‌اند. باکتری‌های *استرپتومایسس*، *رودوکوکوس*، *کوری‌نوباکتریوم*، *سودوموناس*، *میکروکوکوس* و *آرتروباکتر* از جمله رایج‌ترین تاکسون‌های میکروبی هستند که توانایی استفاده از ذرات میکروپلاستیک به عنوان منبع انرژی و کربن را در آزمایشگاه‌های تحقیقاتی دارند (۶۳).

تجزیه میکروبی MPs شامل چندین مرحله بیوشیمیایی است. در مرحله اول (Biosynthesis of polyester)، میکروب‌ها آنزیم‌هایی مانند *poly-glycerol hydrolases* و *poly-glycerol hydrolases* تولید می‌کنند که به تجزیه پلیمرهای پلاستیکی کمک می‌کنند. در مرحله دوم، تجزیه زیستی (Biodegradation) رخ

می دهد که شامل تغییرات شیمیایی در ساختار پلیمرها به واسطه فعالیت آنزیمی میکروب هاست (۵۰). آنزیم های کیتیناز که توسط انواع مختلفی از باکتری ها از جمله میکروکوکوس، فلاووباکتریوم، سودوموناس، آکروموباکتر و ویبریو تولید می شوند، مسئول هیدرولیز و تجزیه این پلیمرها هستند. در مرحله سوم، تکه تکه سازی زیستی (Bio-fragmentation) اتفاق می افتد که در آن میکروب ها پلیمرهای بزرگ را به واحدهای کوچک تر و قابل جذب تبدیل می کنند. سرانجام، در مرحله آخر، معدنی سازی (Mineralization) صورت می گیرد که در آن محصولات تجزیه به دی اکسید کربن و آب تبدیل می شوند (۶۴).

در سال های اخیر، توجه زیادی به تجزیه پذیری میکروبی میکروپلاستیک ها در آب معطوف شده است. با این حال، شواهد کمی از مشارکت میکروارگانیسم های دریایی در این فرآیند وجود دارد. مطالعات نشان می دهند که توالی های مربوط به باکتری هایی مانند کلبسیلا، سودوموناس و اسفینگوموناس در بیوفیلم های تشکیل شده روی میکروپلاستیک ها در پساب تصفیه خانه های فاضلاب بیش تر از فاضلاب معمولی است. این می تواند به دلیل توانایی این میکروارگانیسم ها در استفاده از میکروپلاستیک ها به عنوان زیرلایه های رشد باشد که

منجر به تجزیه آن ها می شود (۶۵). میکروارگانیسم هایی مانند سودوموناس، باسیلوس و آکروموباکتر نشان داده اند که می توانند PVC را تجزیه کنند و اسپرژیلوس نیز توانایی تجزیه PU را نشان داده است (۶۷). در زمینه تجزیه PE، میکروارگانیسم هایی مانند آرتروباکتر، اسپرژیلوس، باسیلوس، کوکوریا، سودوموناس و زالرینون ماریتیموم توانایی تجزیه این نوع میکروپلاستیک را نشان داده اند (۶۸). هم چنین، سودوموناس ایزوله شده از پلاستیک هایی که چند روز در خلیج بنگال غوطه ور بودند، توانایی بالایی در تجزیه PP، LDPE و HDPE نشان داد (۶۹). از میان ۱۵ سویه باکتری ای که قادر به تجزیه HDPE از سواحل ایزوله شده بودند، سودوموناس مؤثرترین بود (۷۰). به طور کلی، باکتری های باسیلوس و سودوموناس به عنوان میکروارگانیسم های کلیدی در تجزیه میکروپلاستیک ها شناخته شده اند (۷۱-۷۳). توانایی آن ها در تجزیه انواع مختلف میکروپلاستیک ها، به ویژه در شرایط خاص محیطی، نشان دهنده پتانسیل آن ها برای استفاده در فرآیندهای تجزیه میکروپلاستیک ها در محیط های آبی است. انتخاب خاص سویه های باکتریایی که قادر به تجزیه میکروپلاستیک ها هستند، می تواند به عنوان یک استراتژی مؤثر در مدیریت آلودگی پلاستیکی مورد توجه قرار گیرد (جدول شماره ۲).

جدول شماره ۲: سویه های میکروبی مؤثر در تجزیه زیستی میکروپلاستیک ها و کاربردهای زیست محیطی آن ها

ردیف	محل نمونه برداری یا انجام مطالعه	نوع میکروپلاستیک	میکروارگانیسم های تجزیه کننده	رفرنس
۱	پساب تصفیه خانه های فاضلاب، ایالات متحده	میکروپلاستیک	کلبسیلا (<i>Klebsiella</i>)، سودوموناس (<i>Pseudomonas</i>)، اسفینگوموناس (<i>Sphingomonas</i>)	(۶۵)
۲	دریاچه ناکورو، کنیا	PE	اسفینگوموناس پائوسیموبیلیس (<i>Sphingomonas paucimobilis</i>)، رودوکوکوس رویر (<i>Rhodococcus ruber</i> C208)	(۷۴)
۳	اقیانوس اطلس شمالی	PE	آرکوباکتر (<i>Arcobacter</i>)، کولولیا (<i>Colwellia</i>)	(۷۵)
۴	رسوبات مانگرو، مالزی	PET, HDPE	اسفینگوموناس پائوسیموبیلیس (<i>Sphingomonas paucimobilis</i> Sy)، کلبسیلا پنومونیه (<i>Klebsiella pneumoniae</i>)	(۷۶)
۵	رسوبات مانگرو، مالزی	PP, PS, PE, PET	باسیلوس سرئوس (<i>Bacillus cereus</i>)، باسیلوس گوتیلی (<i>Bacillus goethei</i>)، اکتینومایستس (<i>Actinomyces</i> sp.)	(۷۱)
۶	ساخت محیط کشت، محیط رودخانه و دریا دارای میکروپلاستیک	PE	آرتروباکتر (<i>Arthrobacter</i>)، اسپرژیلوس (<i>Aspergillus</i>)، باسیلوس (<i>Bacillus</i>)، کوکوریا (<i>Kocuria</i>)، سودوموناس (<i>Pseudomonas</i>)، زالرینون ماریتیموم (<i>Zalerion maritimum</i>)	(۶۸)
۷	خلیج بنگال	LDPE, HDPE	باسیلوس اسفریکوس (<i>Bacillus sphericus</i>)، سودوموناس (<i>Pseudomonas</i>)، باسیلوس سرئوس (<i>Bacillus cereus</i>)	(۶۹)
۸	محیط کشت دریایی، آلمان	PET	سودوموناس آستوسنیر (<i>Pseudomonas aestuans</i>)، ایدیومارینا (<i>Idiomarina</i>)، مارینوباکتر (<i>Marinobacter</i>)، اگزوباکتریوم (<i>Exigobacterium</i>)، هالوموناس (<i>Halomonas</i>)، اوکروباکتریوم (<i>Ochrobactrum</i>)	(۷۲)
۹	محیط کشت باکتریایی دریا، چین	PE و PET	باسیلوس (<i>Bacillus</i>)	(۷۷)
۱۰	Gujarat coast در هند	PE, PVC	آرتروباکتر (<i>Arthrobacter</i> sp.)، سودوموناس (<i>Pseudomonas</i> sp.)، کلادوسپوریوم (<i>Cladosporium griseofulvum</i>)، کلادوسپوریودیس (<i>Cladosporiodis</i>)، پنسیلیوم (<i>Penicillium</i>)	(۷۳)
۱۱	خط ساحلی دریاچه Zurich، سوئیس	HDPE, PE, PU		(۷۸)

مکانیسم و آنزیم‌های تجزیه‌پذیری میکروپلاستیک توسط پلاستیسفر

تحقیقات اخیر به پتانسیل تخریب زیستی میکروپلاستیک‌ها به واسطه آنزیم‌های ترشح شده توسط میکروارگانیسم‌ها در پلاستیسفر اشاره کرده‌اند. شواهد نشان می‌دهد که این میکروارگانیسم‌ها قادرند اسکلت کربنی پلیمرهای پلاستیکی را تضعیف کرده و منجر به آزادسازی واحدهای کوچک‌تری شوند که می‌توانند توسط خود میکروارگانیسم‌ها مورد استفاده قرار گیرند. این واحدهای کوچک می‌توانند از طریق انتقال فعال یا غیرفعال از غشای میکروبی عبور کرده و وارد مسیرهای متابولیکی شوند. همچنین، ممکن است این واحدها بدون آن که جذب شوند، در پلاستیسفر باقی بمانند. پس از جذب، الیگومرها و مونومرها ممکن است یا معدنی شوند یا به‌طور جزئی تجزیه گردند و متابولیت‌های ثانویه تولید کنند (۱۷). مطالعات نشان داده‌اند که آنزیم‌های تجزیه‌کننده میکروپلاستیک شامل هیدرولازها (مانند استراز، لیپاز، کراتیناز و کاتیناز) و اکسیدورداکتازها (مانند لاکاز، منگنز پراکسیداز، هیدروکسیلاز و لیگنین پراکسیدازها) شناسایی شده‌اند (۴۶، ۷۹).

کاتالیزورهای بیولوژیکی مؤثر در تجزیه PE، شامل هیدروکسیلاز، لاکاز، پراکسیداز و ردوکتاز هستند که نقش کلیدی در این فرآیند ایفا می‌کنند (۷۹). علاوه بر این، اکسیدورداکتازهایی نظیر لاکاز، منگنز پراکسیداز، هیدروکسیلاز و لیگنین پراکسیداز به‌طور مؤثر در تجزیه PE مشارکت دارند (۸۶). به‌عنوان نمونه، باکتری *Sordomonas atrovinosa* هیدروکسیلاز آلکان را تولید می‌کند که به‌طور مستقیم در تجزیه پلی‌اتیلن با وزن مولکولی پایین (LMWPE) نقش دارد (۸۱).

در ارتباط با PS، نتایج مطالعات نشان می‌دهد که یک استراز خارج سلولی از *Lentinus tigrinus* می‌تواند چشمگیری در تجزیه این ماده دارد (۸۲). همچنین، برخی از پلی‌مرها از باکتری‌های *Silvius* و *Sordomonas* نیز

در این فرآیند مؤثر واقع شده‌اند. علاوه بر این، آنزیم‌های خاصی نظیر استایرن مونو اکسیژناز (SMO)، استایرن اکسید ایزومراز (SOI) و فنیل استالدئید دئیدروژناز (PAD) قابلیت تجزیه PS به استایرن اکسید و دیگر محصولات را دارند (۶).

در زمینه پلی‌اتیلن ترفتالات (PET)، میکروارگانیسم *ایدنولاساکاینس* دو آنزیم به نام‌های PETase و MHETase تولید می‌کند که این ماده را به اسید ترفتالیک (TPA) و اتیلن گلیکول (EG) هیدرولیز می‌کند (۸۳). هم‌چنین، یک سوپرناز از استرپتومایسس اسکایس با توانایی هیدرولیز این پلیمر به اسید ترفتالیک و سایر ترکیبات شناسایی شده است. علاوه بر این، یک سیستم آنزیمی دوگانه شامل هیدرولاز پلی‌استر و کریوکیل استراز، توانایی تجزیه بیوکاتالستی فیلم‌های PET را تقویت کرده است (۸۴).

مطالعات مربوط به تجزیه افزودنی‌های پلاستیکی عمدتاً از طریق آزمایش‌های مستقیم بر روی این افزودنی‌ها و نه بر روی پلاستیک‌ها انجام شده است. به‌عنوان مثال، تحقیقاتی نشان داده‌اند که باکتری *Paracoccus kondratievae* قادر است دی-۲-اتیل هگزیل فتالات و دی‌بوتیل فتالات را در یک محیط مایع از طریق عمل هیدرولازها متابولیزه کند (۸۵). هم‌چنین، *باسیلوس ولترنس* SYBC H47 توانایی تجزیه چهار نوع فتالات را در یک محیط مایع با استفاده از آنزیم کریوکیل استراز نشان داده است (۸۶).

علاوه بر باکتری‌ها، قارچ‌ها نیز در تجزیه فتالات‌ها نقش دارند. به‌ویژه، قارچ‌های *تینه آورسیکالر* و *ترامتس پوبنس* توانسته‌اند بیسفنول A را در حضور آنزیم لاکاز خود که بر روی هیدروژل و Ca-alginate تثبیت شده، تجزیه کنند (۸۷). در پلاستیسفر، تجزیه‌کنندگان باکتریایی مؤثری از گونه‌های *بورکولدریا*، *سودوموناس*، *پاراکوکوس* و *باسیلوس* شناسایی شده‌اند. هم‌چنین، قارچ‌های فوزاریوم نیز در این محیط شناسایی شده‌اند.

شناسایی میکروارگانیسم‌ها و آنزیم‌های مؤثر در تجزیه میکروپلاستیک‌ها می‌تواند به توسعه روش‌های پایدار برای مدیریت زباله‌های پلاستیکی کمک کند. تحقیقات بیش‌تر در این زمینه می‌تواند به بهبود کارایی این آنزیم‌ها و کاربردهای صنعتی آن‌ها منجر شود. خلاصه‌ای از آنزیم‌ها، منابع آن‌ها و محصولات تجزیه در جدول شماره ۳، ارائه شده است.

جدول شماره ۳: آنزیم‌های مؤثر در تجزیه میکروپلاستیک‌ها در پلاستیسفر

ردیف	آنزیم	منبع میکروبی	نوع میکروپلاستیک	محصول تجزیه	رفرنس
۱	هیدروکسیلاز	سودوموناس آئروژینوزا (<i>Pseudomonas aeruginosa</i>)	پلی اتیلن با وزن مولکولی پایین (LMWPE)	CO ₂ و CH ₄ و H ₂ O	(۸۱)
۲	استراز	لنتینوس تگرینوس (<i>Lentinus tigrinus</i>)	PS	CO ₂ و CH ₄ و H ₂ O	(۸۲)
۳	PETase MHETase	ایدهونلا ساکائینسیس (<i>Ideonella sakaiensis</i>)	PET	ترفتالیک و (TPA)	(۸۳)
۴	سوریناز	استرپتومایسس اسکایسیس (<i>Streptomyces scabies</i>)	PET	اتیلن گلیکول (EG) اسید	(۸۴)
۵	هیدرولاز	پاراکوکوس کندراتیوئه (<i>Paracoccus kondratievae</i>)	دی (۲)- اتیل هگزیل فتالات، دی بوتیل فتالات	پتروئیک اسید، اسید استیک	(۸۵)
۶	کسربوکیل استراز	باسیلوس وِلزْتِنسیس (<i>Bacillus velezensis</i>)	فتالات	مونو آلکیل فتالات	(۸۶)
۷	لاکاز	مالاسزیایا فورفور (<i>Malassezia furfur</i>) ترامتس پوبسنس (<i>Trametes pubescens</i>)	PET	CO ₂ و CH ₄ و H ₂ O	(۸۷)

چالش‌ها و محدودیت‌ها و جهت‌گیری‌های تحقیقاتی آینده

با وجود پتانسیل بالای پلاستیسفر در تجزیه زیستی میکروپلاستیک‌ها، استفاده از آن در مقیاس صنعتی با موانع قابل توجهی روبه‌رو است. مهم‌ترین چالش، سرعت پایین تجزیه در اغلب سویه‌های میکروبی است که آن را برای فرآیندهای صنعتی با زمان ماند کوتاه، ناکارآمد می‌کند. علاوه بر این، پایداری و بازتولید کنسرسیوم‌های میکروبی در شرایط صنعتی دشوار است؛

زیرا ساختار و عملکرد جوامع پلاستیسفر به عوامل محیطی وابسته بوده و در راکتورهای بزرگ اغلب دچار ناپایداری و کاهش کارایی می‌شوند. تشکیل بیوفیلم مؤثر نیز در مقیاس وسیع به سادگی امکان‌پذیر نیست و مشکلاتی مانند جداسازی، رشد ناهمگون و اختلال در عملکرد سیستم ایجاد می‌کند. همچنین، هنوز اطلاعات کاملی درباره مسیرهای آنزیمی و ژنتیکی تجزیه پلیمرها در دست نیست و این موضوع توسعه سویه‌های کارآمد را کند می‌کند. در کنار این عوامل، کنترل شرایط عملیاتی مانند دما، pH، شوری و اکسیژن در مقیاس صنعتی هزینه‌بر است. علاوه بر آن، استفاده از جوامع طبیعی یا مهندسی شده با ملاحظات ایمنی زیستی و خطرات زیست‌محیطی همراه است که نیازمند نظارت و چارچوب‌های قانونی دقیق است. مجموعه این محدودیت‌ها نشان می‌دهد که انتقال ظرفیت‌های پلاستیسفر از سطح آزمایشگاهی به کاربردهای صنعتی، نیازمند تحقیقات گسترده‌تر، توسعه فناوری‌های نوین و رویکردهای مهندسی شده و پایدار است.

بحث

پلاستیسفر، به عنوان یک جایگاه اکولوژیکی نوظهور، میزبان جوامع میکروبی متنوعی است که نقش مهمی در تجزیه زیستی میکروپلاستیک‌ها در محیط‌های آبی ایفا می‌کنند. این مطالعه نشان می‌دهد که تاکسون‌های میکروبی، از جمله سیانوباکتری‌هایی مانند *Phormidium* و *Stanieria*، دیاتوم‌هایی مانند *Mastogloia* و *Nitzschia*، و پروتئوباکتری‌هایی مانند *Pseudomonas* و *Vibrio*، از طریق ترشح آنزیم‌های تخصصی مانند هیدرولازها، اکسیدوردوکتازها، هیدرولاز پلی اتیلن ترفتالات و هیدرولاز مونو (۲-هیدروکسی اتیل) ترفتالیک اسید، تجزیه میکروپلاستیک‌ها را هدایت می‌کنند. به ویژه، *Pseudomonas* و *Bacillus* توانایی‌های تجزیه زیستی برجسته‌ای در برابر انواع مختلف میکروپلاستیک‌ها، از جمله پلی‌وینیل کلراید و

پلاستیسفر و کاهش خطرات اکولوژیکی مرتبط با غنی‌سازی میکروب‌های بیماری‌زا تمرکز کنند. با ترکیب این پیشرفت‌های علمی با توسعه پلیمرهای زیست تجزیه پذیر، می‌توان استراتژی‌های هدفمندی برای کاهش مؤثر آلودگی میکروپلاستیک و ارتقای پایداری اکوسیستم‌های آبی طراحی کرد.

سپاسگزاری

بدین وسیله، نویسندگان مقاله از کمیته تحقیقات دانشجویی دانشگاه علوم پزشکی مازندران به‌خاطر حمایت از این تحقیق، تقدیر و تشکر می‌نمایند.

References

1. Bellasi A, Binda G, Pozzi A, Galafassi S, Volta P, Bettinetti R. Microplastic contamination in freshwater environments: A review, focusing on interactions with sediments and benthic organisms. *Environments* 2020; 7(4):30.
2. Stabnikova O, Stabnikov V, Marinin A, Klavins M, Klavins L, Vaseashta A. Microbial life on the surface of microplastics in natural waters. *Applied Sciences* 2021; 11(24): 11692.
3. Tigreros-Benavides P, Garzón-Rodríguez L, Herrera-Villarraga G, Ochoa-Mogollón J, Sarmiento-Sánchez C, Rodríguez-Vargas LH, et al. Microplastics and plastisphere at surface waters in the Southwestern Caribbeansea. *J Environ Manag* 2024; 358: 120745 PMID: 38599094.
4. Ya H, Xing Y, Zhang T, Lv M, Jiang B. LDPE microplastics affect soil microbial community and form a unique plastisphere on microplastics. *Applied Soil Ecology* 2022; 180: 104623.
5. Zazouli M, Nejati H, Hashempour Y, Dehbandi R, Nam VT, Fakhri Y. Occurrence of microplastics (MPs) in the gastrointestinal tract of fishes: A global systematic review and meta-analysis and meta-regression. *Sci Total Environ* 2022; 815: 152743 PMID: 35007572.
6. Zhai X, Zhang XH, Yu M. Microbial colonization and degradation of marine microplastics in the plastisphere: A review. *Front Microbiol* 2023; 14: 1127308 PMID: 36876073.
7. Singh SP, Sharma P, Bano A, Nadda AK, Varjani S. Microbial communities in plastisphere and free-living microbes for microplastic degradation: A comprehensive review. *Green Analytical Chemistry* 2022; 3: 100030.
8. Tang KHD. Microplastics and Antibiotics in Aquatic Environments: A Review of Their Interactions and Ecotoxicological Implications. *Tropical Aquatic and Soil Pollution* 2024; 4(1):60-78.
9. Hashempour Y, Jabari A, Fendereski A. Introducing Statistical Methods to Identify

- the Sources of Microplastics in the Aquatic Environment: An Overview. *J Health Res Commun* 2024; 9(4): 111-120.
10. Zazouli MA, Kouhi K, Abbasi Tajadod A, Hashempour Y. Investigation of Abundance, Characteristics, and Fate of Microplastics in Water and Sludge of Water Treatment Plants: A Narrative Review. *J Mazandaran Univ Med Sci* 2024; 34(234): 200-213.
 11. Zhou J, Liu X, Jiang H, Li X, Li W, Cao Y. Antidote or Trojan horse for submerged macrophytes: Role of microplastics in copper toxicity in aquatic environments. *Water Research* 2022; 216: 118354.
 12. Bhusare S, Satkar SG, Sahu A, Savaliya B, Karale T, Gautam R. Microplastic (MP) Pollution in Aquatic Ecosystems and Environmental Impact on Aquatic Animals. *Uttar Pradesh Journal OF Zoology* 2024; 45(5): 59-68.
 13. Meshram LN, Mhatre KJ. Microplastics: impacts on environment and human health hazards. *Environ Res.* 2024; 18:19.
 14. Jabbari A, Zazouli MA, Hashempour Y. Investigating the Presence of Microplastics as an Emerging Contaminant in Water and Various Beverages: A Review Study. *J Health Res Commun* 2024; 10(2): 85-96 (persian).
 15. Shi X, Chen Z, Wei W, Chen J, Ni BJ. Toxicity of micro/nanoplastics in the environment: Roles of plastisphere and eco-corona. *Soil & Environmental Health* 2023;1(1):100002.
 16. Wright RJ, Erni-Cassola G, Zadjelovic V, Latva M, Christie-Oleza JA. Marine plastic debris: a new surface for microbial colonization. *Environ Sci Technol* 2020; 54(19): 11657-11672 PMID: 32886491.
 17. Tang KHD, Li R. The effects of plastisphere on the physicochemical properties of microplastics. *Bioprocess Biosyst Eng* 2024; 48(1):1-15 PMID: 38960926.
 18. Tang KHD. Terrestrial and Aquatic Plastisphere: Formation, Characteristics, and Influencing Factors. *Sustainability* 2024; 16(5): 2163.
 19. Li Y, Liu C, Yang H, He W, Li B, Zhu X, etal. Leaching of chemicals from microplastics: A review of chemical types, leaching mechanisms and influencing factors. *Sci Total Environ* 2024; 906: 167666 PMID: 37820817.
 20. Yang G, Quan X, Shou D, Guo X, Ouyang D, Zhuang L. New insights into microbial degradation of polyethylene microplastic and potential polyethylene-degrading bacteria in sediments of the Pearl River Estuary, South China. *J Hazard Mater* 2025; 486: 137061 PMID: 39764953.
 21. Behera S, Das S. Environmental impacts of microplastic and role of plastisphere microbes in the biodegradation and upcycling of microplastic. *Chemosphere* 2023; 334: 138928 PMID: 37211165.
 22. Xu C, Lu J, Shen C, Wang J, Li F. Deciphering the mechanisms shaping the plastisphere antibiotic resistome on riverine microplastics. *Water Res* 2022; 225: 119192 PMID: 36206680.
 23. Stevenson EM, Buckling A, Cole M, Lindeque PK, Murray AK. Culturing the Plastisphere: comparing methods to isolate culturable bacteria colonising microplastics. *Front Microbiol* 2023; 14: 1259287 PMID: 37854340.
 24. Ren SY, Ni HG. Biodeterioration of microplastics by bacteria isolated from mangrove sediment. *Toxics* 2023; 11(5): 432 PMID: 37235247.

25. Amaral-Zettler LA, Zettler ER, Mincer TJ. Ecology of the plastisphere. *Nat Rev Microbiol* 2020; 18(3): 139-151 PMID: 31937947.
26. Flemming H-C, Wingender J, Szewzyk U, Steinberg P, Rice SA, Kjelleberg S. Biofilms: an emergent form of bacterial life. *Nat Rev Microbiol* 2016; 14(9): 563-575 PMID: 27510863.
27. Mayali X. Metabolic interactions between bacteria and phytoplankton. *Front Microbiol*; 2018; 9: 727 PMID: 29692774.
28. Zhang SJ, Zeng YH, Zhu JM, Cai ZH, Zhou J. The structure and assembly mechanisms of plastisphere microbial community in natural marine environment. *J Hazard Mater* 2022; 421: 126780 PMID: 34358974.
29. Dussud C, Meistertzheim A, Conan P, Pujo-Pay M, George M, Fabre P, et al. Evidence of niche partitioning among bacteria living on plastics, organic particles and surrounding seawaters. *Environ Pollut* 2018; 236: 807-816 PMID: 29459335.
30. Frère L, Maignien L, Chalopin M, Huvet A, Rinnert E, Morrison H, et al. Microplastic bacterial communities in the Bay of Brest: Influence of polymer type and size. *Environ pollut* 2018; 242(pt A): 614-625 PMID: 30014939.
31. De Tender CA, Devriese LI, Haegeman A, Maes S, Ruttink T, Dawyndt P. Bacterial community profiling of plastic litter in the Belgian part of the North Sea. *Environ Sci Technol* 2015; 49(16): 9629-9638 PMID: 26204244.
32. Jiang P, Zhao S, Zhu L, Li D. Microplastic-associated bacterial assemblages in the intertidal zone of the Yangtze Estuary. *Sci Total Environ* 2018; 624: 48-54 PMID: 29247904.
33. Zettler ER, Mincer TJ, Amaral-Zettler LA. Life in the "plastisphere": microbial communities on plastic marine debris. *Environmental science & technology*. 2013;47(13):7137-46.
34. Woodall LC, Jungblut AD, Hopkins K, Hall A, Robinson LF, Gwinnett C, et al. Deep-sea anthropogenic macrodebris harbours rich and diverse communities of bacteria and archaea. *PLoS One* 2018; 13(11): e0206220 PMID: 30485275.
35. Carson HS, Nerheim MS, Carroll KA, Eriksen M. The plastic-associated microorganisms of the North Pacific Gyre. *Mar Pollut Bull* 2013; 75(1-2): 126-132.
36. Oberbeckmann S, Kreikemeyer B, Labrenz M. Environmental factors support the formation of specific bacterial assemblages on microplastics. *Front Microbiol* 2018; 8: 2709 PMID: 29403454.
37. Ogonowski M, Motiei A, Ininbergs K, Hell E, Gerdes Z, Udekwu KI, et al. Evidence for selective bacterial community structuring on microplastics. *Environ Microbiol* 2018; 20(8): 2796-2808 PMID: 29614210.
38. Pollet T, Berdjeb L, Garnier C, Durrieu G, Le Poupon C, Misson B, et al. Prokaryotic community successions and interactions in marine biofilms: the key role of Flavobacteriia. *FEMS Microbiol Ecol* 2018; 94(6): fty083 PMID: 29733333.
39. Lee OO, Chung HC, Yang J, Wang Y, Dash S, Wang H, et al. Molecular techniques revealed highly diverse microbial communities in natural marine biofilms on polystyrene dishes for

- invertebrate larval settlement. *Microb Ecol* 2014; 68(1): 81-93 PMID: 24402362.
40. Erni-Cassola G, Wright RJ, Gibson MI, Christie-Oleza JA. Early colonization of weathered polyethylene by distinct bacteria in marine coastal seawater. *Microb Ecol* 2020; 79: 517-526 PMID: 31463664.
 41. Hansen J, Melchiorson J, Ciacotich N, Gram L, Sonnenschein EC. Effect of polymer type on the colonization of plastic pellets by marine bacteria. *FEMS microbiology letters*. 2021;368(5): fnab026 PMID: 33640965.
 42. Sun X, Chen B ,Xia B, Li Q, Zhu L, Zhao X, et al. Impact of mariculture-derived microplastics on bacterial biofilm formation and their potential threat to mariculture: a case in situ study on the Sungo Bay, China. *Environ Pollut* 2020; 262: 114336 PMID: 32443196.
 43. Kirstein IV, Wichels A, Gullans E, Krohne G, Gerdt G. The plastisphere–uncovering tightly attached plastic “specific” microorganisms. *PLoS One* 2019; 14(4): e0215859 PMID: 31013334.
 44. Cappello S, Caruso G, Bergami E, Macrì A, Venuti V, Majolino D, et al. New insights into the structure and function of the prokaryotic communities colonizing plastic debris collected in King George Island (Antarctica): Preliminary observations from two plastic fragments. *J Hazard Mater* 2021; 414: 125586 PMID: 34030422.
 45. Xie H, Chen J, Feng L ,He L, Zhou C, Hong P, et al. Chemotaxis-selective colonization of mangrove rhizosphere microbes on nine different microplastics. *Sci Total Environ* 2021; 752: 142223 PMID: 33207502.
 46. Zhang X, Zhang Y, Wu N, Li W, Song X, Ma Y, et al. Colonization characteristics of bacterial communities on plastic debris: the localization of immigrant bacterial communities. *Water Res* 2021; 193: 116883 PMID: 33561605.
 47. Kesý K, Oberbeckmann S, Kreikemeyer B, Labrenz M. Spatial environmental heterogeneity determines young biofilm assemblages on microplastics in Baltic Sea mesocosms. *Frontiers in microbiology*. 2019; 10:1665.
 48. Mishra S, Dash D, Das AP. Aquatic microbial diversity on plastisphere: colonization and potential role in microplastic biodegradation. *Geomicrobiology Journal* 2024; 41(4): 312-323.
 49. Dey S, Rout AK, Behera BK, Ghosh K. Plastisphere community assemblage of aquatic environment: plastic-microbe interaction, role in degradation and characterization technologies. *Environ Microbiome* 2022; 17(1): 32 PMID: 35739580.
 50. Rogers KL, Carreres- Calabuig JA, Gorokhova E, Posth NR. Micro- by- micro interactions: How microorganisms influence the fate of marine microplastics. *Limnology and Oceanography Letters* 2020; 5(1): 18-36.
 51. Anjana K, Hinduja M, Sujitha K, Dharani G. Review on plastic wastes in marine environment–Biodegradation and biotechnological solutions. *Marine Pollution Bulletin*. 2020; 150:110733.
 52. Rumbaugh KP, Sauer K. Biofilm dispersion. *Nat Rev Microbiol* 2020; 18(10): 571-586 PMID: 32533131.
 53. Heacock- Kang Y, Sun Z, Zarzycki- Siek J, McMillan IA, Norris MH, Bluhm AP, et

- al. Spatial transcriptomes within the *Pseudomonas aeruginosa* biofilm architecture. *Mol Microbiol* 2017; 106(6): 976-985 PMID: 29030956.
54. Hörtnagl P, Pérez MT, Sommaruga R. Living at the border: a community and single- cell assessment of lake bacterioneuston activity. *Limnol Oceanogr* 2010; 55(3): 1134-1144 PMID: 20401318.
55. Franklin MP, McDonald IR, Bourne DG, Owens NJ, Upstill- Goddard RC, Murrell JC. Bacterial diversity in the bacterioneuston (sea surface microlayer): the bacterioneuston through the looking glass. *Environ Microbiol* 2005; 7(5): 723-73 PMID: 15819854.
56. Donderski W, Walczak M, Mudryk Z, Kobylinski M. Neustonic bacteria number, biomass and taxonomy. *Polish Journal of Environmental Studies* 1999; 8(3): 137-141.
57. Issac MN, Kandasubramanian B. Effect of microplastics in water and aquatic systems. *Environ Sci Pollut Res Int* 2021; 28(16): 19544-19562 PMID: 33655475.
58. Walczak M, Donderski W, Mudryk Z, Skórczewski P. Aromatic hydrocarbons decomposition by neustonic bacteria. *Pol J Environ Stud* 2000; 9(6): 471-474.
59. Ammala A, Bateman S, Dean K, Petinakis E, Sangwan P, Wong S, et al. An overview of degradable and biodegradable polyolefins. *Progress in Polymer Science* 2011; 36(8): 1015-1049.
60. Flemming H-C. Relevance of biofilms for the biodeterioration of surfaces of polymeric materials. *Polymer degradation and stability* 1998; 59(1-3): 309-315.
61. Yuan J, Ma J, Sun Y, Zhou T, Zhao Y, Yu F. Microbial degradation and other environmental aspects of microplastics/plastics. *Sci Total Environ* 2020; 715: 136968 PMID: 32014782.
62. Shabbir S, Faheem M, Ali N, Kerr PG, Wang L-F, Kuppusamy S, et al. Periphytic biofilm: An innovative approach for biodegradation of microplastics. *Sci Total Environ* 2020; 717: 137064 PMID: 32070890.
63. Jacquin J, Cheng J, Odobel C, Pandin C, Conan P, Pujo-Pay M, et al. Microbial ecotoxicology of marine plastic debris: a review on colonization and biodegradation by the "Plastisphere". *Front Microbiol* 2019; 10: 865 PMID: 31073297.
64. Tiwari N, Santhiya D, Sharma JG. Microbial remediation of micro-nano plastics: Current knowledge and future trends. *Environ Pollut* 2020; 265(Pt A): 115044 PMID: 32806397.
65. Kelly JJ, London MG, McCormick AR, Rojas M, Scott JW, Hoellein TJ. Wastewater treatment alters microbial colonization of microplastics. *PloS One* 2021; 16(1): e0244443 PMID: 33406095.
66. Giacomucci L, Raddadi N, Soccio M, Lotti N, Fava F. Polyvinyl chloride biodegradation by *Pseudomonas citronellolis* and *Bacillus flexus*. *N Biotechnol* 2019; 52: 35-41 PMID: 31026607.
67. Khan S, Nadir S, Shah ZU, Shah AA, Karunarathna SC, Xu J, et al. Biodegradation of polyester polyurethane by *Aspergillus tubingensis*. *Environ Pollut* 2017; 225: 469-480 PMID: 28318785.
68. Paço A, Duarte K, da Costa JP, Santos PS, Pereira R, Pereira M, et al. Biodegradation of polyethylene microplastics by the marine fungus *Zalerion maritimum*. *Sci Total Environ* 2017; 586: 10-15 PMID: 28199874.

69. Sudhakar M, Trishul A, Doble M, Kumar KS, Jahan SS, Inbakandan D, et al. Biofouling and biodegradation of polyolefins in ocean waters. *Polymer Degradation and Stability* 2007; 92(9): 1743-1752.
70. Balasubramanian V, Natarajan K, Hemambika B, Ramesh N, Sumathi C, Kottaimuthu R, et al. High-density polyethylene (HDPE)-degrading potential bacteria from marine ecosystem of Gulf of Mannar, India. *Lett Appl Microbiol* 2010; 51(2): 205-211 PMID: 20586938
71. Auta H, Emenike C, Fauziah S. Screening of *Bacillus* strains isolated from mangrove ecosystems in Peninsular Malaysia for microplastic degradation. *Environ Pollut* 2017; 231(pt 2): 1552-1559 PMID: 28964604.
72. Bollinger A, Thies S, Knieps-Grünhagen E, Gertzen C, Kobus S, Höppner A, et al. A novel polyester hydrolase from the marine bacterium *Pseudomonas aestusnigri*—structural and functional insights. *Front Microbiol* 2020; 11: 114 PMID: 32117139.
73. Kumari A, Chaudhary DR, Jha B. Destabilization of polyethylene and polyvinylchloride structure by marine bacterial strain. *Environ Sci Pollut Res Int* 2019; 26(2): 1507-1516 PMID: 30430447.
74. Wanjohi L, Mwamburi L, Too E, Kosgei J, editors. Bacterial diversity in Lake Nakuru and their potential utilization in agriculture and environment management. *Joint Proceedings of the 27th Soil Science Society of East Africa and the 6th African Soil Science Society Conference*; 2013.
75. Hadar Y, Sivan A. Colonization, biofilm formation and biodegradation of polyethylene by a strain of *Rhodococcus ruber*. *Applied microbiology and biotechnology*. 2004; 65:97-104.
76. Awasthi S, Srivastava P, Singh P, Tiwary D, Mishra PK. Biodegradation of thermally treated high-density polyethylene (HDPE) by *Klebsiella pneumoniae* CH001. *3 Biotech* 2017; 7(5):332 PMID: 28955629.
77. Gao R, Sun C. A marine bacterial community capable of degrading poly(ethylene terephthalate) and polyethylene. *J Hazard Mater* 2021; 416: 125928 PMID: 34489083.
78. Bao R, Pu J, Xie C, Mehmood T, Chen W, Gao L, et al. Aging of biodegradable blended plastic generates microplastics and attached bacterial communities in air and aqueous environments. *J Hazard Mater* 2022; 434: 128891 PMID: 35430459.
79. Zhang J, Gao D, Li Q, Zhao Y, Li L, Lin H, et al. Biodegradation of polyethylene microplastic particles by the fungus *Aspergillus flavus* from the guts of wax moth *Galleria mellonella*. *Sci Total Environ* 2020; 704:135931 PMID: 31830656.
80. Amobonye A, Bhagwat P, Singh S, Pillai S. Plastic biodegradation: Frontline microbes and their enzymes. *Sci Total Environ* 2021; 759: 143536 PMID: 33190901.
81. Jeon HJ, Kim MN. Functional analysis of alkane hydroxylase system derived from *Pseudomonas aeruginosa* E7 for low molecular weight polyethylene biodegradation. *International Biodeterioration & Biodegradation* 2015; 103: 141-146.
82. Tahir L, Ali MI, Zia M, Atiq N, Hasan F, Ahmed S. Production and characterization

- of esterase in *Lantinus tigrinus* for degradation of polystyrene. *Pol J Microbiol* 2013; 62(1): 101-108 PMID: 23829086.
83. Yoshida S, Hiraga K, Takehana T, Taniguchi I, Yamaji H, Maeda Y, et al. A bacterium that degrades and assimilates poly (ethylene terephthalate). *Science* 2016; 351(6278): 1196-1199 PMID: 26965627.
84. Jabloun R, Khalil M, Moussa IEB, Simao-Beaunoir A-M, Lerat S, Brzezinski R, et al. Enzymatic degradation of p-nitrophenyl esters, polyethylene terephthalate, cutin, and suberin by Sub1, a suberinase encoded by the plant pathogen *Streptomyces scabies*. *Microbes Environ* 2020; 35(1): ME19086 PMID: 32101840.
85. Xu Y, Minhazul KA, Wang X, Liu X, Li X, Meng Q, et al. Biodegradation of phthalate esters by *Paracoccus kondratievae* BJQ0001 isolated from Jiuqu (Baijiu fermentation starter) and identification of the ester bond hydrolysis enzyme. *Environ Pollut* 2020;263 (Pt B): 114506 PMID: 32268225.
86. Huang L, Meng D, Tian Q, Yang S, Deng H, Guan Z, et al. Characterization of a novel carboxylesterase from *Bacillus velezensis* SYBC H47 and its application in degradation of phthalate esters. *J Biosci Bioeng* 2020; 129(5): 588-594 PMID: 31761671.
87. Piao M, Zou D, Yang Y, Ren X, Qin C, Piao Y. Multi-functional laccase immobilized hydrogel microparticles for efficient removal of bisphenol A. *Materials* 2019; 12(5):704.