



سال شانزدهم، شماره ۶۰
زمستان ۱۴۰۳، صفحات ۱۶-۱

دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهر
فصلنامه‌ی کاربرد شیمی در محیط زیست

"مقاله پژوهشی"

نقش مدیریت سبز در کاهش استفاده از پلاستیک: یک بررسی سیستماتیک

شیوا دهقان آبکنار^۱، نازنین خاکی پور^{۲*}

^۱دانشیار گروه شیمی، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
^۲استادیار گروه خاکشناسی، واحد سوادکوه، دانشگاه آزاد اسلامی، سوادکوه، ایران

* نویسنده مسئول مکاتبات: Email: nazanin_kh_43713@yahoo.com

(دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۸/۲۳، پذیرش نهایی: ۱۴۰۳/۱۱/۳۰)

چکیده

انباشت زباله‌های پلاستیکی به عنوان یکی از مهم‌ترین چالش‌های زیست محیطی شناخته شده است. تخمین زده می‌شود تا سال ۲۰۱۵ تقریباً ۶۳۰۰ میلیون تن زباله پلاستیکی تولید شده است که ۷۹ درصد آن در محل‌های دفن زباله یا محیط طبیعی انباشته شده است. اقیانوس‌ها بحرانی‌ترین مناطق از لحاظ آلودگی تجمع پلاستیک‌ها به شمار می‌روند، زیرا می‌توانند پلاستیک‌ها را به مناطق دور منتقل کنند. یافتن راه حل‌های جایگزین سازگار با محیط زیست، مانند تجزیه زیستی به جای دفع سنتی، از اهمیت بالایی برخوردار است. تخریب غیرزیستی پلاستیک به طور طبیعی مانند تخریب مکانیکی ناشی از نیروهای جزر و مد، امواج و سایش توسط سنگ‌ها اتفاق می‌افتد. به طور طبیعی، اکسیداسیون در اثر نور، فرآیند هیدرولیز و تخریب مکانیکی می‌تواند به راحتی منجر به تشکیل قطعات میکرو و نانوپلاستیک شود. هیدرولیز پلاستیک یکی از مراحل اصلی در تخریب غیر زیستی است. در تخریب زیستی، باکتری‌های خاک در پاکسازی زیستی آلاینده‌ها کارآمد هستند زیرا با شرایط محیطی متغیر مانند دما، رطوبت، pH و غیره مواجه می‌شوند. بررسی رفتار فرسایش پلیمرها، مخلوط‌ها، کامپوزیت‌ها و غیره در شرایط مختلف محیطی یک موضوع اولویت‌دار برای ارزیابی کاربردهای احتمالی و تعیین طول عمر آنهاست.

واژه‌های کلیدی: پلاستیک، میکروپلاستیک، تخریب غیر زیستی، تخریب زیستی، انباشت

مقدمه

انباشت زباله‌های پلاستیکی اخیراً به عنوان یکی از مهم‌ترین چالش‌های زیست محیطی شناخته شده - است که بر تمام اشکال زندگی، اکوسیستم‌های طبیعی و اقتصاد در سراسر جهان تأثیر می‌گذارد. آلودگی پلاستیکی، جهان و زندگی در آن را تهدید می‌کند. بنابراین روش‌های مقرون به صرفه و سازگار با محیط زیست برای مقابله با این چالش، مورد نیاز است. حذف پلاستیک با استفاده از روش‌های شیمیایی، مواد شیمیایی سمی را وارد محیط می‌کند. از طرفی، محصولات جانبی روش فیزیکی، که یک فرآیند کند و پرهزینه است، جایگزین بهتری به شمار نمی‌آید. بنابراین، یافتن راه حل‌های جایگزین سازگار با محیط زیست، مانند تجزیه زیستی به جای دفع سنتی، از اهمیت بالایی برخوردار است. با این حال، تا به امروز، دانش محدودی در مورد مکانیسم‌های تجزیه زیستی و پلاستیک وجود دارد. فرآیند حذف، باید با تکیه بر منابع زیست محیطی و تولید محصولات جانبی سازگار با محیط زیست نظیر تولید سوخت زیستی باشد. اما تبدیل پلاستیک به سوخت زیستی گران است. از این رو، تجزیه زیستی، فرآیند بهتر، پایدار و مقرون به صرفه برای حذف پلاستیک و هر آلاینده دیگر است. پلاستیک یکی از ضروری‌ترین و پرکاربردترین مواد در جهان است که به دلیل خواص مطلوب از جمله وزن سبک، نگهداری آسان، مقاومت در برابر هوا، سمیت کم، شفافیت و قیمت پایین، کاربرد پلاستیک را در انواع مختلف فعالیت‌های صنعتی، تجاری و کشاورزی تسهیل می‌کند (۱ و ۲). پلاستیک‌ها به دلیل پایداری و دوام خود که از ماهیت پلیمری آن ناشی می‌شود (۳)، توجه زیادی

را در مقایسه با سایر مواد تولید شده جامد، به خود جلب کرده‌اند. با این حال، اکثر انواع پلاستیک غیر قابل تجزیه هستند و قرن‌ها طول می‌کشد تا در طبیعت، به صورت کامل، تجزیه شوند. در حال حاضر، پرمصرف‌ترین پلاستیک‌ها پلی‌اتیلن (PE)، پلی‌پروپیلن (PP)، پلی‌استایرن (PS)، پلی‌وینیل کلراید (PVC)، پلی‌اتیلن ترفتالات (PET) و پلی‌اورتان هستند (PU) (۴)، که به دو دسته پلیمرهای با ساختار C\C و پلیمرهای هترواتی تقسیم می‌شوند. پلیمرهای ساختار C\C، از جمله PE، PVC، PS و PP ۷۷ درصد از کل سهم بازار را تشکیل می‌دهند، در حالی که پلیمرهای هترواتی مانند PET و PU حدود ۱۸ درصد از بازار را تشکیل می‌دهند (۵). پلیمرهای با ساختار C\C در برابر هیدرولیز و تجزیه زیستی مقاوم بوده و حساس به اکسیداسیون حرارتی می‌باشند (۶)، درحالی‌که پلیمرهای هترواتی ممکن است از طریق اکسیداسیون نوری، هیدرولیز و بیولوژیکی تخریب شوند (۴). میکروپلاستیک‌ها (MPs^۱) با توجه به شیوع گسترده آن‌ها در تمام بخش‌های زیست محیطی، از جمله جو، زمین و آب، آلاینده‌های بالقوه نگران‌کننده‌ای هستند. آن‌ها به عنوان ذرات پلاستیکی با اندازه ۱ میکرومتر تا ۵ میلی‌متر تعریف شده‌اند و در انواع، اندازه، شکل و ترکیبات پلیمری اولیه و ثانویه مختلف ارائه می‌شوند. میکروپلاستیک‌ها به دلیل ماندگاری و خاصیت تجمع زیستی برای حیات وحش و انسان، مضر فرض می‌شوند. طبق گزارش سازمان ملل، تا سال ۲۰۲۰ سالانه بیش از ۴۰۰ میلیون تن ضایعات پلاستیکی تولید شده است، در حالی‌که پیش‌بینی می‌شود تولید

^۱ Microplastics

پلاستیک تا سال ۲۰۳۵ دو برابر شود و به ۸۰۰ میلیون تن و تا سال ۲۰۵۰ به ۱۶۰۰ تن برسد (۷). فرآیند تولید پلاستیک حجم عظیمی از مواد مضر، از جمله کربن مونوکسید، دیوکسین‌ها، اکسیدهای نیتروژن و سیانید هیدروژن را در هوا آزاد می‌کند، که تهدیدی جدی برای محیط زیست و سلامت انسان است. رویر و همکاران (۲۰۱۸) گزارش کردند که تولید پلی اتیلن با چگالی کم (LDPE^۲) با زمان انکوباسیون (۲۱۲ روز) تولید گازها را افزایش داده و به ۵/۸ نانومول متان در گرم در روز، ۱۴/۵ نانومول اتیلن در گرم در روز، ۳/۹ نانومول اتان در گرم در روز و ۹/۷ نانومول پروپیلن در گرم در روز رسانده است. همچنین، میزان انتشار گازها توسط LDPE هنگامی که در هوا، در مقایسه با آب انکوبه می‌شود، برای متان و اتیلن به ترتیب ۲ و ۷۶ برابر بیش‌تر است (۸). بنابراین این پلاستیک‌ها می‌توانند یک منبع ناشناخته مرتبط با تغییرات آب و هوایی باشند. گازهایی که انتظار می‌رود با تولید و انباشته شدن پلاستیک در محیط زیست، افزایش بیش‌تری یابد. در مورد دفع پلاستیک، ۶/۳ میلیارد تن از تولید جهانی پلاستیک از سال ۱۹۵۰ تا سال ۲۰۱۸ نهایتاً به تولید زباله ختم شده است و بیش از ۴ میلیارد تن فقط یک بار قبل از دفع، استفاده شده است (۹). علاوه بر این، حدود ۴/۵ میلیارد تن، از کل زباله‌های پلاستیکی به محل‌های دفن زباله ختم می‌شوند یا در محیط زیست رها می‌شوند که بر محتوای میکروبی خاک تأثیر منفی می‌گذارند (۱۰).

اولین پلیمر مصنوعی، باکلیت، در اوایل قرن بیستم تولید شد. تولید انبوه پلاستیک از دهه ۱۹۵۰ به بعد رونق گرفت و در طی آن دوره، خواص آنها به طور مداوم بهبود یافت. پرکاربردترین مواد پلیمری پلی اتیلن (PE)، پلی پروپیلن (PP)، پلی استایرن (PS)، پلی وینیل کلراید (PVC)، پلی اورتان (PUR)، پلی اتیلن ترفتالات (PET)، پلی بوتیلن ترفتالات (PBT) و نایلون‌ها می‌باشند (۱۱). در حال حاضر بیش از ۵۳۰۰ نوع پلاستیک با طیف وسیعی از افزودنی‌های شیمیایی از جمله نرم‌کننده‌ها، رنگدانه‌ها، تثبیت کننده‌ها، سورفکتانت‌ها و پرکننده‌های معدنی تولید می‌شوند (۱۲). پلاستیک‌ها کاربردهای گسترده‌ای در زمینه‌های صنایع غذایی و بسته‌بندی، داروسازی، کشاورزی، آرایشی و بهداشتی، مواد شوینده، مواد شیمیایی و غیره دارند. پلاستیک‌های مصنوعی جایگاه چشمگیری در زمینه بسته‌بندی به عنوان جایگزینی برای مواد بسته‌بندی مبتنی بر سلولز به خود اختصاص داده‌اند (۱۰).

^۲ Low density polyethylene,

جدول (۱): کاربرد اصلی انواع پلاستیک ها و درصد آن‌ها

نوع پلاستیک	کاربرد اصلی	درصد مورد استفاده (%)
پلی اتیلن (PE)	بطری‌های دارویی و فشاری، کیسه‌های زباله، صنعت اتصالات	۲۹/۸
پلی پروپیلن (PP)	بسته‌بندی مواد غذایی، لوله، قطعات خودرو، ظروف میکروویو	۱۹/۴
پلی اتیلن ترفتالات (PET)	بطری‌های آب معدنی، شیشه‌های سفت و سخت لوازم آرایشی، ظروف قابل استفاده در میکروویو، فیلم‌های شفاف، بسته‌بندی تاول‌های مواد غذایی	۷/۹
پلی وینیل کلراید (PVC)	کت‌های بارانی، پرده دوش، لوله‌کشی داخلی، لوازم الکترونیکی	۱۰/۰
پلی اورتان (PUT)	مبلان بستر فوم، عایق سقف و دیوار، پنجره‌ها، درها و درزگیرهای عایق هوا	۷/۹
پلی استایرن (PS)	جعبه‌های سی دی و دی وی دی، طیف وسیعی از کاربردهای پزشکی، سینی‌های کشت بافت، لوله‌های آزمایش، پتری دیش‌ها	۶/۲

روش جستجو

مطالعات متعددی در مورد تاریخچه تولید پلاستیک، روش‌های تولید و بررسی روشهای تجزیه پلاستیک-ها وجود دارد. در این مقاله ضمن معرفی انواع پلاستیک‌های موجود در بازار، محل مصرف و نحوه تجزیه و تخریب آن‌ها در بخش‌های مختلف آینده مورد بررسی قرار گرفته است.

مرور مطالعات

- آلودگی پلاستیک در بخش های مختلف محیط زیست

چگالی برخی از پلاستیک‌ها مانند ^۳HDPE، LDPE، ^۴PP کم‌تر از چگالی آب است، بنابراین بر روی نهرها و رودخانه‌های سراسر جهان شناور می‌شوند و به راحتی وارد اقیانوس‌ها و بدنه‌های آبی می‌شوند (۱۳). اقیانوس‌ها بحرانی‌ترین مناطق از لحاظ آلودگی تجمع پلاستیک‌ها به شمار می‌روند، زیرا می‌توانند پلاستیک‌ها را به مناطق دور منتقل کنند. اعتقاد بر این است که کاپیتان چارلز مور اولین کسی بود که یک چرخه پلاستیکی عظیم را در

اقیانوس آرام شمالی شناسایی کرد (۱۴). چهار چرخه پلاستیکی دیگر در سراسر جهان مورد بررسی قرار گرفته است از جمله چرخه اقیانوس اطلس شمالی، چرخه اقیانوس اطلس جنوبی، چرخه اقیانوس آرام جنوبی و چرخه هند. عوامل غیرزیستی مانند اشعه ماوراء بنفش، نیروهای فیزیکی و دما، پلاستیک‌ها را به قطعات ریز خرد می‌کنند که می‌توانند به راحتی در فواصل دورتر منتقل شوند (۱۵). قطعات پلاستیکی بزرگ می‌توانند موجوداتی مانند گونه‌های ماهی، لاک‌پشت‌ها و حتی پرندگان را به دام بیندازند و پلاستیک‌های متوسط و ریز، ممکن است توسط موجودات آبی مختلف بلعیده شوند که می‌توانند آن‌ها را خفه کنند یا وارد زنجیره غذایی شده و در نتیجه وارد بدن انسان شوند. برخی از نمونه‌برداری‌های پلانکتون در اقیانوس اطلس شمالی در دوره ۱۹۹۰-۱۹۶۰ نشان داد که بیش‌تر آن‌ها آلوده به پلاستیک بودند (۱۶). ایزوبه و همکاران (۲۰۱۹) با استفاده از یک مدل ردیابی عددی، فراوانی میکروپلاستیک‌های دریایی را در اقیانوس آرام پیش‌بینی کردند و دریافتند که در سال ۲۰۳۰، تا ۲ برابر و در سال ۲۰۶۰، تا ۴ برابر در مقایسه با سال

^۳ High Density Polyethylene

^۴ Poly Propylene

کشاورزی و لجن فاضلاب منابع اصلی آلودگی پلاستیک در خاک هستند (۲۴).

- تخریب فیزیکوشیمیایی پلاستیک

تخریب غیرزیستی پلاستیک به طور طبیعی مانند تخریب مکانیکی ناشی از نیروهای جزر و مد، امواج و سایش توسط سنگ‌ها اتفاق می‌افتد. این فرآیند تکه تکه شدن باعث تشکیل زباله‌های پلاستیکی می‌شود. به طور طبیعی، اکسیداسیون در اثر نور، فرآیند هیدرولیز و تخریب مکانیکی می‌تواند به راحتی منجر به تشکیل قطعات میکرو و نانو پلاستیک شود. با این حال، در طول قطعه قطعه شدن شیمیایی، وزن ملکولی پلیمر کاهش می‌یابد. در مقایسه با آن در قطعه قطعه شدن مکانیکی، هیچ تغییری در وزن ملکولی وجود ندارد. این فرآیند توسط بسیاری از عوامل، از جمله طول زنجیره پلیمری، نیروهای درون مولکولی بین زنجیره‌های پلیمری، پایداری مکانیکی، بلورینگی پلیمر و وزن پلاستیک کنترل می‌شود.

- تخریب نوری

تخریب نوری به عنوان مهم‌ترین تخریب غیرزیستی در محیط‌های هوایی در فضای باز در نظر گرفته می‌شود (۲۵). فتو اکسیداسیون باعث اکسیژن رسانی سطحی پلاستیک می‌شود که در اثر آن آب دوستی سطح پلیمر و تشکیل بیوفیلم میکروبی روی سطح پلیمری افزایش می‌یابد. همانطور که در شکل ۵ نشان داده شده است، PE، PP و PS به تخریب اکسیداتیو حساس هستند. مکانیسم تخریب نوری پلاستیک شامل سه مرحله اصلی، یعنی شروع، انتشار و خاتمه است. در مرحله شروع، زنجیره پلیمری پیوندهای شیمیایی در اثر نور یا گرما برای تولید رادیکال‌های آزاد شکسته می‌شوند (۲۶). پلیمرها باید

۲۰۱۶ در دریا‌های آسیای شرقی و مرکز و شرق اقیانوس آرام شمالی میکروپلاستیک‌ها می‌توانند به عنوان ناقلی برای انتقال عناصر کمیاب خطرناک (به عنوان مثال، فلزات سنگین) عمل کنند (۱۷) که با بلعیده شدن، به بدن موجودات آبی راه پیدا می‌کنند (۱۸ و ۱۹). خاک بستر اصلی برای رشد غذا در سراسر جهان است. تنوع زیستی را حفظ می‌کند و بیوژنوشیمی را تنظیم می‌کند (۲۰ و ۲۱). افزایش روزافزون جمعیت جهان، کشاورزی پایدار را به یک ضرورت تبدیل کرده است و نقش خاک جدایی ناپذیر است. با این حال، فعالیت‌های انسانی مانند رهاسازی پلاستیک در طبیعت باعث تخریب خاک شده است. تأثیر میکروپلاستیک‌ها بر موجودات آبی تاکنون به طور گسترده مورد مطالعه قرار گرفته است. با این حال، این نوع مطالعات به ندرت برای ارگانسیم‌های خاک انجام شده است، زیرا به طور کلی در نظر گرفته می‌شود که تأثیر میکروپلاستیک‌ها در اکوسیستم آبی حیاتی‌تر است (۲۲). از این نظر، گیلور و همکاران (۲۰۱۳) آزمایشی را بر روی گونه‌ای از کرم خاکی برای ارزیابی تأثیر میکروپلاستیک‌ها بر موجودات خاک انجام دادند. آن‌ها دریافتند که قطعات میکروپلی‌برومودی‌فنیل اتر (PBDE) حاوی فوم پلی اورتان (PUF) در داخل بدن کرم خاکی مورد مطالعه، انباشته شده است. بنابراین، آن مطالعه نشان داد که میکروپلاستیک‌ها می‌توانند در موجودات خاکری، انباشته شوند و سپس به موجودات دیگر منتقل شوند و در نتیجه می‌توانند برای محیط‌های خشکی در مقیاس مشابه نسبت به محیط‌های آبی خطرناک باشند (۲۳). دفع زباله، مالچ‌های پلاستیکی

حاوی گروه‌های کروموفوریک غیراشباع باشند تا بتوانند انرژی نور را جذب کنند (۲۵-۴). در صورتیکه استفاده از چندین نوع پلاستیک مانند PE و PP، که هیچگونه پیوند دوگانه غیر اشباع در ساختار پلیمری خود ندارند نیز بسیار متداول است و انتظار می‌رود که این ترکیبات در برابر تخریب نوری مقاوم باشند. با این حال، مقادیر کمی از ناخالصی‌های خارجی یا ناهنجاری‌های ساختاری می‌توانند به مرحله شروع تخریب نوری کمک کنند (۲۷-۲۵). متعاقباً، در مرحله انتشار، رادیکال‌های پلیمری با اکسیژن واکنش می‌دهند و رادیکال‌های پراکسی تشکیل می‌دهند. علاوه بر تشکیل هیدروپراکسیدها، بیش‌تر واکنش‌های رادیکال پیچیده‌ای رخ می‌دهد و منجر به خود اکسیداسیون می‌شود (۲۸). انتشار در نهایت منجر به بریدگی زنجیره یا اتصال عرضی می‌شود (۲۹). خاتمه واکنش رادیکالی زمانی اتفاق می‌افتد که محصولات بی‌اثر از ترکیب دو رادیکال تشکیل شود (۳۰). بنابراین، به دلیل اکسیداسیون، بریدگی تصادفی زنجیره برای تولید گروه‌های عملکردی حاوی اکسیژن انجام می‌شود. مانند ترکیبات الفین، کتون و آلدهید (۲۷). به واسطه وجود پیوندهای دوگانه غیراشباع، این ترکیبات بیش‌تر مستعد تخریب در نظر گرفته می‌شوند. این فرآیند منجر به کاهش وزن ملکولی پلاستیک می‌شود. در ترکیبات تولید شده مساحت سطح افزایش یافته و آن‌ها را بیش‌تر در معرض تکه تکه شدن قرار می‌دهد. آلبرتسون و کارلسون (۱۹۸۸) در مورد تخریب پلی اتیلن در یک سیستم بی اثر برای بیش از ۱۰ سال تحقیق کردند. نتایج نشان داد که میزان تخریب پلی اتیلن توسط سه مرحله، از جمله انتشار سریع CO₂

و جذب O₂ در طول مرحله اول تا مرحله تعادل، کاهش نرخ تخریب در مرحله دوم و در نهایت، زوال سریع ساختار سطح و افزایش نرخ تخریب در مرحله ۳ مشخص می‌شود (۳۱).

- هیدرولیز

هیدرولیز پلاستیک یکی از مراحل اصلی در تخریب غیر زیستی است. مسیر تخریب هیدرولیز با حضور کاتالیزورهایی مانند یون‌های آزاد شده از طریق این واکنش تسریع می‌شود (۳۲). سرعت هیدرولیز به حساسیت پیوندهای شیمیایی پلیمری در برابر حمله آب و غلظت آن در داخل ماده بستگی دارد. همچنین، سرعت انتشار آب در مواد پلیمری یک عامل حیاتی است (۳۴ و ۳۳). در طول هیدرولیز، آب با پلیمر واکنش می‌دهد و باعث تغییرات فیزیکوشیمیایی می‌گردد و این فرآیند از نظر شیمیایی یا بیولوژیکی کاتالیز می‌شود. در واکنش‌های کاتالیز شده اسید-باز، مکانیسم شامل یک حمله هسته دوست به گروه کربونیل در پیوندهای استری یا آمیدی است (۳۵). همچنین، عوامل متعددی بر سرعت هیدرولیز تأثیر می‌گذارند، از جمله مولکول‌های پلیمری، که در آن سرعت هیدرولیز با افزایش وزن مولکولی کاهش می‌یابد. به همین ترتیب، سرعت واکنش تحت تأثیر تحرک مولکول‌ها و آبگریزی یا آب دوستی قرار می‌گیرد (۳۶). علاوه بر این، بر اساس قانون تجربی (قانون شش نیومن)، سرعت هیدرولیز به ترکیب استریوشیمیایی زنجیره بستگی دارد، جایی که اتم‌های هیدروژن، اکسیژن و کربن به طور فضایی با چرخش گروه‌های دیگر تداخل می‌کنند که تعداد را محدود می‌کند. ترکیباتی که امکان حمله توسط یون‌های OH یا H را فراهم

می‌کند. پلی استرها (PES) به ویژه با تعداد زیادی اتم در جایگاه ششم پایدار هستند (۳۷).

- تخریب حرارتی

تخریب حرارتی پلاستیک را می‌توان در دماهای بالا، معمولاً بالاتر از ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد بسته به نوع و خصوصیات پلیمر پلاستیکی انجام داد. افزودنی‌های آنتی اکسیدانی در حین ساخت پلاستیک گنجانده شده است که از اکسیداسیون حرارتی در دماهای پایین جلوگیری می‌کند. در مقابل، تخریب ناشی از اکسیداسیون حرارتی در اثر استرس و قرار گرفتن در معرض سایر ترکیبات واکنشی مانند ازن تسریع می‌شود. به طور کلی، مقاومت در برابر تخریب، به ترکیب شیمیایی پلیمر، بستگی دارد. به عنوان مثال PP، PVC و پلی بوتادین (PBD) مستعد تخریب حرارتی و در مقابل پلیمرهایی مانند پلی سولفون، پلی اترکتون و پلی سیلوکسان‌ها به دلیل وجود پیوندهای قوی در ساختار آن‌ها از نظر حرارتی مقاوم هستند. به طور کلی، سهم تخریب حرارتی در شرایط عادی محیطی در سطح جهانی است، به ویژه در محیط‌های سرد و دریایی قابل اغماض است (۴۰-۳۸). فرآیند تجزیه زیستی به تبدیل ترکیبات آلی به بیوگاز و زیست توده باقیمانده، در نتیجه فعالیت میکروبی اشاره دارد (۴۳-۴۱) که می‌تواند از پلاستیک به عنوان منبع کربن استفاده کنند (۴۵ و ۴۴).

پلاستیک‌های مصنوعی، از جمله PES، پلی وینیل، پلی آمید (PA) و PU، بیش‌ترین کاربرد در سراسر جهان را نشان می‌دهند. با این حال، تنها کسر کوچکی از ضایعات آن‌ها به دلیل ماهیت پلاستیکی و خواص فیزیکوشیمیایی آن می‌تواند تجزیه زیستی شود، زیرا پلاستیک یک بستر رشد ضعیف برای

میکروارگانیسم‌ها است (۴۶). تجزیه آنزیمی پلاستیک از طریق هیدرولیز می‌تواند با اتصال آنزیم به پلیمر برای کاتالیز کردن و شکستن هیدرولیتیکی پلیمرها به الیگومرها، دیمرها و مونومرها و در نهایت تبدیل کردن آن به CO_2 و H_2O انجام شود. توانایی قارچ-ها، باکتری‌ها و جلبک‌ها به عنوان میکروارگانیسم‌های تجزیه‌کننده پلیمر قبلاً شناخته شده‌اند و چندین مورد گزارش شده‌اند که بر پلیمرهای به راحتی تجزیه پذیر، مانند سلولز و لیگنین (۴۷) یا مقاوم در برابر تخریب مانند پلیمرهای PE و PU رشد می‌کنند. هر نوع تغییر در خصوصیات شیمیایی یا فیزیکی ناشی از عوامل محیطی مانند گرما، نور و رطوبت یا فعالیت بیولوژیکی ممکن است به عنوان تخریب پلاستیک تعریف شود (۴۸). پلاستیک ممکن است با استفاده از یکی از سه روش موجود، تخریب حرارتی اکسیداتیو، تجزیه نوری و تجزیه زیستی تخریب شود (۴۹-۴۴) تجزیه زیستی پلاستیک به خواص فیزیکی پلاستیک و شرایط مواجهه مانند شرایط زیستی و غیر زیستی بستگی دارد. میکروارگانیسم‌ها مانند جلبک-ها، قارچ‌ها و باکتری‌ها ممکن است از طریق فرآیند متابولیک آن‌ها، که عموماً زوال زیستی نامیده می‌شود، بسترهای پلیمری را خراب کنند، بدون اینکه از هر گونه انرژی گرمایی در شرایط بی‌هوای و هوای، استفاده کنند (۵۰).

- میکروارگانیسم‌های تجزیه کننده پلاستیک

- باکتری‌ها

باکتری‌های خاک در پاکسازی زیستی آلاینده‌ها کارآمد هستند زیرا با شرایط محیطی متغیر مانند دما، رطوبت، pH و غیره مواجه می‌شوند. سودوموناس رایج‌ترین جنس باکتری است که قادر به تجزیه طیف

گسترده‌ای از آلاینده‌هاست (۵۱). ویگنسواری و همکاران (۲۰۱۵) Acidovorax، یک جنس باکتریایی، که قادر به تجزیه پلی هیدروکسی آلکانوات‌ها (PHAs) از نمونه‌های خاک و آب از سایت‌های مختلف مالزی جدا کردند. آن‌ها اشاره کردند که این باکتری، PHAها را از طریق ترشح آنزیم‌های دپلیمرز تجزیه می‌کند (۵۲). جالب‌تر اینکه اوچیدا و همکاران (۲۰۰۰) یک سویه جدید را یافتند که قادر به تجزیه PBSA متعلق به جنس اسیدووراکس است. با استفاده از مطالعات تاکسونومیکی آن‌ها پیشنهاد کردند که سویه ممکن است متعلق به گونه Acidovorax delafieldii باشد. آن‌ها همچنین دریافتند که تولید آنزیم لیپاز، که مربوط به تجزیه زیستی PBSA است، به طور چشمگیری در حضور PBSA القا شد و پیشنهاد کردند که این آنزیم ممکن است به طور خاص برای تجزیه PBSA تکامل یابد (۵۳). باکتری Ideonella sakaiensis، یک سویه باکتری گرم منفی و هوازی، جدا شده از یک کنسرسيوم تجزیه‌کننده PET، کارآمدترین میکروارگانیسم تجزیه‌کننده PET است که تا به امروز کشف شده است (۱۱و۵۴). این سویه شباهت ۹۷/۷ درصدی با I.dechloratans و ۹۶/۶ درصد شباهت با I.azotifigens دارد (۵۵)، اما توانایی تجزیه PET سویه‌های فوق‌الذکر گزارش نشده است.

- قارچ‌ها

استفاده از قارچ‌ها برای از بین بردن آلاینده‌ها به عنوان mycoremediation شناخته می‌شود. قارچ‌ها گروه بزرگی از میکروارگانیسم‌ها هستند که توانایی پاکسازی زیستی آلاینده‌های مختلف را دارند،

بنابراین تحقیق در مورد آن‌ها از نظر قابلیت تخریب پلاستیک می‌تواند امیدوارکننده باشد. بیش‌تر آنزیم‌هایی که بر روی پلاستیک‌ها اثر می‌کنند درون سلولی هستند و نیاز به بسترهای مشترک دارند. از آنجاییکه پلیمرهای با وزن مولکولی بالا نمی‌توانند به درون سلول‌ها نفوذ کنند، بنابراین آنزیم‌های داخل سلولی نمی‌توانند آن‌ها را تجزیه کنند. آنزیم‌های تجزیه‌کننده لیگنین خارج سلولی ترشح شده توسط قارچ‌های پوسیدگی سفید، می‌توانند در تخریب پلاستیک‌ها موثر باشند. فردریش و همکاران (۲۰۰۷) توانایی Bjerkandera adusta، یک قارچ پوسیدگی سفید را برای تخریب نایلون-۶ (پلی کاپرولاکتام) گزارش کردند (۵۶). همچنین توانایی تخریب پلاستیک برای قارچ‌های پوسیدگی قهوه‌ای گزارش شده است. بنابراین، یک فرآیند خارج سلولی هیدروکینون در یک قارچ پوسیدگی قهوه‌ای (به عنوان مثال Gloeophyllum trabeum) ۵۰ درصد پلی استایرن سولفونات (PSS) را که یک پلیمر مصنوعی مقاوم است، را در مدت زمان ۲۰ روز، تجزیه می‌کند (۵۷).

- سایر میکروارگانیسم‌ها

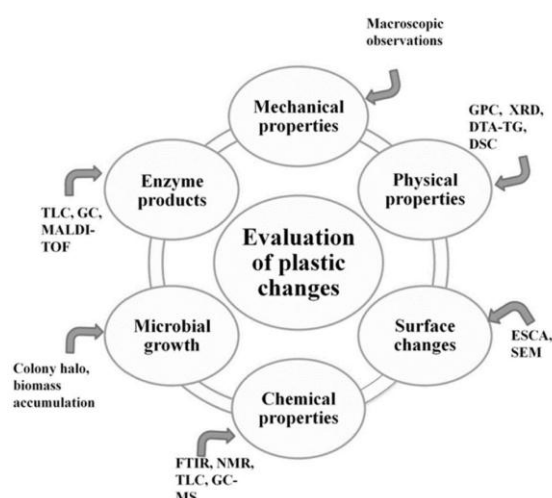
ریز جلبک‌ها میکروارگانیسم‌هایی با رشد سریع و کارآمد در فتوسنتز هستند که توانایی آن‌ها در تصفیه زیستی فلزات سنگین و کاهش گازهای گلخانه‌ای به طور گسترده مورد مطالعه قرار گرفته است (۵۸و۵۹). رشد تصاعدی آن‌ها باعث می‌شود که زیست‌پالایی‌کننده‌های قوی CO₂ و برخی از ترکیبات سمی مانند نیترات و فسفات که برای رشد آن‌ها ضروری هستند، شوند (۶۰). علاوه بر این، آن‌ها کارخانه برخی از ترکیبات ارزشمند مانند لیپیدها و پروتئین‌ها هستند که می‌توانند در تولید بیودیزل و

ژنتیک کردند تا آنزیم‌های PETase را با فعالیت علیه PET تولید کنند (۶۴-۶۳).

- روش‌های سنجش استاندارد

روش‌های آزمایشی رایج برای تشخیص فعالیت میکروبی عبارتند از (شکل ۱):

- ۱- ارزیابی تغییرات قابل مشاهده در پلاستیک مانند ظاهر سوراخ‌ها یا ترک‌ها، تغییر در نمای سطح یا رنگ یا تشکیل بیوفیلم. میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM) تصاویر خوبی را برای مشاهدات پیچیده‌تر نشان می‌دهند.
- ۲- ثبت تغییرات در خواص فیزیکی پلیمر، مانند کاهش جرم و استحکام کششی و خواص شیمیایی، مانند وزن مولکولی. ۳- اندازه‌گیری میزان مصرف دی اکسید کربن و اکسیژن مصرفی.
- ۴- ارزیابی رشد توسط اندازه‌گیری زیست توده انباشته شده، معمولاً در محیط کشت حداقلی با یک پلیمر به عنوان تنها منبع کربن، تشکیل یک هاله شفاف در اطراف کلونی‌های باکتری که پلیمر را پلیمرزدایی می‌کند.
- ۵- سنجش آنزیمی برای تشخیص و شناسایی محصولات دپلیمریزه شده.



شکل شماره (۱): تشکیل بیوفیلم بر روی سطح پلاستیک

پزشکی استفاده شوند (۶۰). با این حال، مطالعات کمی در مورد تخریب میکروجلبکی پلاستیک‌ها وجود دارد. کومار و همکاران (۲۰۱۶) توانایی تعداد معینی از ریزجلبک‌ها (به عنوان مثال *Scenedesmus dimorphus* و *Anabaena spiroide* و *Navicula pupula*) در تخریب PET با چگالی کم و بالا را بررسی کردند. آن‌ها توانایی تخریب *A. spiroide* را برای تخریب PET با چگالی کم (تا ۸/۱۸ درصد پس از یک هفته انکوباسیون) نشان دادند (۶۱). در مطالعه دیگری، ایچ و همکاران (۲۰۱۵) شکل‌گیری اولیه بیوفیلم‌ها و تنوع و فراوانی دیاتومه‌ها را بر روی کیسه‌های پلاستیکی خرید زیست تخریب‌پذیر و پلی‌اتیلن جمع‌آوری شده از دریای مدیترانه را بررسی کردند. آن‌ها نمونه‌های پلاستیکی زیست تخریب‌پذیر و پلی‌اتیلن را به مدت ۱۵ و ۳۳ روز در ۲ زیستگاه مختلف (یعنی اعماق دریا و پلاژیک کم عمق) زیر نظر گرفتند. آن‌ها دریافتند که شکل‌گیری بیوفیلم‌ها و فراوانی و تنوع دیاتومه‌ها در سطح پلاستیک بسته به نوع پلاستیک و زیستگاه متفاوت است. پلاستیک‌های جمع‌آوری شده از زیستگاه پلاژیک در دیاتومه‌ها فراوانی بیشتری نشان داد. علاوه بر این، تجزیه و تحلیل SEM، تجزیه زیستی پلاستیک‌های زیست تخریب‌پذیر جمع‌آوری شده از هر دو منطقه را ثابت کرد (۶۲). مهندسی ژنتیک جلبک‌ها و ریزجلبک‌ها نیز در سال‌های اخیر، آن‌ها را به کارخانه‌های پلیمرهای مصنوعی تجزیه‌کننده آنزیم تبدیل کرده است. برای مثال، موگ و همکاران (۲۰۱۹) و کیم و همکاران (۲۰۲۰) ریزجلبک‌های *Phaeodactylum tricornutum* و *Chlamydomonas reinhardtii* را به ترتیب مهندسی

غیرزیستی مهم هستند (۶۸). در حالی که ماهیت ارگانسیم‌های کلونی به وضوح تعیین کننده است.

نتیجه‌گیری

این بررسی با هدف ارائه یک نمای کلی از مطالعات متمرکز بر پیامدهای منفی تجمع پلاستیک و اثرات فرآیندهای تخریب پلیمرها در خاک و سایر محیط‌های زیستی نوشته شده است. گرچه پلاستیک در حال حاضر یک ماده مهم در محیط زیست جهانی است، اما در حال تبدیل شدن به یک تهدید بزرگ برای طبیعت است، زیرا تولید جهانی پلاستیک در حال افزایش است. پلاستیک‌ها به سرعت (سالانه ۳۰۰ میلیون تن) وارد محیط می‌شوند و سرعت تخریب طبیعی بسیار پایینی دارند، در محیط‌های طبیعی انباشته شده و آسیب قابل توجهی به تنوع زیستی و اکوسیستم‌های طبیعی وارد می‌کنند. بررسی رفتار فرسایش پلیمرها، مخلوط‌ها، کامپوزیت‌ها و سایر انواع پلاستیک‌ها در شرایط مختلف محیطی یک موضوع اولویت‌دار برای ارزیابی کاربردهای احتمالی و تعیین طول عمر آنهاست. در کشاورزی، اقلام پلاستیکی (فیلم‌های مالچ، لوله‌های آبیاری و غیره) به طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرند و در معرض اشعه ماوراء بنفش خورشیدی قرار می‌گیرند که می‌تواند باعث ایجاد اکسیداسیون نوری در زنجیره‌های ماکرومولکولی شود. بنابراین، هوازدهی در شرایط بیرونی و آزمایش‌های تخریب تسریع شده برای شبیه‌سازی فرآیندهای فرسایش مواد انجام می‌شود و تثبیت‌کننده‌های مناسب برای استفاده انتخاب می‌شوند. نقش زباله‌های پلاستیکی به عنوان یک بردار و یا حامل برای حمل مواد شیمیایی در محیط خاک نیز مهم هستند و تحقیقات بیشتری در

ایده‌های فعلی تجزیه زیستی پلاستیک توسط دو مدل از مطالعات پشتیبانی می‌شود: اولاً تجزیه و تحلیل فرآیندهایی که در اکوسیستم‌های طبیعی اتفاق می‌افتد و ثانیاً روش‌های آزمایشگاهی با هدف جستجوی میکروارگانسیم‌هایی که می‌توانند در عمل در مبارزه با آلودگی پلاستیکی استفاده شوند. در محیط‌های طبیعی یک پیش شرط تعیین‌کننده برای تجزیه زیستی، برقراری تماس فیزیکی نزدیک بین پلاستیک و میکروارگانسیم‌هاست، به طوری‌که اگر و آنزیم‌های فعال پلاستیکی آزاد شده بتوانند با موفقیت راهی به سابس‌تریت، پیدا کنند. بیوفیلم‌ها ساختارهای بیولوژیکی مرتبطی هستند که برای چنین هدفی مناسبند (۶۵). بیوفیلم‌ها کنسرسیومی از میکروارگانسیم‌های متصل به و/یا تعبیه شده در یک ماتریکس پلیمری خارج سلولی هستند. در سیستم‌های طبیعی، باکتری‌ها به عنوان کلونی اولیه عمل می‌کنند که ممکن است ارگانسیم‌های دیگری مانند قارچ‌ها، دیاتومه‌ها و غیره را بیشتر به دام ببنداند (۶۶). نتیجه این است که جامعه بیوفیلم به طور قابل توجهی با میکروارگانسیم‌های موجود در حالت زندگی آزاد در محیط اطراف متفاوت است (۶۷). هنگامی که بیوفیلم شامل موجوداتی با پتانسیل تجزیه پلاستیک می‌شود، مجاورت فضایی سلول‌های میکروبی بی‌تحرك و انتشار کم درشت مولکول‌ها، از جمله آنزیم‌های خارج سلولی، از طریق ماتریکس بیوفیلم، عواملی هستند که به تخریب زیستی کمک می‌کنند. با این همه، کلونی مسطح به خودی خود کافی نیست و برای ادامه تخریب پلاستیک، نوع پلاستیک و شرایط فیزیکوشیمیایی هر دو عامل

- [6] Krueger, M.C., Harms, H., Schlosser, D., 2015, Prospects for microbiological solutions to environmental pollution with plastics. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 99, 8857–8874. <https://doi.org/10.1007/s00253-015-6879-4>.
- [7] Barra, R., Leonard, S. A., 2018, Plastics and the circular economy. 54th Global Environment Facility Council Meeting, Da Nang, Vietnam. June 24–26.
- [8] Royer, S.J., Ferrón, S., Wilson, S.T., Karl, D.M., 2018, Production of methane and ethylene from plastic in the environment. *PLoS One*, 13(8): e0200574. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0200574>.
- [9] Geyer, R., Jambeck, J.R., Law, K.L., 2017, Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances*, 3(7): e1700782. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782>.
- [10] Lebreton, L., Andrady, A., 2019, Future scenarios of global plastic waste generation and disposal. *Palgrave Commun.* 5-6.
- [11] Yoshida, S., Hiraga, K., Takehana, T., Taniguchi, I., Yamaji, H., Maeda, Y., et al., 2016, K. A. bacterium that degrades and assimilates poly ethylene terephthalate. *Science*, 351, 1196–1199.
- [12] Lambert, S., Wagner, M., 2018, Microplastics Are Contaminants of Emerging Concern in Freshwater Environments: An Overview; Springer. Science and Business Media LLC: Berlin/Heidelberg, Germany, 1–23.
- [13] Albertsson, A., Bødtker, G., Boldizar, A., Filatova, T., Prieto, J.M., Loos, K., et al. 2020, Biodegradability of plastics in the open environment. In: Evidence Review Report 8. Science Advice for Policy by European Academies (SAPEA), Brussels. <https://doi.org/10.26356/biodegradabilityplastics>.
- [14] Moore, C., Phillips, C., 2012, Plastic Ocean: How a Sea Captain's Chance Discovery Launched a Determined Quest to Save the Oceans, ISBN 1583334246. Avery.
- [15] Westphalen, H., Abdelrasoul, A., 2018, Challenges and treatment of microplastics in water, water challenges of an urbanizing world. In: Glavan, M, editor. Water Challenge of an Urbanizing World. IntechOpen, 72–83.
- [16] Moore, C.J., 2008, Synthetic polymers in the marine environment: a rapidly increasing,

این زمینه لازم است. دیگر نمی‌توان از افزایش حجم زباله‌های پلاستیکی در محیط زیست و تهدید آن‌ها برای اکوسیستم‌ها و سلامت انسان چشم‌پوشی کرد. بنابراین زمان آن فرا رسیده است که به آلودگی پلاستیک در محیط خاک به عنوان یک موضوع جدی توجه شود. برای این منظور، یافته‌های مطالعات قبلی در مورد آلودگی پلاستیک در محیط‌های دریایی و آب شیرین می‌تواند در تحقیقات آتی به کار رود.

منابع

- [1] Jenkins, S., Quer, A.M.I., Fonseca, C., Varrone, C., 2020, Microbial degradation of plastics: new plastic degraders, mixed cultures and engineering strategies. In: Jamil, N. Kumar, P. Batool, R. editors. Soil microenvironment for bioremediation and polymer production. Scrivener Publishing LLC. 213–238. <https://doi.org/10.1002/9781119592129.ch12>.
- [2] Amobonye, A., Bhagwat, P., Singh, S., Pillai, S., 2021, Plastic biodegradation: frontline microbes and their enzymes. *Science of the Total Environment*. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143536>.
- [3] Rivard, C., Moens, L., Roberts, K., Brigham, J., Kelley, S., 1995, Starch esters as biodegradable plastics: effects of ester group chain length and degree of substitution on anaerobic biodegradation. *Enzyme and Microbial Technology*. 17, 848–852. [https://doi.org/10.1016/0141-0229\(94\)00120-G](https://doi.org/10.1016/0141-0229(94)00120-G).
- [4] Gewert, B., Plassmann, M.M., MacLeod, M., 2015, Pathways for degradation of plastic polymers floating in the marine environment. *Environmental Science, Processes & Impacts*. 17, 1513. <https://doi.org/10.1039/C5EM00207A>.
- [5] Danso, D., Chow, J., Streit, W.R., 2019, Plastics: environmental and biotechnological perspectives on microbial degradation. *Applied and Environmental Microbiology Journal*, 85(19), e01095-19. <https://doi.org/10.1128/AEM.01095-19>.

- [26] Yousif, E., Haddad, R., 2013, Photodegradation and photostabilization of polymers, especially polystyrene: review. SpringerPlus, 2, 398. <https://doi.org/10.1186/2193-1801-2-398>.
- [27] Scott, G., 2002, Degradable Polymers Principles and Applications. Springer, Netherlands, Dordrecht.
- [28] Singh, B., Sharma, N., 2008, Mechanistic implications of plastic degradation. Polymer Degradation and Stability, 93, 561–584. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2007.11.008>.
- [29] Tolinski, M., 2009, Additives for Polyolefins Getting the Most out of Polypropylene, Polyethylene and TPO. William Andrew Pub., Oxford.
- [30] Peacock, A.J., 2000, Handbook of Polyethylene: Structures, Properties and Applications. Marcel Dekker, New York.
- [31] Albertsson, A.C., Karlsson, S., 1988, The three stages in degradation of polymers—polyethylene as a model substance. Journal of Applied Polymer Science, 35(5), 1289–1302. <https://doi.org/10.1002/app.1988.070350515>.
- [32] Baes, C., Mesmer, R., 1976, The Hydrolysis of Cations. Wiley, New York.
- [33] Crawford, D.M., Teets, A.R., 1988, Flanagan D. Differential scanning calorimetry as a method for indicating hydrolysis of urethane elastomers. Technical Report. US Army, Belvoir Research, Fort Belvoir, Virginia 2463.
- [34] Padsalgikar, A.D., 2017, Biological properties of plastics. Plastics in Medical Devices for Cardiovascular Applications, 83–102. <https://doi.org/10.1016/b978-0-323-35885-9.00004-7>.
- [35] Hosseini, S.S., Taheri, S., Zadhoush, A., Mehrabani-Zeinabad, A., 2007, Hydrolytic degradation of poly ethylene terephthalate. Journal of Applied Polymer Science, 103(4), 2304–2309. [https://doi.org/10.1016/0014-3057\(91\)90237-I](https://doi.org/10.1016/0014-3057(91)90237-I).
- [36] Booth, A.M., Kubowicz, S., Beegle-Krause, C., Skancke, J., Nordam, T., Landsem, E., et al., 2017, Microplastic in Global and Norwegian Marine Environ-ments: Distributions, Degradation Mechanisms and Transport. Norwegian Environment Agency, M-918. Available at <https://www>.
- long-term threat. Environmental Research, 108, 131–139.
- [17] Isobe, A., Iwasaki, S., Uchida, K., Tokai, T., 2019, Abundance of non-conservative microplastics in the upper ocean from 1957 to 2066. Nature Communications, 10, 1–13. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-08316-9>.
- [18] Selvam, S., Manisha, A. Roy, P.D. Venkatramanan, S. Chung, S.Y. Muthukumar, P. et al., 2019, Microplastics and trace metals in fish species of the Gulf of Mannar (Indian Ocean) and evaluation of human health. Environmental Pollution, 291, 118089. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.118089>.
- [19] Selvam, S., Jesuraja, K., Venkatramanan, S., Roy, P.D., Kumari, V.J., 2021b, Hazardous microplastic characteristics and its role as a vector of heavy metal in groundwater and surface water of coastal south India. The Journal of Hazardous Materials, 402. 123786. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123786>
- [20] Banwart, S., 2011, Save our soils. Nature, 474-151. <https://doi.org/10.1038/474151a>.
- [21] Abhilash, P.C., Powell, J.R., Singh, H.B., Singh, B.K., 2012, Plant-microbe interactions: novel applications for exploitation in multipurpose remediation technologies. Trends in Biotechnology, 30, 416–420.
- [22] Nizzetto, L., Futter, M., Langaas, S., 2016, Are agricultural soils dumps for microplastics of urban origin? Environmental Science & Technology, 50, 10777–10779.
- [23] Gaylor, M.O., Harvey, E., Hale, R.C., 2013, Polybrominated diphenyl ether (PBDE) accumulation by earthworms (*Eisenia foetida*) exposed to biosolids-, polyurethane foam microparticle-, and Penta-BDE-amended soils. Environmental Science & Technology, 47, 13831–13839.
- [24] Chae, Y., An, Y.J., 2018, Current research trends on plastic pollution and ecological impacts on the soil ecosystem: a review. Environmental Pollution, 240, 387–395.
- [25] Gijsman, P., Meijers, G., Vitarelli, G. (1999). Comparison of the UV-degradation chemistry of polypropylene, polyethylene, polyamide 6 and polybutylene terephthalate. Polymer Degradation and Stability, 65, 433–441. [https://doi.org/10.1016/S0141-3910\(99\)00033-6](https://doi.org/10.1016/S0141-3910(99)00033-6).

- <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2007.12.005>.
- [45] Magnin, A., Pollet, E., Phalip, V., Avérous, L., 2020, Evaluation of biological degradation of polyurethanes. *Biotechnology Advances*, 39, 107457. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2019.107457>.
- [46] Biffinger, J.C., Barlow, D.E., Pirlo, R.K., Babson, D.M., Fitzgerald, L.A., Zingarelli, S., et al. 2014, A direct quantitative agar-plate based assay for analysis of *Pseudomonas protegens* Pf-5 degradation of polyurethane films. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 95, 311–319. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2014.09.005>.
- [47] Ali, S.S., Sun, J., 2015, Physico-chemical pretreatment and fungal biotreatment for park wastes and cattle dung for biogas production. *SpringerPlus*, 4, 712. <https://doi.org/10.1186/s40064-015-1466-9>.
- [48] Venkatesh, S., Mahboob, S., Govindarajan, M., Al-Ghanim, K.A., Ahmed, Z., Al-Mulhm, N., 2021, Microbial degradation of plastics: sustainable approach to tackling environmental threats facing big cities of the future. *Journal of King Saud University – Science*, 33, 101362.
- [49] Thakur, S., Chaudhary, J., Sharma, B., Verma, A., Tamulevicius, S., Thakur, V.K., 2018, Sustainability of bioplastics: opportunities and challenges. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry, Reuse and Recycling / UN SGDs: How can Sustainable Chemistry Contribute? / Green Chemistry in Education*. 13. 68–75. <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2018.04.013>.
- [50] Rutkowska, M., Heimowska, A., Krasowska, K., Janik, H., 2002, Biodegradability of polyethylene starch blends in sea water. *Polish Journal of Environmental Studies*, 11, 267–272.
- [51] Malla, M.A., Dubey, A., Yada, S., Kumar, A., Hashem, A., Abd_Allah, E.F. 2018, Understanding and designing the strategies for the microbe-mediated remediation of environmental contaminants using omics approaches. *Frontiers in Microbiology*, 9, 1132. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.01132>.
- [52] Vigneswari, S., Lee, T.S., Bhubalan, K., Amirul, A.A., 2015, Extracellular Polyhydroxyalkanoate Depolymerase by *Miljodirektoratet.no/globalassets/publikasjoner/M918/M918.pdf*.
- [37] Lopalco, A., Douglas, J., Denora, N., Stella, V.J., 2016, Determination of pKa and hydration constants for a series of α -keto-carboxylic acids using nuclear magnetic resonance spectrometry. *Journal of Pharmaceutical Sciences*, 105(2), 664–672. <https://doi.org/10.1002/jps.24539>.
- [38] Kitamoto, H.K., Shinozaki, Y., Cao, X., Morita, T., Konishi, M., Tago, K., et al. 2011, Phyllosphere yeasts rapidly break down biodegradable plastics. *AMB Express*, 1(1), 44. <https://doi.org/10.1186/2191-0855-1-44>.
- [39] Booth, A.M., Hansen, B.H., Frenzel, M., Johnsen, H., Altin D., 2016, Uptake and Toxicity of Methylmethacrylate-Based Nanoplastic Particles in Aquatic Organisms. In *Fate and Impact of Microplastics in Marine Ecosystems*, Elsevier. 70-71.
- [40] Van Krevelen, D.W., Te Nijenhuis, K., 2009, Chemical degradation. *Properties of Polymers*, Elsevier B.V. 779–786. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-054819-7.00022-4>.
- [41] Ali, S.S., Sun, J., 2019, Effective thermal pretreatment of water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) for the enhancement of biomethanation: VIT® gene probe technology for microbial community analysis with special reference to methanogenic Archaea. *The Journal of Environmental Chemical Engineering*. 7, 102853. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.102853>.
- [42] Ali, S.S., Al-Tohamy, R., Manni, A., Luz, F.C., Elsamahy, T., Sun, J., 2019a, Enhanced digestion of bio-pretreated sawdust using a novel bacterial consortium: microbial community structure and methane-producing pathways. *Fuel*, 254, 115604. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.06.012>.
- [43] Ali, S.S., Nessem, A.A., Sun, J., Li, X. 2019b, The effects of water hyacinth pretreated digestate on *Lupinus termis* L. seedlings under salinity stress: a complementary study. *The Journal of Environmental Chemical Engineering*, 7, 103159. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2019.103159>.
- [44] Shah, A.A., Hasan, F., Hameed, A., Ahmed, S., 2008, Biological degradation of plastics: a comprehensive review. *Biotechnology Advances*, 26 (3), 246–265.

- sequestration of greenhouse gases, clearout of fugitive nutrient minerals, and subtraction of toxic elements from waters. In: Das, S. editor. *Microbial Biodegradation and Bioremediation*, Elsevier, Oxford. 433–454.
- [61] Kumar, R.V., Kanna, G.R., Elumalai, S., 2016, Biodegradation of polyethylene by green photosynthetic microalgae. *Journal of Bioremediation & Biodegradation*, 8, 1000381. <https://doi.org/10.4172/2155-6199.1000381>.
- [62] Eich, A., Mildenerger, T., Laforsch, C., Weber, M., 2015, Biofilm and Diatom Succession on Polyethylene (PE) and Biodegradable Plastic Bags in Two Marine Habitats: Early Signs of Degradation in the Pelagic and Benthic Zone? *PLOS ONE*, 10(9), e0137201. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0137201>.
- [63] Moog, D., Schmitt, J., Senger, J., Zarzycki, J., Rexer, K.H., Linne, U., et al. 2018, Using a marine microalga as a chassis for polyethylene terephthalate (PET) degradation. *Microbial Cell Factories*. 18(1), 171. <https://doi.org/10.1186/s12934-019-1220-z>.
- [64] Kim, J.W., Park, S.B., Tran, Q.G., Cho, D.H., Choi, D.Y., Lee, Y.J., Kim, H.S., 2020, Functional expression of polyethylene terephthalate-degrading enzyme (PETase) in green microalgae. *Microbial Cell Factories*, 19, 97. <https://doi.org/10.1186/s12934-020-01355-8>.
- [65] Ganesh, P.S., Vishnupriya, S., Vadivelu, J., Mariappan, V., Vellasamy, K.M., Shankar, E.M., 2020, Intracellular survival and innate immune evasion of *Burkholderia cepacia*: Improved understanding of quorum sensing-controlled virulence factors, biofilm, and inhibitors. *Microbiology and immunology*. 64(2), 87-98.
- [66] Gosh, K., Chowdhury, S., 2019, Review of aquaponics system: searching for a technically feasible and economically profitable aquaponics system. *Journal of Agricultural, Environmental and Consumer Sciences*, 19, 5-13.
- [67] Jacquin, J., Cheng, J., Odobel, C., Pandin, C., Conan, P., Pujol-Pay, M., et al. 2019, Microbial ecotoxicology of marine plastic debris: a review on colonization and biodegradation by the “plastisphere”. *Frontiers in Microbiology*, 25(10), 865.
- Acidovorax* sp. DP5. *Enzyme Research*, 212159. doi: 10.1155/2015/212159. Epub 2015 Nov 17. PMID: 26664741; PMCID: PMC4664802.
- [53] Uchida, N., Buck, D.W., He, D., Reitsma, M.J., Masek, M., Phan, T.V., Tsukamoto, A.S., Gage, F.H., Weissman, I.L., 2000, Direct isolation of human central nervous system stem cells. *Proceedings of the National Academy of Sciences of USA*. 19,97(26):14720-5. doi: 10.1073 /pnas.97.26.14720. PMID: 11121071; PMCID: PMC18985.
- [54] Shosuke, Y., Kazumi, H., Ikuo, T., Kohei, O., 2021, Chapter Nine - *Ideonella sakaiensis*, PETase, and MHETase: From identification of microbial PET degradation to enzyme characterization, Editor(s): Gert Weber, Uwe T. Bornscheuer, Ren Wei, *Methods in Enzymology*, Academic Press, 648, 187-205. <https://doi.org/10.1016/bs.mie.2020.12.007>.
- [55] Tanasupawat, S., Takehana, T., Yoshida, S., Hiraga, K., Oda, K., 2016, *Ideonella sakaiensis* sp. nov. isolated from a microbial consortium that degrades poly ethylene terephthalate. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 66, 2813–2818.
- [56] Friedrich, J., Zalar, P., Mohorčič, M., Klun, U., Kržan, A., 2007, Ability of fungi to degrade synthetic polymer nylon-6. *Chemosphere*, 67, 2089–2095.
- [57] Krueger, M.C., Hofmann, U., Moeder, M., Schlosser, D., 2015b, Potential of wood-rotting fungi to attack polystyrene sulfonate and its depolymerisation by *Gloeophyllum trabeum* via hydroquinone-driven Fenton chemistry, *PLoS One*, 10. e0131773. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0131773>.
- [58] Perin, G., Bellan, A., Bernardi, A., Bezzo, F., Morosinotto, T., 2016, The potential of quantitative models to improve microalgae photosynthetic efficiency. *Physiologia Plantarum*, 166, 380–391.
- [59] Bulgariu, L., Bulgariu, D., 2020, Bioremediation of toxic heavy metals using marine algae biomass. In: Naushad, M., Lichtfouse, E. editors. *Green Materials for Wastewater Treatment*. Springer International Publishing, Switzerland, 69–98.
- [60] Devi, K.U., Swapna, G., Suneetha, S., 2014, Microalgae in bioremediation:

- [68] Pinto, M., Langer, T.M., Hüffer, T., Hofmann, T., Herndl, G.J., 2019, The composition of bacterial communities associated with plastic biofilms differs between different polymers and stages of biofilm succession. PloS one, 5, 14(6): e0217165.

“Research article”

The role of green management in reducing plastic use: A systematic review

Shiva Dehghan Abkenar¹, Nazanin Khakipour^{2*}

¹Associate professor of Chemistry Department, Tehran jonoub branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

²Assistant professor of Soil Science Department, Savadkooh branch, Islamic Azad University, Savadkooh, Iran

*Corresponding author: nazanin_kh_43713@yahoo.com

(Received: 13 November 2024, Accepted: 18 February 2025)

Abstract:

Background and Objectives: Accumulation of plastic waste is known as one of the most important environmental challenges. it is estimated that until 2015, approximately 6300 million tons of plastic waste was produced, 79% of which was accumulated in landfills or the natural environment. oceans are considered the most critical areas in terms of plastic accumulation pollution, because they can transport plastics to distant areas. **Research method:** finding alternative solutions compatible with the environment, such as biodegradation instead of traditional disposal, is of great importance. **findings:** Abiotic degradation of plastic occurs naturally like mechanical degradation caused by the forces of tides, waves and wear by rocks. naturally, oxidation due to light, hydrolysis process and mechanical destruction can easily lead to the formation of micro and nano plastic parts. plastic hydrolysis is one of the main steps in non-biological degradation. In biodegradation, soil bacteria are efficient in biological cleaning of pollutants because they face changing environmental conditions such as temperature, humidity, pH, etc. **conclusion:** Investigating the erosion behavior of polymers, mixtures, composites, etc. in different environmental conditions is a priority issue for evaluating possible applications and determining their lifespan.

Conflict of interest: None declared.

Keywords: Plastics, Microplastics, Abiotic degradation, Biodegradation, Accumulation