

واژه‌های کلیدی:

ضایعات پلاستیکی،
پلی‌استایرن،
پلی‌اتیلن،
زیست‌تخریب‌پذیری

مروری بر سازوکار عملکرد کرم‌های پلاستیک‌خوار ناجی محیط‌زیست

سید امیرحسین موسوی*، دکتر رضا جهانمردی
تهران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم تحقیقات، گروه مهندسی پلیمر

چکیده ...

هرساله ۲/۵ میلیون تن پلاستیک وارد اقیانوس‌ها می‌شود. در خشکی نیز پلاستیک در زمین‌های دفع زباله، سواحل و دیگر زیست‌بوم‌های حساس سراسر جهان جمع می‌شود. تحقیقات اخیر نشان داده است نوعی کرم ممکن است به ما در حل مشکل عظیم زباله‌های پلاستیکی کمک کند. دانشمندان کشف کرده‌اند که نوعی کرم می‌تواند استایروفوم و دیگر پلی‌استایرن‌ها را در رژیم غذایی خود جای دهد. به گفته آن‌ها، نه تنها کرم‌ها با رژیم غذایی استایروفوم به حیات خود ادامه می‌دهند، بلکه ریزاندام‌واره‌های موجود در احشای آن‌ها طی فرایند گوارش، پلاستیک را تجزیه کرده و تبدیل به دی‌اکسیدکربن و ماده غذایی مورد نیاز بدن خود می‌کنند. مواد زیست‌تخریب‌پذیر دفع شده از کرم‌ها نیز به نظر می‌رسد می‌تواند به‌عنوان کود برای بارورکردن خاک زمین کشاورزی استفاده شود. دانشمندان به دنبال راهکارهایی برای پیاده‌سازی این کشف با روشی مناسب هستند تا زباله‌های پلاستیکی را از بین برده و راهکاری برای نجات اقیانوس‌ها، رودخانه‌ها و تمام محیط‌زیست از عواقب غیرقابل‌اجتناب تجمع پلاستیک ایجاد کنند. در این مطالعه مروری، به بررسی مقاله‌های مرتبط با تجزیه زیستی پلی‌اتیلن و پلی‌استایرن و پلی‌پروپیلن پرداخته شده است.

*پست الکترونیکی مسئول مکاتبات:
amir13782320@yahoo.com

۱ مقدمه

پلاستیک‌های بر پایه نفت با تولید جهانی بیش از ۳۰۰ میلیون تن به طور گسترده‌ای در سراسر جهان استفاده می‌شود [۱]. پرکاربردترین پلاستیک‌ها گرمانرم‌ها هستند که متداول‌ترین آن‌ها عبارتند از: پلی‌اتیلن ۲۹/۶٪، پلی‌پروپیلن ۱۸/۹٪، پلی‌وینیل کلرید ۱۰/۴٪، پلی‌یورتان ۷/۴٪، پلی‌استایرن ۷/۱٪ و پلی‌اتیلن ترفتالات ۶/۹٪. این مواد پلاستیکی به‌ویژه پلی‌استایرن، پلی‌وینیل کلرات، پلی‌یورتان و پلی‌کربنات که تقریباً ۲۶ درصد از تولید پلاستیک را تشکیل می‌دهند، محیط‌زیست و سلامت انسان را به خطر می‌اندازند.

آلودگی میکروپلاستیک (ذرات پلاستیکی با اندازه کمتر از ۵ میلی‌متر) موضوعی قابل توجه است. منبع اصلی این آلودگی، ورود مستقیم ذرات پلاستیکی، به اندازه میکرومتر، مانند میکروبندها و انتشار قطعات الباف پلاستیک به دلیل ساییش در استفاده از بقایای پلاستیکی است که در نهایت تنها با طیف وسیعی از فرایندهای فیزیکی، زیستی و شیمیایی در دریا و خشکی تجزیه می‌شود [۲].

به‌تازگی محققان اثرات محیطی ریزپلاستیک را تحت بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که ریزذره‌ها به‌عنوان سامانه‌های انتقال آلاینده کارآمد عمل می‌کنند. ریزذره‌ها به‌طور کامل در مرحله تصفیه فاضلاب از فاز آب خارج نمی‌شوند و بنابراین در پساب تصفیه شده و رودخانه‌های واقع در پایین دست پساب فاضلاب وجود دارند. حذف ناقص منجر به آزاد شدن تعداد زیادی از ریزذره و همچنین سایر ریزپلاستیک‌ها می‌شود. زباله‌های پلاستیکی و ریزپلاستیک‌ها از جمله پلی‌اتیلن و پلی‌استایرن سال‌هاست که یکی از نگرانی‌های زیست‌محیطی است. مطالعات قبلی در مورد تجزیه زیستی پلاستیک نشانگر این است که چندین باکتری و قارچ، قادر به تجزیه مواد پلاستیکی از جمله پلی‌استایرن و پلی‌اتیلن با سرعت تخریب پایین هستند [۳].

تضاد شدید بین دوام قابل توجه پلی‌استایرن و مدت زمان کوتاه عمر محصولات پلی‌استایرن منجر به افزایش تجمع زباله‌های پلی‌استایرن در محیط ما شده است. بیشتر زباله‌های جمع‌شده پلی‌استایرن همراه با زباله‌های جامد شهری در محل‌های دفن زباله دفع می‌شوند. مسئله‌سازتر این است که مقدار زیادی از آوار پلی‌استایرن نیز به‌عنوان «آلاینده‌های سفید» در محیط پخش و به نگرانی جهانی زیست‌محیطی تبدیل شده است [۱]. بیشتر پلاستیک‌های استفاده شده آلاینده‌های آلی پایدار هستند (دربازه زمانی مناسبی تخریب نمی‌شوند) و فراگیر بودن این موضوع نسبت به گونه‌های مختلف و مواد پلیمری، اهمیت آن را دو

برابر می‌کند [۴].

خاک توسط مواد زائد پلاستیکی آلوده و منجر به کاهش تولید محصولات می‌شود. این مواد زائد پلاستیکی در محل دفن زباله، مساحت زیادی از زمین را اشغال می‌کنند و همچنین به ناچار مقادیر زیادی مواد شیمیایی از جمله لیگومرها، بقایای کاتالیزورها، حلال‌های پلیمری‌شدن و طیف وسیعی از مواد افزودنی پلاستیکی آزاد می‌کنند. ورود این مواد به آب‌ها نگرانی عمده است. زیرا آن‌ها به حیوانات بزرگ اقیانوس آسیب می‌رسانند، صنعت ماهیگیری را خراب می‌کنند و به محیط‌زیست آب آسیب می‌رسانند. به جز خطرات سلامتی انسان و ایمنی محیط‌زیست، مدیریت و دفع نادرست مواد زائد پلاستیکی بر زیبایی محیط تأثیر می‌گذارد [۱].

تخریب زباله‌های پلی‌استایرن می‌تواند با استفاده از روش‌های مختلف غیرزیستی مانند سوزاندن حاصل شود؛ اما چنین روش‌هایی، آلودگی احتمالی هوا و تولید محصولات جانبی خطرناک را ایجاد می‌کند؛ به همین علت تخریب زیستی سال‌هاست که پیشنهاد می‌شود [۵]. پلاستیک‌های زیست‌تخریب‌پذیر و زیست‌سازگار مانند پلی‌لاکتاید، پلی‌هیدروکسی آلکانوات و غیره به صورت تجاری در دسترس هستند و می‌توانند پلاستیک‌های سنتی را برای بسیاری از کاربردها جایگزین کنند. بهبود استفاده مجدد، بازیافت و بازیابی پلاستیک‌ها، زیرساخت‌ها و مدیریت زباله‌های جامد باعث کاهش بقایای پلاستیکی به رودخانه‌ها و اقیانوس می‌شود و در نتیجه میزان تجمع پلاستیک‌های کوچک را کاهش می‌دهد. استفاده مجدد از محصولات پلاستیکی همچنین می‌تواند به‌طور قابل توجهی ضایعات پلاستیکی را کاهش داده و از تشکیل ریزپلاستیک جلوگیری کند. استفاده از پلاستیک زباله به‌عنوان منبع انرژی و بازیابی پلاستیک‌های زائد به‌عنوان محصولات خام و ارزشمند مصنوعی نیز باعث کاهش منابع ریزپلاستیک می‌شود. تأسیسات تصفیه فاضلاب موجود باید به‌منظور حذف کارآمد ریزپلاستیک و جلوگیری از ورود ریزپلاستیک به آب‌های سطحی، مانند رودخانه‌ها و اقیانوس، به‌روز شود. توسعه فناوری‌های پاکسازی و تصفیه زیست‌محیطی، تجزیه مواد پلیمری با استفاده از کرم‌های پلاستیک‌خور نیز می‌تواند ضایعات پلاستیکی را کاهش دهد.

تا به امروز، به‌طور کلی تصور شده است که پلی‌استایرن توسط ریزاندام‌واره‌ها و بی‌مهرگان خاک قابل تجزیه نیست. اما در واقعیت این کرم‌ها توانایی جویدن و بلعیدن پلی‌استایرن و پلی‌اتیلن را به‌عنوان غذا نشان داده‌اند و قادر به تخریب و معدنی‌سازی به CO_2 از طریق فعالیت‌های وابسته به میکروب

محدودیت‌های شناخته شده دما بر روی فیزیولوژی کرم، با دامنه مطلوب گزارش شده از 25°C تا 28°C و عدم توانایی تحمل دمای بالاتر از 30°C توضیح داده شده است [7] و نتایج نشان داد که SR (نرخ بقا) کرم در دمای 20°C به طور قابل توجهی بیشتر از 25°C نیست ($p < 0.05$). با این حال، کرم‌هایی که در دمای پایین‌تر رشد کرده‌اند مقادیر نرخ بقای کمتری نسبت به کرم‌های تغذیه شده با پلی‌استایرن داشته باشند، مقادیر SR در 20°C و 25°C بالاتر از 30°C بود و میزان تخریب پلی‌استایرن نیز در 25°C و 30°C نسبت به 20°C بالاتر بود. این امکان وجود دارد که فعالیت متابولیک پایین در دمای پایین، میزان مرگ‌ومیر را کاهش دهد (افزایش SR) و فعالیت متابولیکی بالاتر در درجه حرارت بالاتر میزان مرگ‌ومیر را افزایش دهد (کاهش SR). از آنجا که فعالیت متابولیکی با مصرف پلی‌استایرن در ارتباط است، میزان مصرف پلی‌استایرن زیادتر در دماهای بالاتر مشاهده می‌شود. در حال حاضر تخریب سریع زیستی پلی‌استایرن، در روده کرم‌های زرد رنگ به اثبات رسیده است [8].

T. Molitor از راسته Coleoptera (سوسک‌ها) و خانواده Tenebrionidae (نام عمومی «سوسک تیره») است. یانگ و همکاران (۲۰۱۸)، در مطالعه‌ای تخریب پلی‌استایرن در کرم‌های زرد رنگ را آزمایش کردند. آن‌ها کرم‌ها را از ۱۲ منبع مختلف به دست آوردند و آن‌ها را با استفاده از پروتکل‌های استاندارد [8] از جمله (۱) توازن توده پلی‌استایرن برای تعیین میزان تخریب پلی‌استایرن (۲) سوانگاری نفوذ ژل (GPC) برای ارزیابی تغییرات در وزن مولکولی و (۳) طیف‌سنجی فروسرخ تبدیل فوری (FTIR) باقیمانده‌های فضله حشرات برای شناسایی تغییرات شیمیایی حاصل از هضم پلی‌استایرن آزمایش کردند. آن‌ها گزارش دادند که میکروبیوم روده در دفع پلیمری شدن و تخریب پلی‌استایرن نقش دارد. این میکروبیوم‌ها برای ریزاندام‌واره‌ها از منابع مختلف، با تغییر در ساختار میکروبی در هنگام تغذیه کرم‌ها با پلی‌استایرن متفاوت هستند.

طی دوره ۳۲ روزه، SR (نرخ بقا) برای کرم‌هایی که فقط با سبوس تغذیه شدند (۸۸-۹۰٪)، برای کرم‌هایی که با پلی‌استایرن + سبوس تغذیه شدند (۸۵-۹۲٪) و برای کرم‌هایی که فقط با پلی‌استایرن تغذیه شدند (۸۳-۹۲٪) حاصل شد که این نرخ نسبت به نرخ بقا در کرم‌های بدون جیره (۷۶-۶۹٪) بالاتر بود. وزن متوسط کرم‌هایی که طی ۳۴ روز با سبوس یا پلی‌استایرن + سبوس تغذیه شدند ۲۵-۱۶٪ افزایش یافت، اما در صورت تغذیه با پلی‌استایرن خالص، ۹/۳٪ افزایش یافت و در صورت عدم استفاده ۱۷/۴ درصد کاهش یافت (شکل ۱)

در روده در مدت زمان کمتر از ۲۴ ساعت هستند.

کرم‌ها دارای چهار مرحله زندگی تخم، لارو، شفیره و بالغ هستند. آن‌ها همچنین غذای حیوانی سودآوری هستند که در بسیاری از بازارهای حشرات و فروشگاه‌های حیوانات خانگی موجود است و به راحتی می‌توان آن‌ها را روی جو تازه، سبوس گندم یا دانه همراه با سیب‌زمینی، کلم، هویج یا سیب پرورش داد. کرم‌ها ذخیره‌ساز مواد در روده خود و خوراک دام‌های تجاری موجود در بازارهای حیوانات اهلی و حیوانات خانگی هستند.

۲ تجزیه زیستی پلی‌استایرن در کرم‌های زرد رنگ، تخم حشره

Tenebrio Molitor Linnaeus (Coleoptera Tenebrionidae)

از میان زیاله‌ها، یکی از بزرگ‌ترین آن‌ها پلی‌استایرن (PS) است، پلیمری متداول (CH (C6H5) CH2-[n-]) با نرخ تولید سالانه بیش از ۲۰ میلیون تن در سال. یانگ و همکارانش در سال (۲۰۱۷) نرخ تجزیه زیستی هفت نوع ضایعات پلی‌استایرن را با استفاده از سویه نوعی کرم که به صورت تجاری در ایالات متحده موجود است (سویه CA) ارزیابی کردند و دریافتند که میزان تخریب پلی‌استایرن با تکمیل رژیم غذایی از منبع تغذیه‌ای معمولی به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. کرم‌های زرد، یعنی Tenebrio Molitor Linnaeus، در دومین مرحله از چهار مرحله زندگی تخم، لارو، شفیره و سوسک کرم‌ها هستند [۶]. این واقعیت که اکنون دو سویه کرم برای تخریب ضایعات پلی‌استایرن شناخته شده‌اند، نشان می‌دهد که این قابلیت به طور گسترده در میان گونه‌های مختلف T. Molitor توزیع شده است. یانگ و همکارانش در سال (۲۰۱۷) برای ارزیابی اثرات تغذیه بر تخریب پلی‌استایرن، دو آزمایش انجام دادند. در آزمایش اول، برای گروه اول، رژیم غذایی پلی‌استایرن (۱/۸ گرم) را به تنهایی و برای گروه دیگر پلی‌استایرن (۱/۸ گرم) + پروتئین سویا یا سبوس (۱/۸ گرم هر چهار روز) در دمای 20°C دادند. در آزمایش دوم میزان تخریب پلی‌استایرن در سه دمای مختلف (20°C ، 25°C و 30°C) را مقایسه کردند. میزان تخریب پلی‌استایرن در دمای 25°C برای کرم‌های تغذیه شده با ۱۰٪ پلی‌استایرن + ۹۰٪ سبوس در مقایسه با کرم‌های تغذیه شده با پلی‌استایرن خالص دو برابر بود. کرم‌های تغذیه شده با سبوس + پلی‌استایرن تمام مراحل چرخه زندگی (لارو، شفیره، سوسک، تخم مرغ) را به پایان رساندند و نسل دوم توانا بر تخریب پلی‌استایرن را به دنیا آوردند. اثرات دما بر میزان بقا و میزان تخریب پلی‌استایرن، توسط

باشد. فوم، برخلاف سبوس، محتوای آب مناسب و مواد مغذی لازم برای رشد، مانند پروتئین، فسفر، ویتامین‌ها و مواد معدنی را ندارد. بنابراین، کمبود مواد مغذی و تجزیه زیستی نسبتاً ضعیف پلی‌استایرن منجر به معدنی‌سازی پلی‌استایرن بلعیده شده به CO_2 و تأمین منبع انرژی محدود برای سنتز یا رشد توده زنده می‌شود. به‌طور مشابه، این مطالعه نشان داد که $32/4 - 1/5\%$ از لیگنین نشان‌دار به CO_2 تبدیل می‌شود، درحالی‌که تنها بخش محدودی از آن پس از یک دوره آزمایش ۵۰ روزه به اجسام موریانه جذب می‌شود. نتایج، تجزیه زیستی پلی‌استایرن در روده لارو را تأیید کرده و حضور فرایند تخریب-پلاستیک (بر پایه نفت) امیدوارکننده را در محیط نشان می‌دهد.

در تحقیقی دیگر یانگ و همکارانش در سال ۲۰۱۵ نشان دادند که کرم‌های زرد رنگ قادر به مصرف استایروفوم بوده و از نظر غذا خوردن و همچنین رفتارهای جویدن و از توانایی دستگاه‌های هضم اکساینده وابسته به میکروب روده، توانایی ذاتی تخریب زیستی را دارند. سه گونه کرم تنریو وجود دارد که یک گونه آن، با بالغ شدن تیره رنگ می‌شود (به‌صورت کرم خوراکی در رستوران‌ها به فروش می‌رسد) [۹].

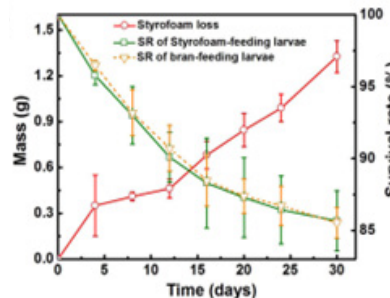
یانگ و براندون در سال ۲۰۱۸ تخریب پلی‌استایرن را با استفاده از قراردادهایی از جمله تعادل جرم پلی‌استایرن برای تعیین میزان خاص تخریب آن، سوانگاری نفوذ ژل (GPC) برای ارزیابی تغییرات وزن مولکولی و طیف‌سنجی تبدیل فوریه فروسرخ (FTIR) از باقی‌مانده‌های فضولات تخم حشره برای شناسایی تغییرات شیمیایی ناشی از هضم پلی‌استایرن آزمایش کردند [۱۰].

سوانگاری ژل تراوایی (GPC) برای ارزیابی تغییرات در وزن مولکولی و طیف‌سنجی فروسرخ (FTIR) فضولات برای شناسایی تغییرات شیمیایی ناشی از هضم پلی‌استایرن انجام گرفت و این نتیجه حاصل شد که کرم‌های تیره رنگ قدرت تخریب زیستی پلی‌استایرن را در سطوح بالاتری از پلیمر نسبت به کرم‌های زرد رنگ به همان اندازه دارند. همه کرم‌های تیره پلی‌استایرن را به خوبی جویدند (احتمالاً جویدن و بلع پلی‌استایرن رفتاری ذاتی است.) و رفتاری شبیه به کرم‌های زرد داشتند و قادر به تجزیه بهتر بودند اما با یک تفاوت، حساسیت به نور و پنهان کردن خودشان در زیر استایروفوم.

تجزیه و تحلیل GPC در پایان آزمون ۳۱ روزه انجام و نتایج زیر حاصل شد. نمونه فضولات از کرم تیره تغذیه شده با پلی‌استایرن، تنها حاوی عصاره‌های پلیمری دارای مقادیر M_n ای $0/26\%$ و مقادیر M_w $59/2\%$ کمتر از ماده اولیه بود. نمونه فضولات از کرم زرد رنگ دارای مقادیر M_n ای $11/7\%$ و مقادیر



(الف)



(ب)

شکل ۱ رفتار استایروفوم خوردن کرم‌ها (الف) لاروها بلوک استایروفوم را می‌جویند و می‌خورند. (ب) از دست دادن توده استایروفوم ناشی از خوردن گروهی از کرم‌ها و میزان بقای جمعیت کرم‌های تغذیه شده با استایروفوم و رژیم غذایی سبوس طی ۳۰ روز.

این نتایج نشان داد که هضم پلی‌استایرن خورده شده می‌تواند انرژی قابل توجهی را فراهم کند و نیازهای انرژی را برای بیش از یک ماه برای کرم تأمین کند. کرم‌ها به دلیل رفتارهای غذایی و جویدنی ذاتی و سازوکار هضم اکساینده وابسته به میکروب روده، توانایی ذاتی تخریب زیستی پلی‌استایرن را دارند.

۳ تجزیه زیستی و معدنی‌سازی پلی‌استایرن توسط کرم‌های تیره و زرد

در تحقیقی دیگر یانگ و همکاران [۹] نشان دادند که تخریب زیستی و معدنی‌سازی پلی‌استایرن در روده کرم‌ها بر اساس تغییر در خصوصیات شیمیایی و فیزیکی باقی‌مانده‌های هضم شده (مدفوع) پس از عبور از سامانه روده در مقایسه با رژیم غذایی استایروفوم، با تبدیل پلی‌استایرن بلعیده شده به CO_2 و توده زنده، رخ می‌دهد. طی این کار، آزمایشی با ۴۰ کرم به صورت گروهی در سه نمونه برای تعیین تغییر وزن در سه شرایط مختلف رژیم غذایی انجام شد. درنهایت وزن خشک توده زنده کرم‌های تغذیه شده با سبوس $33/6\%$ افزایش یافت، اما وزن کرم‌های گرسنه، پس از یک دوره ۱۶ روزه، $24/9\%$ کاهش یافت. به نظر نمی‌رسد افزایش وزن خشک توده زنده کرم‌های تغذیه شده با فوم به همان اندازه کرم‌ها تغذیه شده با سبوس

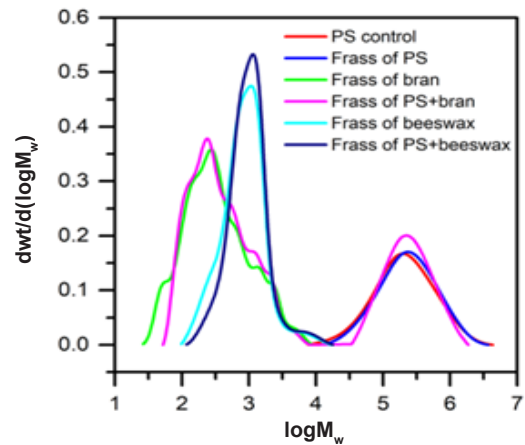
از روده تغییر کرده است یا خیر، سوپرکرم‌های استایروفوم‌خور جمع‌آوری و برای کارایی در بازه تبدیل فایر فوم خورده شده به CO_2 ، مجموعه‌ای از آزمایش‌های تنفسی روی آن‌ها انجام شد. نتایج نشان داد که سوپرکرم‌ها، استایروفوم را به‌عنوان رژیم غذایی به میزان 0.58 (میلی‌گرم در روز به ازای هر سوپرکرم) خوردند که این میزان، ۴ برابر بیشتر از کرم‌های پلاستیک‌خور بود. مولکول‌های استایروفوم پس از عبور از روده آن‌ها، به محصولات با وزن مولکولی کم (بیشتر به CO_2 معدنی) تبدیل شدند. تفاوت فیزیکی بین کرم‌های پلاستیک‌خور و سوپرکرم‌ها، قسمت پایین فک دهانی است که این گونه‌ها را قادر به جویدن و خوردن پلاستیک می‌کند. با الهام از این ویژگی می‌توانیم حشرات جدید دیگری را که قادر به جویدن و خوردن پلاستیک هستند، پیدا کنیم.

۵ تجزیه زیستی پلی‌اتیلن توسط کرم‌های پلاستیک‌خوار

محققان با استفاده از آزمون‌هایی مانند طیف‌سنجی فروسرخ تبدیل فوریه (FTIR)، میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و غیره، تخریب زیستی پلی‌اتیلن را با اندازه‌گیری تغییرات مختلف خصوصیات فیزیکی و شیمیایی بررسی کردند [۵] تا به نتایجی برسند اما این شواهد برای اثبات تخریب زیستی دقیق پلی‌اتیلن کافی نبود.

پلی‌اتیلن به طور متناوب در معرض چرخه UV و رطوبت قرار گرفت و نشان داد تشکیل بقایای کربونیل در سطح پلی‌اتیلن اکسید شده در اثر نور نقش مهمی در شروع تجزیه زیستی دارد. مطالعه تجزیه زیستی پلی‌اتیلن عمل‌آوری شده با اکسیدان، استنارات‌بگنژ و به دنبال آن پرتو فرابنفش کاهش درصد کشش و مقاومت کششی را نشان داد. علاوه بر آن، تجزیه و تحلیل FTIR نشان داد که تشکیل گروه‌های کربونیل و کربوکسیلیک پس از عمل‌آوری با پرو اکسیدان بیشتر از فیلم تحت درمان با پرتو فرابنفش است و پس از گذراندن دوره نهنگی به طور کامل تخریب می‌شود که این بیانگر نقش پرو اکسیدان‌ها در افزایش تخریب زیست‌محیطی است.

تاکنون بسیاری از مطالعات تجزیه زیستی پلی‌اتیلن با استفاده از روش‌هایی مانند AFM، SEM، XRD، DSC، FTIR و غیره تغییرات خصوصیات فیزیکی-شیمیایی و تخریب ساختار را بررسی کرده‌اند اما کاهش وزن همراه با تغییرات فیزیکی و شیمیایی برای اثبات تخریب زیستی واقعی پلی‌اتیلن کافی نیست. از این‌رو برای به حداقل رساندن مصنوعات حاصل از تخریب مواد افزودنی به جای پلی‌اتیلن، نیاز به ارائه شواهد مشخص و قابل اعتماد برای تخریب زیستی پلی‌اتیلن است و



شکل ۲ آزمون سوانگاری نفوذ ژل (GPC) برای نمونه پلی‌استایرن (به‌عنوان شاهد) و فضولات لارو تغذیه پلی‌استایرنی و مواد مغذی مکمل.

ای M_w ۲۹/۸٪ کمتر از ماده اولیه بود. این کاهش در M_w و M_n نشان می‌دهد که پلیمری شدن و تخریب مواد اولیه پلی‌استایرن در هر دو گونه در همه‌جا وجود دارد (شکل ۲).

روند اکسایش و وابسپارش نیز با استفاده از تجزیه و تحلیل FTIR در پایان آزمایش ۳۱ روزه به دست آمد. مقایسه طیف FTIR برای نمونه موجودی خوراک و توده‌های هضم شده هر دو گونه تغییرات شیمیایی و ترکیب اکسیژنی که به تخریب پلاستیک مرتبط بود را نشان داد. طیف‌های فضولات کرم سیاه تغذیه شده با پلی‌استایرن و پلی‌استایرن با آرد ذرت شبیه طیف کرم‌های زرد تغذیه شده با پلی‌استایرن و پلی‌استایرن با سبوس بود.

۴ تجزیه زیستی و کانی‌سازی پلی‌استایرن توسط سوپرکرم‌های پلاستیک‌خور Zophobas Atratus

یانگ و همکاران در ابتدا گزارش دادند که کرم‌های پلاستیک‌خور (تخم *Tenebrio Molitor*) می‌توانند پلی‌استایرن را به‌عنوان غذا بخورند و پس از عبور از مجاری روده، پلی‌استایرن بلعیده شده را به سرعت تخریب و معدنی کنند. علاوه بر این، آن‌ها نشان دادند که هم‌زیست میکروبی روده نقش مهمی در تخریب زیستی پلی‌فوم بلعیده شده در روده دارد [۳]. این یافته‌ها نه تنها راهی جدید برای مهار کرم‌های پلاستیک‌خور برای تخریب انواع دیگر مواد زائد پلاستیکی مانند پلی‌اتیلن [۱۱] یا لاستیک بلکه برای کاوش بیشتر در مورد سایر گونه‌های حشرات برای تجزیه زیستی مواد زائد پلاستیکی [۱۲] خواهد بود. به منظور بررسی توانایی سوپرکرم‌ها در تخریب و کانی‌سازی هنگام تغذیه آن‌ها با پلی‌استایرن (فوم) به عنوان رژیم غذایی، برای تعیین اینکه آیا ساختار شیمیایی و ترکیبات پلی‌فوم خورده شده پس از عبور

همکاران [۱۸] تخریب زیستی پلی اتیلن را با استفاده از کرم‌های مومی *Galleria Mellonella* گزارش داد که بینش جدیدی را در این زمینه ایجاد می‌کند.

کرم مومی مهم‌ترین آفت موم عسل است، زیرا به‌عنوان انگل لانه در کلونی‌های زنبور عسل زندگی می‌کند و از موم عسل تغذیه می‌کند که متشکل از مخلوط بسیار متنوعی از ترکیبات چربی شامل آلکن‌ها، آلکان‌ها، استرها و اسیدهای چرب است. بیشترین پیوند هیدروکربنی موجود در شانه مومی پیوند $\text{CH}_2\text{-CH}_2$ همانند پلی اتیلن است. که به همین علت کرم مومی را برای تغذیه با پلی اتیلن را ترجیح می‌دهد.

مطالعه کندوگال و همکاران (۲۰۲۱) گزارش نقش خورشید در تجزیه زیستی پیشرفته پلی اتیلن با چگالی کم (LDPE) از طریق مواد معدنی باقی‌مانده از دفع (ER) کرم مومی بزرگ را تعیین کردند. ER کرم مومی تغذیه شده با PTLDPE (تحت درمان با LDPE) و UTLDPE (بدون درمان با LDPE) با استفاده از روش‌های FTIR، 1H NMR و GC MS مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. یافته‌های این مطالعه افزایش تخریب سطح PTLDPE در زیر نور خورشید و در نتیجه فعالیت هضم هیدروکربن توسط لارو *G. Mellonella* و توانایی آن برای کانی‌سازی کارآمد بدون ایجاد مزاحمت در بقای آن را تأیید می‌کند. اثر هم‌افزایی تخریب عکس و تخریب زیستی از طریق روده کرم مومی *G. Mellonella*، منجر به تخریب PTLDPE به‌طور موثرتری نسبت به UTLDPE می‌شود. این تخریب سریع و مقرون‌به‌صرفه کرم موم، پتانسیل قابل توجهی به‌عنوان منبع امیدوارکننده فرآیند تخریب زباله‌های پلاستیکی بر پایه نفت در محیط‌زیست خواهد بود (شکل ۳).

۷ تجزیه زیستی پلی اتیلن و پلی استایرن توسط تخم حشره پروانه کرم موم‌خوار بزرگ

آزمایش ایزوتوپ کربن روی برخی از بی‌مهرگان (کرم‌های خاکی و حلزون‌ها) انجام شد و شواهد حاکی از عدم تولید CO_2 بود. حشرات با آرواره‌های رویی جونده یا گزنده، مانند ریزوپرتا دومینیکا، قادر به جویدن و بلعیدن کیسه‌های پلاستیکی هستند، اما اطلاعات کمی در مورد ریزاندام‌واره روده این حشرات وجود دارد [۱۹]. در تحقیقات پیشین اثربخشی تخریب پلی اتیلن توسط ۱۰۰ تخم حشره پروانه مومی در مدت ۱۲ ساعت با کاهش وزن ۹۲ میلی‌گرم از یک کیسه پلی اتیلن گزارش شده بود، اما بقایای پروانه کرم موم‌خوار که با پلاستیک تغذیه می‌شدند مورد بررسی قرار نگرفته است [۱۸].

محققان در سال ۲۰۲۰ امکان افزایش بقای تخم حشره پروانه

تحقیقات بعدی باید با استفاده از پلی اتیلن بدون مواد افزودنی انجام شود.

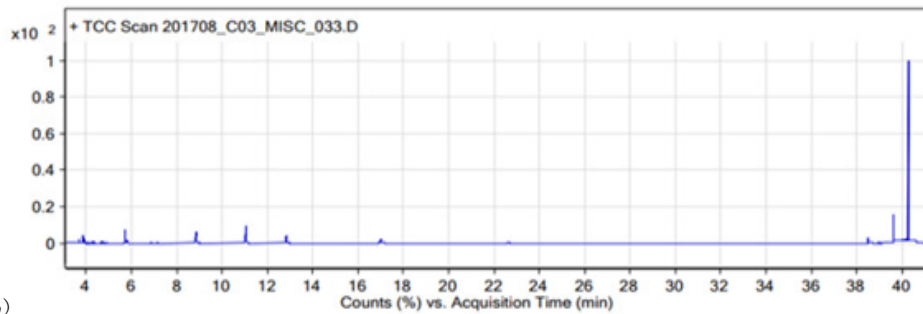
در ابتدای راه روش‌های زیادی برای تخریب زباله‌های پلی اتیلن از جمله دفن زباله، سوزاندن، تصفیه شیمیایی و تخریب حرارتی آزموده شد [۱۳] اما این روش‌ها برای محیط‌زیست خطرناک بود و اثرات جبران‌ناپذیری بر موجودات زنده داشت. به همین منظور محققان با تحقیقات بر روی گونه‌ای از میکروب‌ها فهمیدند که چندین باکتری و قارچ قادر به تخریب پلی اتیلن هستند، اما میزان تخریب و زمان آن‌ها متفاوت است که می‌تواند به کرم‌های مومی که حاصل تحقیقات اخیر هستند اشاره کرد. برای دقت در محاسبات، از کرمی خاص که آفتی مضر از موم عسل است و به‌عنوان انگلی در لانه‌های زنبور عسل زندگی می‌کند و از موم عسل تغذیه می‌کند، استفاده کردند [۱۴].

این کرم‌ها از نقطه‌ای در هند تحت شرایطی (بر اساس ریخت‌شناسی تخم) جمع‌آوری شده با استفاده از تکنیک‌های موجود شناسایی و اعتبارسنجی شد. هویت ژنتیکی نیز از طریق مطالعات تعیین توالی ژن سیتوکروم اکسیداز میتوکندری (جمع‌آوری شدند). آزمایش تخریب با این کرم به مدت ۸ روز انجام شد که نشان داد در صورت تماس مستقیم با کرم قادر به جویدن و ایجاد سوراخ در فیلم پلی اتیلن بودند. طبق تحقیقات و مطالعات در مورد چرخه زندگی این کرم‌ها مشخص شد که طول عمر علاوه بر در دسترس بودن و نوع غذا به شرایط محیطی نیز بستگی دارد. از همه مهم‌تر این امکان وجود دارد که رژیم غذایی با تغذیه اضافه شده، مواد مغذی و معدنی ضروری مانند کلسیم، پتاسیم، نیتروژن، فسفر و غیره - را که برای رشد و نمو تخم‌ها به غیر از هیدروکربن موجود در پلی اتیلن مورد نیاز است - را افزایش دهد و باعث افزایش بازدهی کرم‌ها شود.

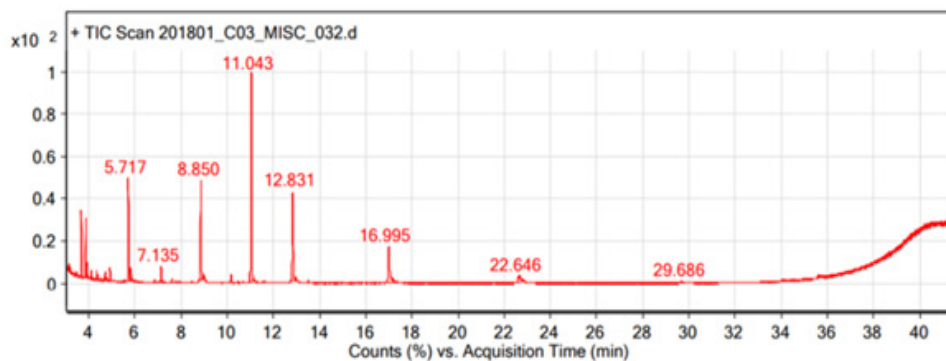
۶ تجزیه زیستی و معدنی‌سازی پلی اتیلن با چگالی کم (LDPE) در کرم مومی بزرگ

پلی اتیلن (PE) پرکاربردترین عنصری است که به دلیل استفاده گسترده، دوام فوق‌العاده و پایداری در تجزیه زیستی، تا حدود زیادی مشکلی زیست‌محیطی است. عمدتاً از طریق سوزاندن دفع می‌شود که ممکن است گازهای سمی تولید کند یا خطر آزاد شدن محصولات جانبی سمی سرطان‌زا را داشته باشد [۱۵]. مطالعات مختلف گزارش کرده‌اند که آنزیم‌های خارج سلولی تولیدشده توسط ریزاندام‌واره مانند لاکاز [۱۶] و آلکان هیدروکسیلاز [۱۷] قادر به تجزیه پلی اتیلن به محصولات با وزن مولکولی کم هستند که بیشتر توسط میکروب‌ها به‌عنوان کربن و منبع انرژی برای رشد استفاده می‌شوند. اخیراً، بمبلی و

(الف)



(ب)



شکل ۳ GCMS باقیمانده از دفن کرم تغذیه شده در (الف) WC، (ب) PTLDPE.

فضله حشرات شامل ترکیباتی به غیر از پلی استایرن و اتیلن، از طریق هضم در روده ایجاد می‌شود. در نهایت، تغییر در ریزاندام‌واره روده نشان داد که باسیل و سراشیا به‌طور معنی‌داری با رژیم‌های پلی استایرن و پلی اتیلن مرتبط بوده و نشان داد که موم و سبوس اثرات مختلفی را در ریزاندام‌واره روده اصلی تخم حشره تغذیه شده با پلی استایرن و پلی اتیلن می‌گذارند که این نتایج نشانگر این بود که مکمل رژیم غذایی بر خصوصیات فیزیولوژیکی تخم حشره و تجزیه زیستی پلاستیک تأثیر می‌گذارد و ریزاندام‌واره هسته روده را شکل می‌دهد.

۸ کاربرد فنی زیست تخریب پذیری پلی اتیلن و پلی استایرن توسط ارگانسیم در ابعاد ماکرو (کرم‌های تنبریو)

با در نظر گرفتن فرضیات مطرح شده از سه آزمایش مختلف، تماس مستقیم بین نمونه‌های تخم پروانه کرم موم‌خوار و کرم زنده و فیلم‌های پلی اتیلن، سپس تماس بین خمیر همگن کرم زنده و تخم پروانه کرم موم‌خوار و فیلم‌های پلی اتیلن و در نهایت مخلوط خمیر همگن از هر دو گونه با پارافین مایع استفاده شد [۸].

در مشاهدات و آزمایش ابتدایی با تماس مستقیم و انجام

موم‌خوار و اثر مکمل رژیم غذایی مشترک در تخریب پلاستیک را با تغذیه موم یا سبوس گندم تخم حشره به عنوان رژیم غذایی مشترک آزمایش کردند و نتیجه آن کاهش قابل توجهی از جرم پلاستیک بود.

با توجه به تحقیقات اخیر یانگ [۹] می‌دانیم که دو بی‌مهره، کرم‌های زرد رنگ (تخم تنبریو مولیتور) و پروانه کرم موم‌خوار که تخم آن از شان‌های مومی تغذیه می‌کند، توانایی تخریب پلاستیک‌ها را دارند.

کرم‌های گوشتی، فوم‌های پلی استایرن و پلی اتیلن را می‌جویند و می‌بلعند. حداکثر نیمی از پلی اتیلن یا پلی استایرن بلعیده شده می‌تواند در مدت زمان نگه‌داری ۱۵-۱۲ ساعت در روده کرم‌ها پس از دوره سازگاری ۳-۱ هفته هضم شود، اما این روش میزان بقای این کرم‌ها را کاهش می‌دهد. (مکمل موم و سبوس میزان بقا را افزایش اما مصرف پلاستیک را کاهش می‌دهد).

آزمون وزن‌سنجی حرارتی (TGA) بر روی پلاستیک‌های اصلاح‌نشده و فضله حشرات پلاستیک‌خور، تغییر در ساختار شیمیایی را نشان داد و تحت همان فرایند گرمایشی، کاهش وزن پلاستیک‌ها سریع و یک‌مرحله‌ای بود، در حالی که از دست دادن وزن تخم‌های تغذیه‌شده با پلی استایرن و تغذیه با پلی اتیلن با مراحل اضافی، کندتر بود. این تفاوت بیان کرد که

سلول باکتریایی و در نتیجه آزاد کردن دانه‌های پلی‌هیدروکسی آلکانوات است.

سپس با تصفیه بیشتر با استفاده از آب، مواد شوینده و گرما منجر به آزاد شدن تقریباً ۱۰۰٪ دانه پلی‌هیدروکسی آلکانوات خالص شد [۲۰]. (می‌دانیم که پروتئین، لیپید و سایر ناخالصی‌ها با استفاده از مواد شوینده می‌توانند از دانه‌های پلی‌هیدروکسی آلکانوات خارج شوند). این ماده خروجی را در مقایسه با استخراج کلروفورم قرار دادند و دریافتند که هیچ نشانه‌ای از کاهش وزن مولکولی و پراکندگی مولکول‌های پلی‌هیدروکسی آلکانوات وجود ندارد.

سنجش با میکروسکوپ الکترونی و اندازه‌گیری پراکندگی نور دینامیکی نشان داد که دانه‌های پلی‌هیدروکسی آلکانوات از نظر زیستی، ریخت‌شناسی کروی بومی خود را حفظ کرده‌اند. دانه‌های پلی‌هیدروکسی آلکانوات برای تعیین خلوص و خصوصیات آن‌ها در مقایسه با کلروفورم پلی‌هیدروکسی آلکانوات استخراج شده تحت آزمایش‌های متعدد قرار گرفتند.

۱۰ تجزیه زیستی مخلوط‌های پلی‌اتیلن و پلاستیک در کرم‌های پلاستیک‌خور (لارو *Tenebrio Molitor*) و اثرات آن بر میکروبیوم روده

کرم‌های پلاستیک‌خور، همه‌چیزخوارند و تصور محققان بر این است که باکتری (*Pseudomonas Aeruginosa*) های روده آن‌ها نقش مهمی در توانایی انطباق با غذاهای مختلف را دارند [۲۱]. از آنجا که پلی‌اتیلن دارای ساختار شیمیایی کاملاً متفاوتی از پلی‌استایرن است، ارزیابی تجزیه پلی‌اتیلن بیشتر مورد توجه قرار گرفته است. پلی‌اتیلن فاقد حلقه بنزن در واحد مونومر تکرار شده است که می‌تواند تجزیه حاصل را تحت تأثیر قرار دهد. ساختار شیمیایی پلی‌اتیلن نشان‌دهنده ساده‌ترین ستون فقرات کربن به کربن است. بنابراین، توانایی تخریب پلی‌اتیلن نشان می‌دهد که میکروبیوم روده کرم، قادر به تخریب پلاستیک‌های دیگر با نقوش شیمیایی مشابه (به‌عنوان مثال: پلی‌وینیل کلراید یا پلی‌پروپیلن) است.

براندون و همکاران در پژوهش خود [۸] برای تعیین اینکه آیا پلاستیک‌ها به‌طور گسترده‌ای در معرض تجزیه کرم‌های پلاستیک‌خور هستند، تجزیه زیستی پلی‌اتیلن و مخلوط (پلی‌اتیلن+پلی‌استایرن) را ارزیابی کردند. آن‌ها کرم‌ها را تحت تغذیه شش رژیم غذایی آزمایشی: (۱) پلی‌اتیلن، (۲) پلی‌اتیلن+سبوس (۱:۱)، (۳) پلی‌استایرن، (۴) پلی‌استایرن+سبوس (۱:۱)، (۵) پلی‌اتیلن+پلی‌استایرن (۱:۱)، و (۶) سبوس (رژیم غذایی کنترل) قرار دادند و دریافتند که تجزیه زیستی پلی‌اتیلن با نرخ

آزمون FTIR-ATR مشخص شد که این کرم‌ها قادر به جویدن و تجزیه بستر و پوسته ماده مورد نظر هستند. با انجام آزمایش ثقل‌سنجی (آغشته نگه داشتن خمیر همگن روی فیلم پلی‌اتیلن کم‌چگال) و با نگه‌داشتن سطح اکسیژن نسبت به غلظت اتمسفر در دستگاه تخمیر حالت جامد برای امکان تجزیه و تحلیل مداوم و کنترل میزان O_2 و رطوبت نسبی، تغییرات در ترکیب شیمیایی بررسی شد که مهر تأییدی بر مشاهدات قبلی بود.

پارافین مایع با خمیر همگن شده با هر دو کرم زنده و تخم پروانه کرم موم‌خوار مخلوط و همان آزمایش برای پودر پلی‌استایرن و فیلم چسبنده پلی‌اتیلن کم‌چگال تکرار شد و در ضمن، برای جلوگیری از هرگونه فعالیت زیستی، تتراهیدروفوران به نمونه‌ها اضافه شد و پس از آن همه نمونه‌ها با استفاده از FTIR-ATR مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند.

نتایج هر سه آزمایش نشان داد که تخریب پلی‌اتیلن (به معنای جویدن و بلعیدن یا ایجاد سوراخ) توسط هر دو نمونه با نرخ‌های تقریباً مشابهی صورت می‌گیرد. با این حال مطمئناً همه پلی‌اتیلن کم‌چگال جویده شده، هضم نمی‌شود که ممکن است به عمل‌آوری‌های نمونه‌های قبلی در آنتی‌بیوتیک، تأثیر بر رفتار متفاوت ریزاندام‌واره‌ها در محیط خاص یا شرایط تجربی متفاوت، نسبت داده شود.

۹ رویکرد بهبودی زیستی جدید برای PHA با استفاده از کرم تنبریو

پلی‌هیدروکسی آلکانوات‌ها توسط باکتری‌ها و قارچ‌های خاک قابل تجزیه هستند [۱۱]. بنابراین آن‌ها را تبدیل به پلاستیک‌های سازگار با محیط‌زیست می‌کنند. بنابراین، می‌توان انتظار داشت که میکروپلاستیک‌های حاوی پلی‌هیدروکسی آلکانوات به‌طور کامل در محیط، معدنی شوند.

با این حال، هزینه پلی‌هیدروکسی آلکانوات‌ها بیشتر از پلاستیک‌های پتروشیمی است و تولید و استفاده از پلی‌هیدروکسی آلکانوات‌ها در سطح صنعتی به دلیل فرایندهای بازیابی و تصفیه گران هستند بنابراین، مطالعات زیادی به‌منظور به حداقل رساندن هزینه انجام شده است [۱۵].

طی آزمایشی، این باکتری‌ها را به‌عنوان غذا به کرم‌ها دادند. کرم‌ها سلول‌های باکتری کاپریا ویداس نکتار (باکتری فلزدوست) را که به‌صورت یخ‌زده خشک شده بودند، به راحتی مصرف کردند و دانه‌های پلی‌هیدروکسی آلکانوات همراه با برخی پروتئین‌ها و ناخالصی‌های دیگر را به‌صورت مدفوع گلوله‌شکل مایل به سفید دفع و مابقی باکتری‌ها را هضم کردند. این امر نشان می‌دهد سامانه گوارشی کرم تنبریو قادر به هضم مواد

میزان مصرف به ترتیب با $68/11\%$ و $39/70\%$ افزایش یافت. تجزیه و تحلیل سوانگاری نفوذ ژل از لکه‌های لارو *T. Molitor* و *Z. Atratus* تغذیه شده با فقط پلی پروپیلن نشان داد که M_w با $12/1 \pm 0/4$ و $20/4 \pm 0/8$ کاهش یافته است. M_n با $12/1 \pm 0/4$ و $32/0 \pm 1/1$ و $33/8 \pm 1/5$ افزایش یافت. M_z با $61/5 \pm 2/5$ افزایش یافت. کاهش یافت که نشان‌دهنده میزان محدود پلیمر شدن است. توالی یابی ۱۶ *SrRNA* با توان بالا نشان داد که *Citrobacter sp*. *Enterobacter sp* و با رژیم‌های پلی پروپیلن در میکروبیوم روده لاروی *Z. Aratus* همراه بودند؛ در حالی که *Kluyvera* در لاروهای *T. Molitor* غالب بود. نتایج نشان داد که پلی پروپیلن از طریق وابسپارش وابسته به میکروب روده با میکروبیوم‌های متنوع می‌تواند در هر دو گونه *T. Molitor* و *Z. Atratus* تجزیه شود. این مطالعه اولین گزارش در مورد مصرف و تجزیه زیستی پلی پروپیلن توسط دو حشره پلاستیک‌خوار، لاروهای *Tenebrio Molitor* و *Zophobas Atratus* است. نتایج نشان داد که پلیمر پلی پروپیلن بلعیده شده با وزن مولکولی متوسط بالا ($M_n: 109/8$ ؛ $M_w: 356/2$ ؛ $M_z: 765/0$ کیلو دالتون) در روده آن‌ها پلیمری و تخریب شد. لاروی آتراتوس با توجه به تفاوت اندازه آن‌ها، مصرف پلی پروپیلن بالاتری را نسبت به لاروی *T. molitor* با نرخ خاص میانگین و میزان کمتری با وزن مخصوص لارو نشان داد. بر اساس نرخ بقا (SR)، میزان هم‌نوع‌خواری (CRS) و میزان وابسپارش و تجزیه زیستی در تخریب زیستی پلی پروپیلن، در لاروهای *T. Molitor* بیشتر از لاروی *Z. Atratus* به نظر می‌رسد. داده‌ها نشان داد که مکمل رژیم غذایی سبوس میزان مصرف پلی پروپیلن را به‌طور مشابه با مشاهدات قبلی در تجزیه زیستی پلی استایرن و پلی اتیلن کم‌چگال در *T. Obscurus*، *T. Molitor* و *Z. Aratus* افزایش می‌دهد. نتایج تجزیه و تحلیل GPC نشان داد که تجزیه زیستی پلی پروپیلن در هر دو *T. Molitor* و *Z. Atratus* از طریق الگوی وابسپارش محدود یعنی افزایش در M_n و کاهش M_w و M_z از پلیمر پلی پروپیلن باقیمانده در مدفوع انجام شد. این نشان می‌دهد که هر دو لارو ظرفیت تخریب ترجیحی بخشی از پلیمر پلی پروپیلن با وزن مولکولی پایین را دارند.

۱۲ نقش ریزاندام‌واره‌های روده

اگرچه مونومرها و الیگومرهای استایرن به تخریب زیستی حساس هستند، پلی استایرن به دلیل وزن مولکولی بالا و ساختار بسیار پایدار، غیرقابل تجزیه زیستی در نظر گرفته می‌شود. با استفاده از ردیاب پلی استایرن دارای برچسب کربن 14 دریافتیم که میزان تجزیه زیستی پلی استایرن طی مدت زمان ۴ ماه در

قابل مقایسه از پلی استایرن انجام می‌شود. وزن مولکولی (M_n) از باقی‌مانده‌های پلیمری هضم شده در کرم‌های تغذیه شده با پلی اتیلن $40/1 \pm 8/5\%$ و در کرم‌های تغذیه شده با پلی استایرن $12/8 \pm 3/1\%$ کاهش یافت. تجزیه و تحلیل میکروبیوم روده با تعیین توالی نسل بعدی نشان داد که دو (*OTU Kosakonia sp* و *Citrobacter sp*) به شدت با پلی اتیلن و پلی استایرن و همچنین *OTU*های منحصربه‌فرد در هر پلاستیک مرتبط هستند. این نتایج نشان می‌دهد که تجزیه پلاستیک در روده کرم‌ها فقط خاص پلاستیک نیست و سازگاری میکروبیوم روده‌ی این کرم‌ها، تجزیه پلاستیک‌های شیمیایی غیرمشابه را نیز امکان‌پذیر می‌کند. این امر می‌تواند برای برنامه‌های کاربردی مدیریت پسماند تأثیراتی داشته باشد. توانایی کرم‌ها در تخریب پلی اتیلن و پلی استایرن بیشتر نشان‌دهنده فراوانی تجزیه پلاستیک در میان کرم‌ها است.

۱۱ تجزیه زیستی پلی پروپیلن توسط کرم‌های زرد تنبرو و سوپرکرم‌ها از طریق وابسپارش وابسته به میکروب روده

تا به امروز، بیشتر محققان بر تخریب زیستی پلی اتیلن، پلی اتیلن ترفتالات و پلی استایرن متمرکز بودند، در حالی که درباره تخریب زیستی پلی پروپیلن مقالات محدودی وجود دارد [۲۲]. پلیمر پلی پروپیلن، همانند پلی اتیلن، به پلاستیک‌های غیرآبکافت‌شونده تعلق دارد و از هیدروکربن‌هایی با آب‌گریزی بالا تشکیل شده است؛ اما با وجود یک گروه متیل در هر زیرواحد از ستون فقرات پلیمر متفاوت است. تجزیه زیستی ایزوپارافین که از زنجیره‌های جانبی تشکیل شده است، دشوارتر از پارافین n خطی است. بنابراین انتظار می‌رود که پلی پروپیلن، با زنجیره‌های جانبی متیل در هر واحد تکرار شونده، فرایند تجزیه زیستی دشوارتری نسبت به پلی اتیلن داشته باشد [۱۷].

پلی پروپیلن (PE)، پلاستیک‌های پلی‌الفین مبتنی بر فسفیل که به‌طور گسترده در سراسر جهان مورد استفاده قرار می‌گیرد، غیرآبکافت بوده و در برابر تجزیه زیستی به‌عنوان منبع اصلی آلاینده‌های پلاستیکی در محیط، مقاوم است. یانگ و همکارانش در سال ۲۰۲۰ بر روی امکان تجزیه زیستی پلی پروپیلن در لارو دو گونه سوسک تیره مانند کرم‌های زرد و سوپرکرم‌ها با استفاده از پلی پروپیلن با وزن مولکولی M_w ، M_n و M_z به ترتیب $109/8$ ، $356/2$ ، $765/0$ کیلو دالتون مطالعه کردند. این آزمایش‌ها در دو تکرار با لاروی مربوطه (*T. Molitor* ۳۰۰ و *Z. Atratus* ۲۰۰) در دمای 25°C و رطوبت 65% برای مدت زمان ۳۵ روز انجام شد. هنگام تغذیه با فوم پلی پروپیلن به همراه سبوس گندم،

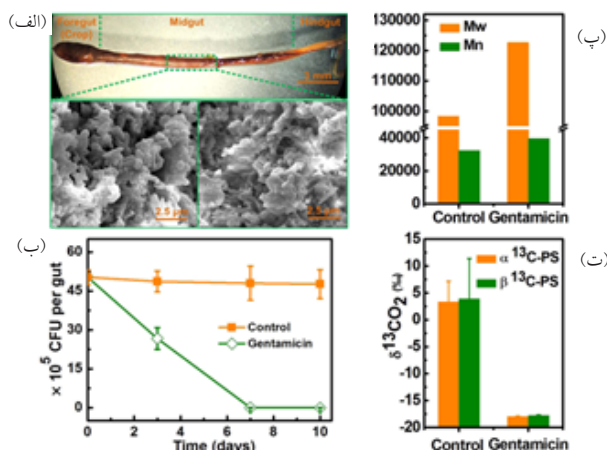
جنتامایسین برای سرکوب باکتری‌های روده کرم‌ها انتخاب شد. در آزمون انجام‌شده تعدادی از کرم‌ها جدا و با جنتامایسین تغذیه شدند و در مقایسه با کرم‌هایی که تغذیه عادی داشتند تا ۷۵ درصد کاهش در قدرت تجزیه استایروفوم از خود نشان دادند. کارایی تخریب را می‌توان مستقیماً با کاهش وزن نمونه اندازه‌گیری کرد. وزن مولکولی و توزیع وزن مولکولی نمونه‌های پلی‌استایرن پس از ۶۰ روز انکوباسیون با استفاده از GPC (سوانگاری ژل تراوا) تعیین شد. کاهش در MWD نشان داد که شکاف/وابسپارش ساختار زنجیره بلند پلی‌استایرن رخ داده و قطعات با وزن مولکولی کمتر در حضور نژاد YT2 تشکیل شده‌اند.

به‌طور خلاصه، کاهش وزن و کاهش وزن مولکولی نمونه‌های پلی‌استایرن از این نتیجه‌گیری حمایت می‌کند که نژاد YT2 که از روده کرم‌ها جدا شده بود، قادر به تخریب پلی‌استایرن است.

۱۳ نتیجه‌گیری

پلی‌استایرن ماده مصنوعی یا پلاستیکی که به عنوان ماده مجزا در بسته‌بندی مواد غذایی مورد استفاده قرار می‌گیرد، بعد از ورود به محل‌های جمع‌آوری زباله یا رها شدن در بیابان‌ها، به چندین صدسال زمان نیاز دارد تا به‌طور کامل تجزیه شود. گزارش‌هایی از مطالعات علمی رسیده است که انواعی از کرم‌ها قادرند، پلی‌استایرن و پلی‌اتیلن را در فقط چند هفته جذب و تجزیه کنند. این ویژگی به نوعی باکتری خاص به نام *Pseudomonas Aeruginosa* در درون کرم مرتبط می‌شود که روی سطح خارجی صفحه‌ای از جنس پلی‌استایرن رشد کرده و آن را تجزیه می‌کند. محققان سپس آنزیم خاص درون باکتری را شناسایی و مجزا کردند. این آنزیم که تولید باکتری درون کرم است در واقع عامل اصلی تجزیه پلی‌استایرن است.

پلی‌اتیلن ماده مصنوعی پرمصرف و از مشکل‌ترین‌ها به لحاظ تجزیه‌پذیری است که از آن در جهان سالیانه بیش از میلیاردها کیسه پلاستیکی با وزنی حدود ۶۰ میلیون تن تولید می‌شود، لارو یا کرم درشت‌اندازی با حدود ۵ سانتی‌متر طول و با نام علمی *Zophobas Atratus* قادر است ماده مصنوعی پلی‌استایرن را تجزیه کند. محققان معتقدند که این کشف می‌تواند ابزار مهمی در جنگ بشر علیه پلاستیک‌ها باشد؛ ماده‌ای که حضور آن در طبیعت خطرات جدی برای انسان‌ها دارد و صدمات جبران‌ناپذیری به محیط‌زیست می‌زند. نتایج این تحقیق می‌تواند درهای تازه‌ای به روی مبارزه جهانی علیه آلودگی پلاستیکی باز کند.



شکل ۴ مشارکت باکتری‌های روده در تخریب استایروفوم. (الف) عکس‌های نوری از ساختار روده ریزاندام‌واره‌های روده که در روده میانی کرم‌های خوراکی استایروفوم‌خوار رشد کرده‌اند. (ب) تعداد کل باکتری‌های قابل مشاهده استخراج شده از کرم‌های خوراکی تغذیه شده با جنتامایسین طی یک دوره انکوباسیون ۱۰ روزه (ب) وزن مولکولی میانگین وزن و وزن مولکولی میانگین عدد استایروفوم بلعیده شده پس از عبور از روده کرم‌های خوراکی تیمار شده با جنتامایسین یا کرم‌های خوراکی شاهد درمان نشده. (ت) مقادیر CO₂ تولید شده توسط کرم‌های خوراکی تیمار شده با جنتامایسین یا کرم‌های خوراکی شاهد درمان نشده.

خاک، لجن فاضلاب، زباله‌های پوسیده یا کود دامی، از ۰/۰۱ تا کمتر از ۰/۳٪ متغیر است [۲۳].

بررسی‌هایی راجع به این که آیا سرکوب آنتی‌بیوتیکی ریزاندام‌واره‌های روده، توانایی کرم‌ها برای تجزیه زیستی پلی‌استایرن و تبدیل به حالت معدنی را مختل می‌کند، انجام شد. همچنین گونه‌های مختلف باکتری تجزیه‌کننده پلی‌استایرن از روده کرم‌ها جداسازی شد تا از نقش ریزاندام‌واره‌های روده کرم‌ها در تخریب زیستی پلی‌استایرن اطلاع حاصل شود. آنتی‌بیوتیک‌ها تأثیر به‌سزایی بر فعالیت باکتری‌های روده دارند. تعداد زیادی از سلول‌های باکتری با زیست‌جوره مختلف در محتوای روده کرم‌ها ساکن هستند. این مشاهدات نشان داد که روده میانی کرم‌ها ریزاندام‌واره‌های متنوعی را در خود جای داده است. از جمله آنتی‌بیوتیک‌های موثر، آمپی‌سیلین، جنتامایسین و تتراسایکلین هستند. در میان این آنتی‌بیوتیک‌ها، جنتامایسین بهترین توانایی را برای جلوگیری از رشد باکتری‌های روده نشان می‌دهد. جنتامایسین به‌عنوان آنتی‌بیوتیک ضد باکتری شناخته شده است که باعث قطع سنتز پروتئین می‌شود [۲۱]. در نتیجه،

مراجع

- Jambeck J.R., Geyer R., Wilcox C., Siegler T.R., Perryman M., Andrady A., Narayan R., Law K.L., Plastic Waste Inputs from Land Into the Ocean, *Science*, 347,768–771, **2015**.
- Fendall L.S., Sewell M.A., Contributing to Marine Pollution By Washing Your Face: Microplastics In Facial Cleansers, *Marine Pollution Bulletin*, 58, 1225–1228, **2009**.
- Jiang S., Su T., Zhao J., Wang Z., Biodegradation of Polystyrene by *Tenebrio Molitor*, *Galleria Mellonella*, and *Zophobas Atratus* Larvae and Comparison of Their Degradation Effects, *Polymers*, 13, 3539, **2021**.
- Wu W.M., Yang J. Criddle S.C., Microplastics Pollution and Reduction Strategies. *Front. Environ. Sci. Eng.* 11, 6-DOI 10.1007/S11783-017-0897-7, **2017**.
- Yang Y., Yang J., Wu W.M., Zhao J., Song Y.L., Gao L.C., Yang R.F., Jiang L., Biodegradation and Mineralization of Polystyrene by Plastic-Eating Mealworms: Part 1. Chemical and Physical Characterization and Isotopic Tests, *Environ. Sci. Technol.* 49 12080- 12086, **2015**.
- Kyu-Jin Jeong, Yuri Heo, Jun-Ran Kim, Ki-Jeong Hong, Pictorial Keys and Molecular Analysis of the Two Newly Recorded Species of Genus *Tribolium* (Coleoptera: Tenebrionidae), **2022**.
- Roberson W.H., Urban Insects and Arachnids, A Handbook of Urban Entomology. 554 Cambridge University Press. Cambridge, UK, Pp.126-127, **2005**.
- Brandon A.M., Gao S.H., Tian R., Ning D., Yang S.S., Zhou J., Wu W.M., Criddle C.S., Biodegradation of Polyethylene and Plastic Mixtures in Mealworms (Larvae of *Tenebrio Molitor*) and Effects on the Gut Microbiome. *Environ Sci Technol.*, 52, 6526-6533, **2018**.
- Yang Y, Yang J, Wu W.M., Zhao J., Song Y.L., Gao L.C., Yang R.F and Jiang L., Biodegradation and Mineralization of Polystyrene by Plastic-Eating Mealworms: Part 2. Role of Gut Microorganisms, *Environ. Sci. Technol.*, 49 12087-12093, **2015**.
- Yang Sh., Brandon A., Christopher J., Flanagan A., Yang J., Ning D., Yang Cai Sh., Fan H., Wang Zh., Ren J., Benbow E., Ren N., Robert M. Biodegradation of Polystyrene Wastes in Yellow Mealworms (Larvae of *Tenebrio Molitor* Linnaeus): Factors Affectin Biodegradation Rates and the Ability of Polystyrene-Fed Larvae to Complete their Life Cycle, *Chemosphere*, ISSN 0045-6535, **2017**.
- Boyandin A.N., Prudnikova S.V., Karpov V.A., Ivonin V.N., Đỗ N.L., Nguyễn T.H., Lê T.M.H., Filichev N.L., Levin A.L., Filipenko M.L., Microbial Degradation of Polyhydroxyalkanoates in Tropical Soils, *International Biodeterioration & Biodegradation*, 83, 77-84, **2013**.
- Peng B.Y., Su Y., Chen Z., Chen J., Zhou X., Benbow M.E., Criddle C.S., Wu W.M., Zhang Y., Biodegradation of Polystyrene by Dark (*Tenebrio Obscurus*) and Yellow (*Tenebrio Molitor*) Mealworms (Coleoptera: Tenebrionidae), *Environ. Sci. Technol.*, 53, 5256–5265, **2019**.
- Bresan S., Sznajder A., Hauf W., Forchhammer K., Pfeiffer D., Jendrossek D., Polyhydroxyalkanoate (PHA) Granules Have No Phospholipids. *Scientific Reports*, 6, **2016**.
- Yang S.S., Ding M.Q., He L., Zhang C.H., Li Q.X., Xing D.F., Cao G.L., Zhao L., Ding J., Ren N.Q., Wu W.M., Biodegradation of Polypropylene by Yellow Mealworms (*Tenebrio Molitor*) and Superworms (*Zophobas Atratus*) Via Gut-Microbe-Dependent Depolymerization, *Sci Total Environ.* 2020.
- Santo M., Weitsman R., Sivan A., The Role of the Copper-Binding Enzyme–Laccase–In the Biodegradation of Polyethylene by the Actinomycete *Rhodococcus Ruber*, *Int. Biodeterior; Biodegrad.* 84, 204-210, **2013**.
- Jeon H.J., Kim M.N., Isolation of Mesophilic Bacterium for Biodegradation of Polypropylene, *Int. Biodeter. Biodegr.* 115, 244-249. **2016**.
- Bombelli P., Howe C.J., Bertocchini F., Polyethylene Bio-Degradation by Caterpillars of the Wax Moth *Galleria Mellonella*, *Curr. Biol.*, 27, R283–R293, **2017**.
- Riudavets J., Salas I., Pons M.J., Damage Characteristics Produced by Insect Pests in Packaging Film, *J. Stored Prod. Res.*, 43, 564–570, **2007**.
- Farrelly T.A., Shaw I.C., Polystyrene As Hazardous Household Waste, in: Mmereki, D. (Eds), Household Hazardous Waste Management, *Intechopen*, London, 45–60, **2017**.
- Wang Y., Zhang Y., Investigation of Gut-Associated Bacteria in *Tenebrio Molitor* (Coleoptera: Tenebrionidae) Larvae Using Culture-Dependent and DGGE Methods, *Ann. Entomol. Soc. Am.*, 108, 941–949. **2015**.
- Raddadi N., Fava F., Biodegradation of Oil-Based Plastics in the Environment: Existing Knowledge and Needs of Research and Innovation, *Sci. Total. Environ.*, 679, 148-158. **2019**.
- Kundungal H., Gangarapu M., Sarangapani S., Patchaiyap-

pan A., Devipriya S.P., Role of Pretreatment and Evidence for the Enhanced Biodegradation and Mineralization of Low-Density Polyethylene Films by Greater Waxworm, *Environ Technol.*, Feb, **2021**.

23. Kundungal H., Gangarapu M., Sarangapani S., Patchaiyap-

pan A., Devipriya S.P., Efficient Biodegradation of Polyethylene (HDPE) Waste by the Plastic-Eating Lesser Waxworm (Achroia Grisella), *Environ. Sci. Pollut. R.*, 26, 18509–18519, **2019**.