



فصلنامه علمی-ترویجی فناوری پلیمر ایران

فصلنامه علمی-ترویجی، سال هفتم، شماره ۲
شماره پیاپی ۲۶، تابستان ۱۴۰۱، بها، ۲۵۰۰۰۰ ریال
Iran Polymer Technology; Research and Development



شناسنامه:

فهرست مطالب:

صاحب امتیاز:

انجمن علوم و مهندسی پلیمر ایران

مدیر مسئول:

دکتر مهرداد کوكبی

سردبیر:

دکتر محمدرضا مقبلی

دبیر اجرایی:

مهندس سیده آرزو میرقاسمی

ویراستار:

دکتر زهره دلجوی کجباد

نشانی دفتر نشریه:

تهران، صندوق پستی ۱۱۲-۱۴۹۷۵

تلفن و دورنگار: ۴۴۷۸۷۰۶۰

پست الکترونیکی: irdpt.ips@gmail.com

پایگاه اینترنتی: www.irdpt.ir

چاپ و صحافی:

کانون تبلیغات معاصر

مقالات علمی

مروری بر سازوکار عملکرد کرم‌های پلاستیک‌خوار ... ۵

سید امیرحسین موسوی، دکتر رضا جهانمردی

مروری بر خوداجتماعی پتیدها و کاربردهای آن ... ۱۷

سهیلا امام‌یاری

مروری بر سازوکار، ساختار و کاربرد پلیمرهای ... ۲۷

حمیدرضا حیدری

مروری بر روش‌های نیمه تجربی تعیین مشخصه ... ۳۷

زهره خوبی آرانی

شناخت و تبیین اصطلاحات ... بخش اول؛ معرفی و تاریخچه .. ۴۵

سیدحمیدرضا صباغی، علی عباسیان

شناخت و تبیین اصطلاحات ... بخش دوم؛ اصطلاحات ... ۵۱

سیدحمیدرضا صباغی، علی عباسیان

... تبلیغات

۶۸

دارای مجوز رسمی از وزارت علوم، تحقیقات و فناوری

مسئولیت صحت مطالب بر عهده نگارنده است.

اعضای هیئت تحریریه

شروین احمدی

دانشیار پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران
Sh.Ahmadi@ippi.ac.ir

فرامرز افشار طارمی

استاد دانشگاه صنعتی امیرکبیر
Afshar@aut.ac.ir

محمد حقیقت کیش

استاد دانشگاه صنعتی امیرکبیر
Mhkish@aut.ac.ir

اعظم رحیمی

استاد پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران
A.rahimi@ippi.ac.ir

مهدی رزاقی کاشانی

دانشیار دانشگاه تربیت مدرس
Mehdi.razzaghi@modares.ac.ir

فاطمه رفیع منزلت

دانشیار دانشگاه اصفهان
Frafiamanzelat@sci.ui.ac.ir

احمد رضائی

استاد دانشگاه صنعتی شریف
Ramazani@sharif.edu

اکبر شجاعی

استاد دانشگاه صنعتی شریف
Akbar.shojaei@sharif.edu

محمد حسین نوید فامیلی

استاد دانشگاه تربیت مدرس
Nfamili@modares.ac.ir

فرهنگ عباسی

استاد دانشگاه صنعتی سهند تبریز
F.abbasi@sut.ac.ir

مهرداد کوکبی

استاد دانشگاه تربیت مدرس
Mehrir@modares.ac.ir

نادره گلشن ابراهیمی

دانشیار دانشگاه تربیت مدرس
Ebrahimn@modares.ac.ir

فاطمه گوهر بی

دانشیار دانشگاه صنعتی امیرکبیر
Goharpey@aut.ac.ir

محمد رضا مقبلی

استاد دانشگاه علم و صنعت
Mr_moghbali@iust.ac.ir

حمید میرزاده

استاد دانشگاه صنعتی امیرکبیر
Mirzadeh@aut.ac.ir

مهدی نکومنش حقیقی

استاد پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران
M.Nekoomanesh@ippi.ac.ir

ابراهیم واشقانی فراهانی

استاد دانشگاه تربیت مدرس
Evf@modares.ac.ir



عنوان و چکیده مقاله های این نشریه در پایگاه استنادی علوم جهان اسلام (ISC) درج می شود.

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 CO₂ 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 زیاده‌ها، 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 موربانه 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 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].

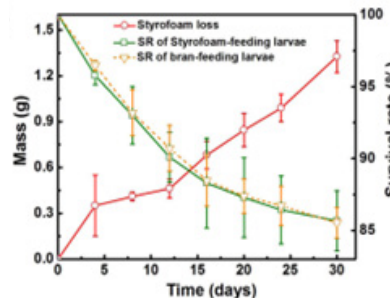
یانگ و براندون در سال ۲۰۱۸ تخریب پلی‌استایرن را با استفاده از قراردادهایی از جمله تعادل جرم پلی‌استایرن برای تعیین میزان خاص تخریب آن، سوانگاری نفوذ ژل (GPC) برای ارزیابی تغییرات وزن مولکولی و طیف‌سنجی تبدیل فوریه فرسرخ (FTIR) از باقی‌مانده‌های فضولات تخم‌حشره برای شناسایی تغییرات شیمیایی ناشی از هضم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

سوانگاری ژل تراوایی (GPC) برای ارزیابی تغییرات در وزن مولکولی و طیف‌سنجی فرسرخ (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 می‌خورند 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

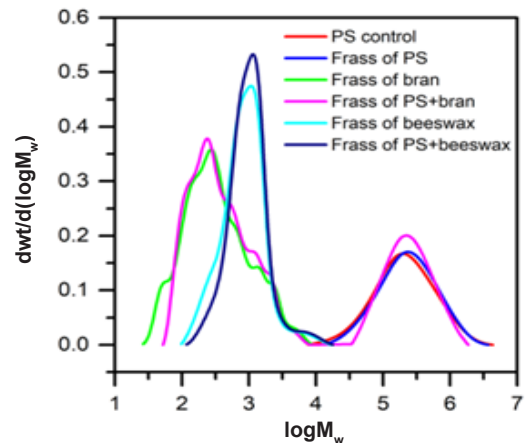
از روده تغییر کرده است یا خیر، سوپرکرم‌های استایروفوم‌خور جمع‌آوری و برای کارایی در بازده تبدیل فایر فوم خورده شده به CO_2 ، مجموعه‌ای از آزمایش‌های تنفسی روی آن‌ها انجام شد. نتایج نشان داد که سوپرکرم‌ها، استایروفوم را به‌عنوان رژیم غذایی به میزان $0/58$ (میلی‌گرم در روز به ازای هر سوپرکرم) خوردند که 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 نهنفگی 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) به‌عنوان 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.

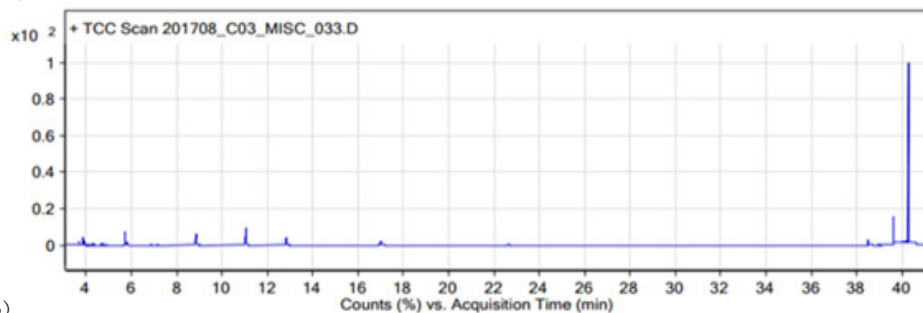
در ابتدای راه روش‌های زیادی برای تخریب زباله‌های پلی اتیلن از جمله دفن زباله، سوزاندن، تصفیه شیمیایی و تخریب حرارتی آزموده شد [۱۳] اما این روش‌ها برای محیط‌زیست خطرناک بود و اثرات جبران‌ناپذیری بر موجودات زنده داشت. به همین منظور محققان با تحقیقات بر روی گونه‌ای از میکروب‌ها فهمیدند که چندین باکتری و 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.

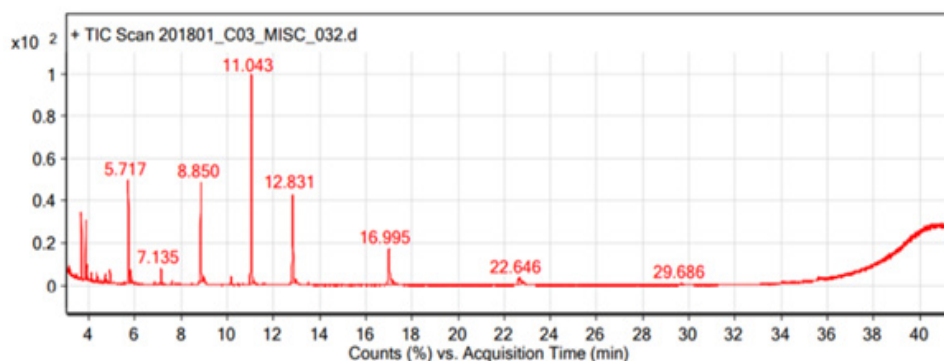
۶ تجزیه زیستی و معدنی‌سازی پلی اتیلن با چگالی کم (LDPE) در کرم مومی بزرگ

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 ثقل سنجی (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 $20/4 \pm 0/8$ و $9/0 \pm 0/4$ کاهش یافته است. M_n با $12/1 \pm 0/4$ و $32/0 \pm 1/1$ و $33/8 \pm 1/5$ با M_z افزایش یافت. $61/5 \pm 2/5$ افزایش یافت. کاهش یافت که نشان‌دهنده میزان محدود پلیمر شدن است. توالی یابی ۱۶ SrRNA با توان بالا نشان داد که Citrobacter sp. و Enterobacter sp. 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 Zophobas Atratus و Tenebrio Molitor 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. Molitor، T. Obscurus 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 OTU‌های 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،

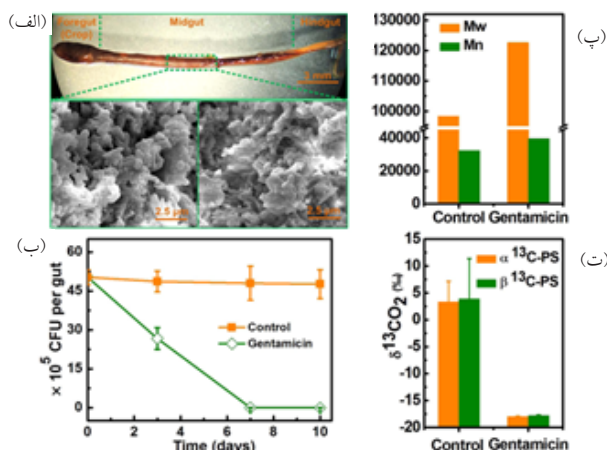
جنتامایسین برای سرکوب باکتری‌های روده کرم‌ها انتخاب شد. در آزمون انجام‌شده تعدادی از کرم‌ها جدا و با جنتامایسین تغذیه شدند و در مقایسه با کرم‌هایی که تغذیه عادی داشتند تا ۷۵ درصد کاهش در قدرت تجزیه استایروفوم از خود نشان دادند. کارایی تخریب را می‌توان مستقیماً با کاهش وزن نمونه اندازه‌گیری کرد. وزن مولکولی 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 (Achromia Grisella), *Environ. Sci. Pollut. R.*, 26, 18509–18519, **2019**.

مروری بر خوداجتماعی پتیدها و کاربردهای آن

سهیلا امام‌پاری*

زنجان، دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان، دانشکده فیزیک

چکیده ...

خوداجتماعی مولکولی (Molecular Self-assembly) گردهم‌آبی آبی مولکول‌ها یا درشت‌مولکول‌ها برای تشکیل ساختارهای ابرمولکولی به وسیله‌ی برهم‌کنش‌های غیرکوالانسی است. این پدیده‌ی مهم موضوع تحقیقاتی میان‌رشته‌ای است که ظرفیت‌های کاربردی فراوانی در حوزه‌های مختلف دارد. یکی از مهم‌ترین نیروهای پیشران (Driving Forces) خوداجتماعی مولکولی وجود خاصیت دومیحیطدوستی (Amphiphilicity) در مولکول‌های سامانه است که می‌تواند سبب جدایی میکروفاز شود و نانوساختارهای پیچیده و پایداری به وجود آورد. پتیدهای (Peptides) خوداجتماع یکی از مهم‌ترین دسته‌ها در میان انواع مولکول‌های با قابلیت خوداجتماعی هستند. در سامانه‌های حاوی این پتیدها رفتار غنی خوداجتماعی مشاهده می‌شود که به دلیل حضور هم‌زمان برهم‌کنش‌های مختلف (مانند برهم‌کنش‌های الکترواستاتیکی (Electrostatic)، آب‌گریزی (Hydrophobicity) و پیوند هیدروژنی) در سامانه متشکل از آن‌ها و تنوع پیکربندی مولکولی آن‌هاست. درک بهتر خوداجتماعی پتیدها سبب طراحی بهتر آن‌ها برای تولید نانوساختارهای کاربردی‌تر خواهد شد. در این مقاله‌ی مروری، ابتدا خوداجتماعی پتیدها و اهمیت مطالعه‌ی آن بیان می‌شود. سپس چند نمونه از پتیدهایی که خوداجتماعی آن‌ها به دلایل مختلف مورد توجه دانشمندان این حوزه است، مانند پتیدهای حلقوی، پتیدهای دومیحیطدوست، پتیدهای مکمل یونی (Ionic Complementary Peptides) و چند نمونه‌ی دیگر، معرفی می‌شوند. همچنین برخی کاربردها و مزایای مهم خوداجتماعی پتیدها، که شامل ساخت‌وساز در ابعاد نانومتری، مهندسی بافت (Tissue Engineering)، انتقال دارو (Drug Delivery)، استفاده به عنوان حسگرهای زیستی و مطالعه‌ی بیماری‌های صورتبندی (Conformational Disease) است، مرور می‌شوند.

واژه‌های کلیدی:

خوداجتماعی مولکولی،
پتید،
پلیمر،
جدایی میکروفاز،
نانوساختار

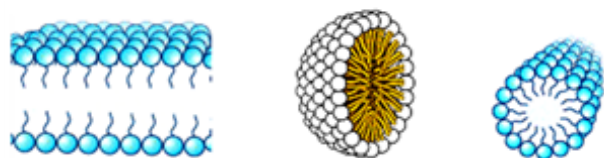
*پست الکترونیکی مسئول مکاتبات:

emamyari@iasbs.ac.ir

۱ مقدمه

خوداجتماعی مولکولی فرایندی است که طی آن مجموعه‌ای از مولکول‌ها یا درشت‌مولکول‌ها توسط برهم‌کنش‌های غیرکوالانسی در ساختاری پیچیده‌تر گرد هم می‌آیند و اجتماعات اَبَرمولکولی تشکیل می‌دهند، بدون این که هدایت خارجی بر روی سامانه اعمال شده باشد. از برهم‌کنش‌هایی که می‌توانند سبب پدیده‌ی خوداجتماعی شوند می‌توان به برهم‌کنش‌های الکترواستاتیک، وان‌دروالس (Van der Waals)، آب‌گریزی و پیوند هیدروژنی اشاره کرد. مثال‌های بیشماری از پدیده‌ی خوداجتماعی مولکولی وجود دارد. برای نمونه، مولکول‌های پروتئینی که در ابتدا به شکل زنجیره‌های خطی در درون سلول ساخته می‌شوند، به ساختار سه‌بعدی پیچیده تا می‌خورند تا کارکرد مخصوص به خود را در سلول ایفا کنند. در مقیاس بزرگ‌تر، اجتماعاتی از پروتئین‌ها و اسیدهای نوکلئیک (Nucleic Acids) در سلول‌های زنده تشکیل می‌شوند و به این وسیله وظایف معینی را می‌توانند انجام دهند [۱]. نمونه‌ای دیگر از این پدیده را می‌توان در موادی که از اختلاط آب با مولکول‌های دوگانه‌دوست تشکیل می‌شوند مشاهده کرد. منشأ این نوع خوداجتماعی وجود دو نوع تمایل متفاوت در بخش‌های مختلف مولکول برای برهم‌کنش با مولکول‌های آب است و تنها نیروی پیش‌برنده برای انباشتگی مولکول‌ها نیاز سامانه برای کمینه کردن انرژی آزاد (Free Energy) است. هنگامی که چنین مولکول‌هایی با غلظت کافی در آب حل می‌شوند، تلاش سامانه برای برآورده کردن این دو نوع تمایل سبب به وجود آمدن مجموعه‌ای غنی از ساختارهای ممکن مانند ساختارهای کروی، استوانه‌ای، دولایه‌ای، میسل (Micelle) و وزیکول (Vesicle) می‌شود [۲].

طرحواره‌ی چند نمونه از این ساختارها که به وسیله‌ی مولکول‌هایی با یک سر آب‌دوست (Hydrophilic) و یک دم آب‌گریز تشکیل می‌شوند در شکل ۱ نشان داده شده‌اند. به دلیل شباهت این ساختارها به غشاهای زیستی، می‌توان از آن‌ها به عنوان محیطی برای مطالعه‌ی پدیده‌هایی مانند حرکت فلیپ-فلاپ (Flip-Flop) [۳] و هم‌جوشی غشا (Membrane Fusion)



شکل ۱ سه نمونه از حالت‌های مختلف خوداجتماعی مولکول‌های دوگانه‌دوست در محیط آبی. دولایه‌ای (الف)، کروی (ب) و استوانه‌ای (پ).

[۴] استفاده کرد. وزیکول‌ها می‌توانند مدلی ساده برای مطالعه‌ی سلول نیز باشند [۵].

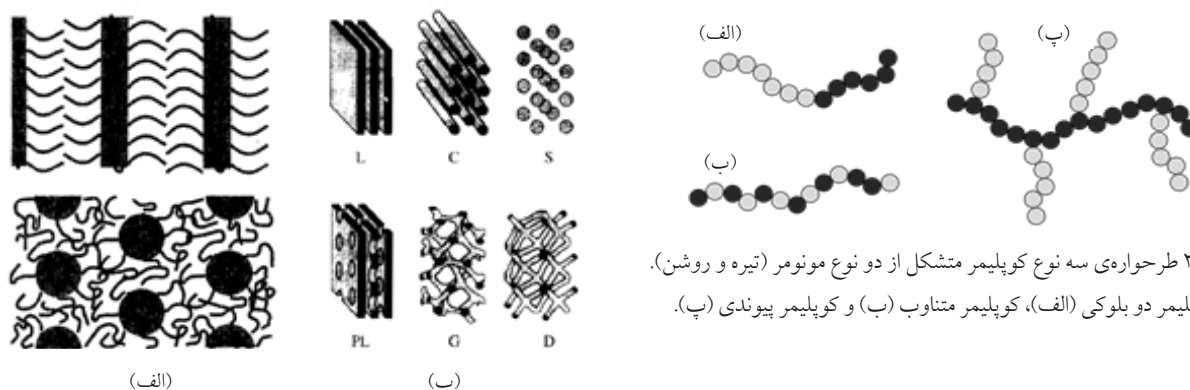
خوداجتماعی مولکولی به چند دلیل مورد علاقه و دارای اهمیت است. اول این که، این پدیده در زندگی موجودات اهمیت فراوانی دارد. سلول‌های بدن موجودات زنده حاوی تعداد زیادی از ساختارهای پیچیده مانند غشاهای لیپیدی، پروتئین‌های تاخورد، اجتماعات پروتئینی، ماشین‌های مولکولی و دیگر ساختارها است که به وسیله‌ی فرایند خوداجتماعی تشکیل می‌شوند. دوم این که، به وسیله‌ی این پدیده می‌توان موادی با ساختارهای منظم تولید کرد. بلورهای مولکولی و بلورهای مایع مثال‌هایی از این مواد هستند. سوم این که، خوداجتماعی می‌تواند یکی از روش‌های تولید نانوساختارها برای کاربردهای مختلف باشد. بنابراین خوداجتماعی در محدوده‌ی وسیعی از رشته‌ها مانند شیمی، فیزیک، زیست‌شناسی، علم مواد و نانوفناوری دارای اهمیت و هدف مطالعه‌ی بسیاری از دانشمندان است [۶].

در این مقاله قصد داریم مروری کلی بر مفهوم خوداجتماعی پپتیدها و کاربردهای مهم آن داشته باشیم. همان‌طور که در ادامه‌ی مقاله اشاره خواهد شد، پپتیدها در واقع پلیمرهایی کوتاه با طول‌هایی در حدود چند نانومتر هستند. بنابراین در ابتدا خوداجتماعی مولکولی در سامانه‌های پلیمری توضیح داده می‌شود. سپس، خوداجتماعی مولکولی پپتیدها و چند نمونه از کارهایی که با پپتیدهای خوداجتماعی پرکاربرد انجام شده است معرفی می‌شوند. پس از آن برخی از مزایا و کاربردهای مهم خوداجتماعی پپتیدها بیان و توضیح داده می‌شوند. بحث و نتیجه‌گیری از مباحث گفته شده نیز در آخر مقاله آورده می‌شود.

۲ خوداجتماعی مولکولی در سامانه‌های پلیمری

مولکول‌های پلیمری محلول در آب در صورتی که از دو یا چند نوع مونومر با خواص شیمیایی مختلف، که رفتارهای متفاوتی را در برهم‌کنش با مولکول‌های آب نشان می‌دهند، تشکیل شده باشند می‌توانند خواصی مشابه مولکول‌های دوگانه‌دوست داشته باشند. به این نوع از پلیمرها کوپلیمر (Copolymer) گفته می‌شود. در کوپلیمرها بخش‌های پلیمری با ویژگی‌های شیمیایی متفاوت به وسیله‌ی پیوند کوالانسی به یکدیگر متصل شده‌اند [۲]. از میان انواع مختلف کوپلیمرها، طرحواره‌ی سه نمونه از آن‌ها که دارای دو نوع مونومر مختلف هستند، در شکل ۲ نشان داده شده‌اند (کوپلیمرهای دو بلوکی، متناوب و پیوندی).

یکی از نتایج پدیده‌ی خوداجتماعی مولکولی در برخی از سامانه‌های نرم ایجاد جدایی میکروفاز در سامانه و تشکیل نانوساختارهای متناوب است. نمونه‌هایی از این جدایی میکروفاز



شکل ۲ طرحواره‌ی سه نوع کوپلیمر متشکل از دو نوع مونومر (تیره و روشن). کوپلیمر دو بلوکی (الف)، کوپلیمر متناوب (ب) و کوپلیمر پیوندی (پ).

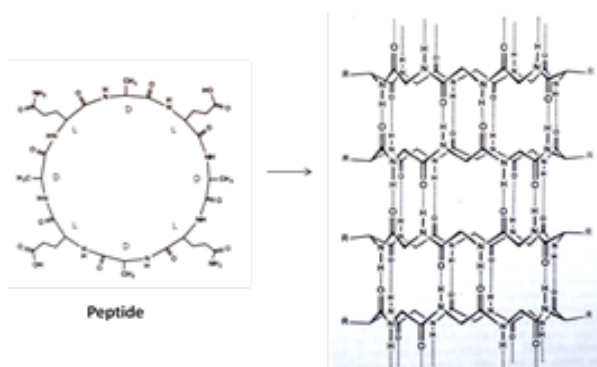
شکل ۳ ساختار لایه‌ای (شکل بالا در (الف)) و ساختاری با فصل مشترک‌های انحنادار (شکل پایین در (الف)). برخی از ساختارهای ممکن در سامانه‌های حاوی کوپلیمر (ب) که عبارتند از ساختارهای لایه‌ای (L)، استوانه‌ای (C)، کروی (S)، لایه‌ای منفذدار (PL)، ژیروئید (G) و الماس دوگانه (D) [۲].

نیز می‌تواند کمک فراوانی در درک بهتر سازوکار خوداجتماعی مولکولی در این گونه سامانه‌ها داشته باشد.

۳ خوداجتماعی مولکولی پپتیدها

پپتیدها پلیمرهای کوتاهی هستند که از به هم پیوستن اسیدهای آمینه (Amino Acids) به یکدیگر به وسیله پیوندهای پپتیدی تشکیل می‌شوند. در واقع پپتیدها پلیمرهای کوتاهی از جنس پروتئین هستند که مونومرهای تشکیل‌دهنده آن‌ها اسیدهای آمینه هستند. بیست نوع اسیدآمینه برای تشکیل پپتیدها و پروتئین‌ها وجود دارند که ممکن است آب‌گریز و یا آب‌دوست باشند. برخی از آن‌ها بار الکتریکی دارند و برخی دیگر خنثی هستند. پپتیدهای حاصل نیز با توجه به اسیدآمینه‌های تشکیل‌دهنده خود می‌توانند این خواص را در طول زنجیره‌ی خود داشته باشند. پپتیدها همانند پروتئین‌ها به دلیل داشتن دنباله‌ای از اسیدهای آمینه دارای ساختار اولیه (Primary Structure) هستند. بعضی از آن‌ها نیز ساختار ثانویه (Secondary Structure) و ساختار سوم (Tertiary Structure) دارند، ولی به دلیل تکرار شده بودن آن‌ها نمی‌توان ساختار چهارم (Quaternary Structure) را از آن‌ها انتظار داشت. برای نمونه ساختار پپتید ضد میکروبی به نام پپتید BMAP-27 که ۲۷ اسیدآمینه دارد، در شکل ۴ نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، ساختار ثانویه‌ی این پپتید از دو ناحیه‌ی مارپیچی تشکیل شده است. اغلب پپتیدهای ضد میکروبی حاوی اسیدآمینه‌های به شدت آب‌گریز هستند و علاوه بر داشتن خاصیت ضد میکروبی، به‌عنوان یکی از گزینه‌ها برای تخریب

را در محلول‌ها یا مذاب‌های کوپلیمری می‌توان مشاهده کرد [۷]. جدایی میکروفاز مشابه اتفاقی است که در اختلاط آب و روغن می‌افتد. اما در کوپلیمرها به دلیل متصل بودن بلوک‌های مختلف پلیمر به یکدیگر به وسیله پیوند کوالانسی جدایی فاز ماکروسکوپی مانند آنچه در آب و روغن است به وجود نمی‌آید و تنها نواحی با ابعاد نانومتری حاصل می‌شود. برای مثال کوپلیمرهای دو بلوکی (شکل ۲ (الف) را ببینید) که دارای بلوک‌های هم‌اندازه هستند ساختارهای لایه‌ای تولید می‌کنند. حال اگر طول دو بلوک کوپلیمر به یک اندازه نباشد، بلوک‌های کوچک‌تر در کنار یکدیگر در فضاهایی به شکل کره و بلوک‌های بزرگ‌تر در فضای میان کره‌ها قرار می‌گیرند. در شکل ۳ (الف) این ساختارها نشان داده شده‌اند. بنابراین با تغییر نسبت طول دو بلوک کوپلیمر می‌توان حالت‌های تعادلی سامانه را تغییر داد [۲]. برای کوپلیمرهایی که دو بلوک با ویژگی‌های بسیار متفاوت از یکدیگر دارند با افزایش تفاوت طول در بلوک‌های پلیمر اشکال متنوعی مشاهده می‌شوند. به این ترتیب که در صورت برابر بودن طول دو بلوک فاز لایه‌ای تشکیل می‌شود و با افزایش تفاوت طول بلوک‌ها به ترتیب فازهای استوانه‌ای، کره‌ای (ابتدا در یک شبکه‌ی BCC و سپس در ساختار تنگ‌پکیده (Close Packed))، لایه‌ای منفذدار، ژیروئید (Gyroid) و الماس دوگانه تشکیل می‌شوند [۲]. اشکال مربوط به این فازها نیز در شکل ۳ (ب) نشان داده شده است. مسئله‌ی جدایی میکروفاز در کوپلیمرهای مختلف با ترکیب‌های مولکولی متفاوت بلوک‌ها تا کنون بارها به صورت تجربی یا نظری یا به وسیله شبیه‌سازی‌های رایانه‌ای مورد مطالعه قرار گرفته است [۷ و ۸]. البته مطالعه‌ی نظری خوداجتماعی و تشکیل فاز در سامانه‌های حاوی کوپلیمرها در مقایسه با مطالعات تجربی آن‌ها بسیار اندک است. برای مطالعه‌ی نظری این‌گونه سامانه‌ها و درک رفتار دسته‌جمعی پلیمرها با نوشتن انرژی آزاد کل سامانه و کمینه کردن آن نسبت به عوامل موجود در مسئله می‌توان نمودار فاز سامانه را به دست آورد. شبیه‌سازی‌های رایانه‌ای به روش‌های گوناگون

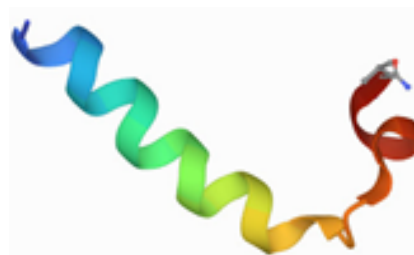


شکل ۵ پپتید حلقوی (چپ) و نحوه‌ی قرارگیری پپتیدها روی یکدیگر برای تشکیل نانولوله‌هایی با دو انتهای باز (راست) [۱۰].

از ساده‌ترین پپتیدها مانند دی‌پپتیدها، که تنها از دو اسیدآمینه تشکیل شده‌اند، نیز مشاهده می‌شود [۱۲]. در واقع، یکی از اهداف مطالعه‌ی خوداجتماعی دی‌پپتیدها (Dipeptides)، طراحی آن‌ها برای تشکیل هیدروژل‌های (Hydrogels) سه‌بعدی با کاربرد در مهندسی بافت‌های نرم است. علاوه بر پپتیدهای حلقوی و دی‌پپتیدها، دسته‌های مختلفی از پپتیدها نیز وجود دارند که گروه‌های زیادی به خوداجتماعی آن‌ها و نانوساختارهای تشکیل شده توسط آن‌ها علاقه‌مند هستند. چند نمونه از این پپتیدها در ادامه معرفی می‌شوند.

۳-۱ پپتیدهای دومحیط‌دوست

پپتید-دومحیط‌دوست‌ها PA گروه جالب‌توجهی از پپتیدها را تشکیل می‌دهند و شامل یک بخش پپتیدی آب‌دوست هستند که به وسیله‌ی پیوند کوالانسی به یک زنجیره آلکیل، که بخش آب‌گریز را تشکیل می‌دهد، متصل می‌شود. مطالعات گسترده‌ای برای فهم پدیده‌ی خوداجتماعی در این گروه از پپتیدها و تولید انواع نانوساختارهای کاربردی توسط آن‌ها انجام گرفته است. برای مثال، هارتگرینک و همکارانش PA با پنج ناحیه‌ی متفاوت که در شکل ۶ نشان داده شده است، ساخته و آن را مطالعه کردند [۱۳]. ناحیه‌ی یک، زنجیره‌ی آلکیل با شانزده کربن است که بخش آب‌گریز را تشکیل می‌دهد. ناحیه‌ی دو، زنجیره‌ی متشکل از چهار اسیدآمینه‌ی سیستئین برای تشکیل پیوندهای دی‌سولفیدی بین زنجیره‌ها است که ساختارهای تشکیل شده را پایدار می‌سازد. ناحیه‌ی سه، شامل سه گلیسین است که پل انعطاف‌پذیری را در طول زنجیره تشکیل می‌دهد. ناحیه‌ی چهار، سرین فسفریله شده برای برهم‌کنش با یون‌های کلسیم است و در نهایت ناحیه‌ی پنج گروه چسبنده‌ی سلول است.

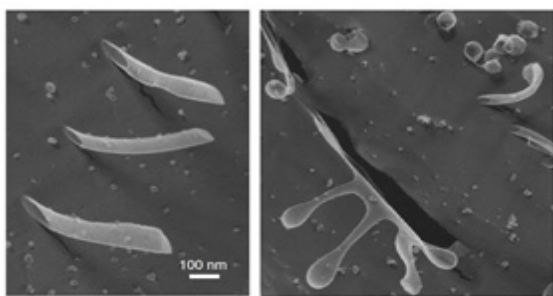


شکل ۴ ساختار سه بعدی پپتید ضد میکروب BMAP-۲۷ که از بانک اطلاعات پروتئین (PDB) گرفته شده است. این پپتید از ۲۷ اسیدآمینه تشکیل شده است.

سلول‌های سرطانی نیز مطرح هستند [۹].

پپتیدها دارای تنوع زیادی در ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خود هستند. مقادیر زیادی از آن‌ها به آسانی و با هر دنباله‌ی دلخواه از اسیدهای آمینه در آزمایشگاه ساخته می‌شوند و قابلیت تغییر به وسیله‌ی عناصر دیگر برای کاربردهای مختلف را دارند. به همین دلیل در سال‌های اخیر توجه دانشمندان را به خود جلب کرده و در بسیاری از آزمایش‌ها و مطالعات خوداجتماعی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. از آنجا که زنجیره‌های پپتیدی می‌توانند از ترکیبی از اسیدهای آمینه‌ی باردار و آب‌گریز تشکیل شوند، سامانه‌های حاوی پپتیدها می‌توانند برهم‌کنش‌های الکترواستاتیک و آب‌گریزی را به همراه پیوند هیدروژنی دارا باشند. بنابراین در این سامانه‌ها، برهم‌کنش‌های الکترواستاتیک و آب‌گریزی به‌طور هم‌زمان سبب هدایت پدیده‌ی خوداجتماعی می‌شوند. انرژی خمشی (Bending Energy) زنجیره‌های پپتیدی نیز از عوامل تأثیرگذار در پیکربندی تعادلی پپتیدها و خوداجتماعی آن‌هاست. علاوه بر این عوامل که همگی از جنس انرژی هستند، آنتروپی (Entropy) رشته‌ها نیز در پیکربندی تعادلی رشته‌ها مؤثر است. بنابراین، به سادگی و با محاسبات ساده نمی‌توان درباره‌ی حالت‌های تعادلی سامانه حاوی این پلیمرهای کوتاه اظهار نظر کرد.

در سال ۱۹۹۳ قدیری و همکارانش اولین کسانی بودند که نشان دادند به وسیله‌ی خوداجتماعی پپتید حلقوی (Cyclic Peptide) ساخته شده از هشت اسیدآمینه، می‌توان نانولوله‌هایی (Nanotubes) با قطر هفت الی هشت آنگستروم و طول چند هزار نانومتر تولید کرد. قطر داخلی و شکل یکنواخت داشتن دو انتهای باز از ویژگی‌های این نانولوله‌ها است [۱۰]. در شکل ۵ پپتید مورد استفاده و نانولوله‌ی حاصل نشان داده شده است. پس از آن نیز مطالعاتی در زمینه‌ی پپتیدهای حلقوی انجام شده است [۱۱]. خوداجتماعی مولکولی پپتیدها در محلول‌هایی

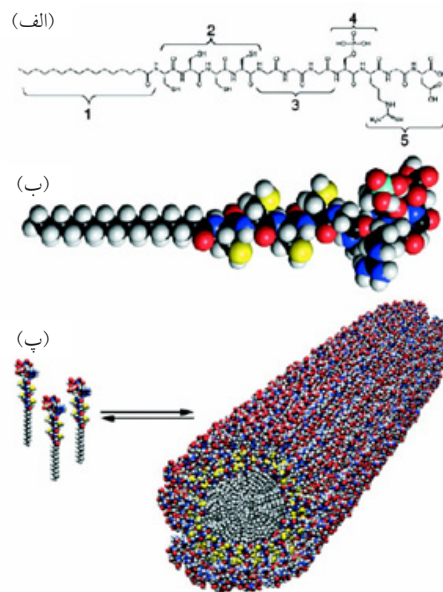


شکل ۷ نانولوله‌ها و نانوزیکول‌های تشکیل شده به وسیله پپتیدهای V6D که یک سر آب‌دوست متشکل از اسپارتیک اسید و یک دم آب‌گریز متشکل از شش اسید آمینه والین دارند [۱۵].

پپتیدها در حلال آبی، مشابه فسفولیپیدهای زیستی، به صورت نانولوله‌ها و نانوزیکول‌هایی با قطر میانگین ۳۰ الی ۵۰ نانومتر، در کنار یکدیگر انباشته می‌شوند. در شکل ۷ نانولوله‌ها و نانوزیکول‌های حاصل از پپتیدی که دم آب‌گریز آن از تعدادی اسید آمینه والین تشکیل شده است، به‌عنوان نمونه نشان داده شده است. این گروه همچنین تغییراتی را در ساختمان پپتیدهای ذکر شده ایجاد کردند و البته نتایج مشابهی را گرفتند.

۳-۳ پپتیدهای بولادومحیط‌دوست

پپتیدهای بولادومحیط‌دوست گروهی از پپتیدها هستند که دارای یک بخش آب‌گریز هستند و همچنین در هر دو انتهای بخش آب‌گریز یک سر آب‌دوست دارند. این پپتیدها به دلیل دارا بودن دو سر آب‌دوست در مقایسه با دیگر پپتیدهای دوگانه‌دوست، که دارای یک سر آب‌دوست هستند، انحلال‌پذیری بهتری در آب دارند. رفتار خوداجتماعی این پپتیدها نیز مانند انواع دیگر پپتیدهای خوداجتماعی به صورت گسترده‌ای مورد بررسی قرار گرفته است. پپتید بولادومحیط‌دوست FL4FR (R: آرژنین، F: فنیل آلانین، L: لوسین) نمونه‌ای از این پپتیدهاست که رودریگو و همکارانش رفتار خوداجتماعی آن در آب و در کنار یک سطح را مطالعه کردند [۱۶]. بخش میانی این پپتید آب‌گریز است. در هر انتهای پپتید نیز یک اسید آمینه کاتیونی (آرژنین) قرار دارد که سرهای آب‌دوست را تشکیل می‌دهند. نتایج حاصل نشان می‌دهند که این پپتیدها توانایی تشکیل نانورق‌هایی (Nanosheets) را بر روی سطح دارند. همچنین تأثیر تشکیل این نانورق‌ها بر ترشوندگی (Wettability) سطوح میکا (به عنوان سطح آب‌دوست)، پلی‌استایرین (به عنوان سطح آب‌گریز) و شیشه (به عنوان سطح خنثی) بررسی شده و نتایج نشان داده که تشکیل نانورق‌ها سبب افزایش آب‌گریزی سطح میکا و



شکل ۶ ساختار شیمیایی پپتید-دومحیط‌دوست و پنج ناحیه مشخص شده آن (الف)، مدل مولکولی پپتید-دومحیط‌دوست (ب) و طرحواره نانولیف تشکیل شده توسط خوداجتماعی پپتید-دومحیط‌دوست‌ها (پ) [۱۳].

خوداجتماعی این مولکول‌ها در $\text{pH}=4$ می‌تواند شبکه‌هایی از نانوالیاف (Nanofibers) با قطر هفت نانومتر و طول چند میکرومتر را تشکیل دهد. شبکه نانولیفی تشکیل شده مشابه شبکه خارج سلولی (Extracellular Matrix) است و می‌تواند به عنوان داربستی برای سلول‌ها و تولید بافت مصنوعی (که در بخش‌های بعد به آن پرداخته می‌شود) مورد استفاده قرار گیرد.

۳-۲ پپتیدهای فسفولیپیدی

این گروه از پپتیدها اساساً شبیه به فسفولیپیدها هستند و در نانوزیست‌فناوری و علم مواد مورد توجه قرار دارند. با استفاده از اسیدهای آمینه مختلف، این پپتیدها به گونه‌ای ساخته می‌شوند که دارای یک سر آب‌دوست پپتیدی و یک دم آب‌گریز پپتیدی باشند. پپتیدهای فسفولیپیدی می‌توانند مانند فسفولیپیدها در ساختارهای تعریف‌شده‌ای در کنار یکدیگر انباشته شوند. با یک طراحی مولکولی مناسب امکان تشکیل نانولوله‌ها و نانوزیکول‌ها به وسیله خوداجتماعی آن‌ها فراهم می‌شود [۱۴]. به عنوان یک نمونه، واودی و همکارانش پپتیدهایی به طول تقریبی ۲ نانومتر شامل ۷-۸ اسید آمینه (دارای یک سر آب‌دوست متشکل از اسپارتیک اسید و یک دم آب‌گریز متشکل از اسیدهای آمینه آب‌گریز مانند آلانین، والین یا لوسین) را ساخته و خوداجتماعی آن‌ها را مورد مطالعه قرار دادند [۱۵]. این

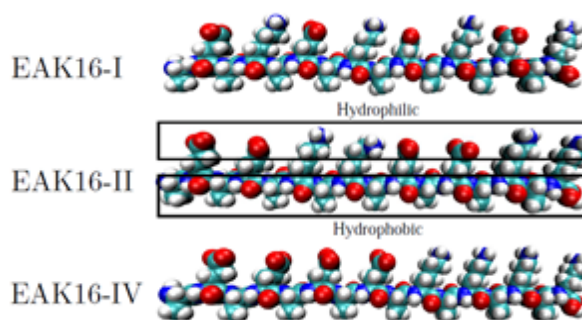
می‌رود. مطالعاتی هم در زمینه‌ی خوداجتماعی این پپتیدها انجام گرفته و تأثیر عواملی مانند توالی اسیدآمین، pH، قدرت یونی، غلظت پپتیدها و نوع حلال مورد بررسی قرار گرفته است [۱۷-۲۰]. مطالعه‌ی این پپتیدها در $\text{pH}=7$ نشان می‌دهد که EAK16-I و EAK16-II نانو ساختارهای لیفی در محلول تشکیل می‌دهند، درحالی‌که پپتید EAK16-IV اجتماعات گلوبولی تشکیل می‌دهد [۱۷]. همچنین، مطالعه‌ی رفتارهای خوداجتماعی پپتیدهای EAK16-II و EAK16-IV در pHهای مختلف نشان می‌دهد که EAK16-IV رفتار وابسته به pH دارد؛ درحالی‌که رفتار پپتید EAK16-II حساسیت اندکی به تغییرات pH محلول دارد. علاوه بر مطالعات تجربی، خوداجتماعی این پپتیدها به وسیله‌ی شبیه‌سازی‌های رایانه‌ای نیز مورد مطالعه قرار گرفته است [۱۹ و ۲۰].

۴ مزایا و کاربردهای خوداجتماعی پپتیدها

در این بخش برخی مزایا و کاربردهای خوداجتماعی پپتیدها در فناوری و علوم زیستی به صورت مختصر شرح داده می‌شوند.

۴-۱ ساخت‌وساز در ابعاد نانومتری

فناوری ساخت موادی با ساختار و ابعاد نانومتری در بیشتر موارد محدود به هندسه‌های صفحه‌ای است؛ اما خوداجتماعی مولکولی محدود به صفحه نیست و می‌توان با آن نانو ساختارهای سه‌بعدی نیز تولید کرد. پپتیدهای خاصی وجود دارند که به دلیل توانایی خوداجتماعی به صورت ساختارهایی معین (مانند نانوالیاف یا نانولوله‌ها) در کنار یکدیگر و همچنین داشتن توانایی پیوند با تعدادی از ترکیبات غیر آلی، برای ساخت بعضی مواد در ابعاد نانومتری به‌ویژه نانوسیم‌ها (Nanowires) کاربرد دارند. برای تولید نانوسیم رسانا، ابتدا نانولیف یا نانولوله‌ی پپتیدی به وسیله‌ی فرایند خوداجتماعی تشکیل می‌شود که هسته یا قالب نانوسیم رسانا خواهد بود. سپس یک رسانای فلزی یا پلیمری بر روی قالب، پوشش داده می‌شود و به وسیله‌ی فرایند خاص نانوسیم مورد نظر ساخته می‌شود. در همین راستا تمایل چسبیدن چندین مولکول پپتیدی به طلا، مس، نقره، پلاتین، نیکل و بعضی از پلیمرهای رسانا بررسی شده است [۲۱ و ۲۲]. مثال معروف در زمینه‌ی ساخت نانوسیم‌ها، استفاده از دی‌پپتید متشکل از دو اسیدآمین فنیلین برای ساخت قالب پپتیدی برای استفاده در ساختن نانوسیم نقره است. در شکل ۹ مراحل تشکیل نانوسیم نقره نشان داده شده است. این پپتید در حلال‌های آلی به صورت نانولوله‌های گسسته و سخت انباشته می‌شود و نقش قالب را ایفا می‌کند. یون‌های نقره‌ی اضافه شده در محیط، وارد



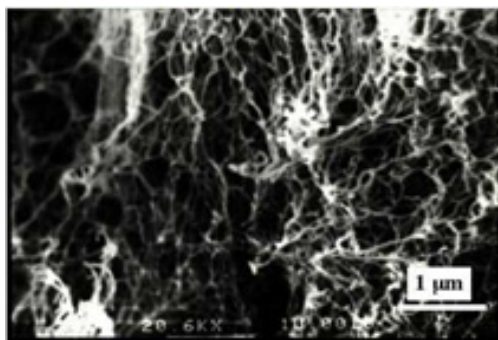
شکل ۸ مدل مولکولی سه بعدی پپتیدهای EAK16. در این اشکال گلوتامیک اسیدها زنجیره‌های جانبی کوتاه و لایزین‌ها زنجیره‌های جانبی بلند دارند. بخش‌های آب‌دوست و آب‌گریز در پپتید EAK16-II نیز مشخص شده است.

کاهش آب‌گریزی سطح پلی‌استایرین شده است. این پدیده تأثیر چندانی در میزان ترشوندگی سطح شیشه ندارد.

۳-۴ پپتیدهای مکمل یونی

با وجود گسترش تنوع پپتیدها برای یافتن کاربردهای مفید آن‌ها، پپتیدهای مکمل یونی دسته‌ی مهمی از مولکول‌های با قابلیت خوداجتماعی را تشکیل می‌دهند [۱۷]. در این پپتیدها اسیدهای آمینه‌ی آب‌دوست و آب‌گریز به صورت یک در میان و بارهای مثبت و منفی به تعداد برابر و با توالی منظم قرار می‌گیرند، به طوری‌که به ازای هر قسمت یونی شامل اسیدهای آمینه‌ی با بار مشخص یک قسمت مکمل از اسیدهای آمینه با بار مخالف وجود دارد. EAK16 خانواده‌ی پپتیدی مهمی در این دسته از پپتیدهاست که شامل سه پپتید EAK16-I، EAK16-II و EAK16-IV است. در شکل ۸ مدل مولکولی این سه پپتید نشان داده شده است. این پپتیدها از اسیدهای آمینه‌ی یکسانی به نام‌های گلوتامیک اسید (E)، لایزین (K) و آلانین (A) تشکیل شده‌اند و تنها تفاوت آن‌ها در ترتیب قرارگیری اسیدهای آمینه در کنار یکدیگر است. اسیدآمینه‌ی A خنثی و آب‌گریز است. بارهای الکتریکی نیز در انتهای زنجیره‌های جانبی دو اسیدآمینه‌ی E و K قرار دارند. به این ترتیب بدنه‌ی پپتیدها آب‌گریز و انتهای زنجیره‌های جانبی آب‌دوست است. بنابراین دو بخش آب‌دوست و آب‌گریز در این مولکول‌ها وجود دارد (شکل ۸).

در سامانه‌های تشکیل‌شده از این پپتیدها، به دلیل حضور هم‌زمان برهم‌کنش‌های مختلف مانند برهم‌کنش‌های الکترواستاتیک، آب‌گریزی، پیوند هیدروژنی و دافعه‌ی حجمی (Excluded Volume)، رفتارهای غنی خوداجتماعی انتظار



شکل ۱۰ تصویر SEM از شبکه‌ی لیفی تشکیل شده به وسیله‌ی پپتیدهای EAK16-II. نانوالیاف‌های تشکیل شده دارای قطری در حدود ۱۰ الی ۲۰ نانومتر هستند [۲۴].

۴-۳ انتقال دارو

مسئله و مشکل اساسی در بسیاری از بیماری‌ها رساندن درست دارو به محل بیماری در بدن است. البته برای این کار راه‌حل‌های مختلفی وجود دارد. بهترین راه برای اینکه دارو در قسمت‌های دیگر بدن آزاد نشود و تنها در محل بافت مورد نظر آزاد شود این است که آن را به وسیله‌ی ماده‌ای کپسول کنیم و شرایطی را فراهم کنیم که وقتی به مکان مورد نظر رسید آزاد شود. برای این کار به کپسول‌هایی نیاز است که دارو در آن‌ها قرار گیرد. کپسول‌ها به روش‌های مختلفی ساخته می‌شوند که یکی از آن‌ها استفاده از پپتیدهاست [۱۸]. شاید پپتیدهای مکمل یونی از مواد جدید و امیدبخش به‌عنوان حامل در انتقال دارو به شمار آیند. ساختار دوحیطدوست خاص و توانایی برای خوداجتماعی به آن‌ها اجازه می‌دهد که هم مواد آب‌گریز و هم مواد آب‌دوست در آن‌ها کپسول شوند. این پپتیدها می‌توانند به سرعت خود را در نانو یا میکروساختارهایی در کنار یکدیگر سامان دهند که می‌تواند محیطی پایدار برای مولکول‌های دارو فراهم سازد. نشان داده شده است که پپتیدهای مکمل یونی به راحتی مواد آب‌گریز را کپسول می‌کنند و حلالیت آن‌ها را در محیط‌های آبی افزایش می‌دهند. به‌عنوان نمونه استفاده از EAK16-II سبب پایداری میکروبلورهای پیرین (به‌عنوان مؤلفه‌ی آب‌گریز) در حلال آبی در غلظت‌هایی به‌میزان ده هزار برابر بیشتر از حلالیت آن در آب می‌شود [۲۸]. به دلیل اینکه پیرین کپسول شده به شکل بلوری است، تعداد پیرین کپسول شده به ازای هر پپتید و در نتیجه بازده حمل زیاد است. در نتیجه مقدار مصرف داروی آب‌گریز با استفاده از ساختارهای پپتیدی به طور چشمگیری کاهش می‌یابد.

۴-۴ حسگرهای زیستی

حسگرهای زیستی وسیله‌های تحلیلی هستند که از یک عنصر



شکل ۹ مراحل تشکیل نانوسیم نقره در داخل نانولوله‌ی پپتیدی [۲۳].

نانولوله می‌شوند و در حفره‌ی میانی تشکیل سیم فلزی از جنس نقره می‌دهند. سپس قالب پپتیدی برداشته می‌شود و چیزی که از آن باقی می‌ماند نانوسیم نقره با قطر ۲۰ نانومتر است [۲۳].

۴-۲ مهندسی بافت

مهندسی بافت شاخه‌ای میان‌رشته‌ای است که در آن از اصول مهندسی و علوم زیستی استفاده می‌شود تا جایگزین‌های زیستی مناسبی برای بافت‌های آسیب‌دیده یا بافت‌های از بین رفته ساخته شوند. برای ساخت بافت‌های جدید داربست‌هایی با ساختار سه‌بعدی مناسب مورد نیاز است که امکان چسبیدن و رشد و ارتباط سلول‌ها بر روی آن وجود داشته باشد. برای داربست ایده‌آل و سازگار از لحاظ زیستی، ویژگی‌ها و معیارهایی وجود دارد که برخی از آن‌ها عبارتند از: داشتن شباهت ساختاری با شبکه‌های خارج سلولی، تهیه شدن از منابع زیستی، قابلیت طراحی و تغییر برای کاربردهای خاص، زیست‌تخریب‌پذیر بودن و سازگار بودن با محیط‌های آبی و شرایط فیزیولوژیکی. نشان داده شده است که شبکه‌های لیفی تشکیل شده به‌وسیله‌ی خوداجتماعی برخی از پپتیدها قابلیت استفاده در مهندسی بافت را دارند. برای مثال پپتیدهای مکمل یونی EAK16-II و RAD16-II می‌توانند در فرایند خوداجتماعی به صورت غشاهای متخلخل و نانوالیاف‌های منظم با عرض الیاف ده نانومتر و اندازه‌ی حفره‌ی ۵ الی ۲۰۰ نانومتر درآیند [۲۵ و ۲۴]. ساختار نانولیفی این پپتیدها مشابه شبکه‌های خارج سلولی نوروها مانند کلاژن‌ها است. تصویر SEM از ساختار نانولیفی تشکیل شده توسط پپتید EAK16-II در شکل ۱۰ نشان داده شده است [۲۴]. در این شبکه قطر نانوالیاف‌های تشکیل شده ۱۰ الی ۲۰ نانومتر است. علاوه بر مطالعه‌ی چگونگی تشکیل این ساختارهای نانولیفی، مسائلی از قبیل بقا، چسبندگی و تکثیر سلول در شبکه‌های تشکیل شده نیز مطالعه شده است [۲۵ و ۲۶]. پپتیدهای مکمل یونی دیگری نیز وجود دارند که به‌عنوان گزینه‌های مناسبی برای ساختن داربست سلول شناخته شده‌اند. برای مثال، پپتید KFE8-I می‌تواند شبکه‌ای را با مدول الاستیکی که قابل مقایسه با مدول الاستیک بافت‌های نرمی مانند پوست ساعد و ران و اسفنج کلاژن است، بسازد [۲۷]. پپتید KLD12-I نیز می‌تواند هیدروژل‌های سه‌بعدی تشکیل دهد که قابلیت مرمت بافت غضروف را دارد [۲۶].

سلول‌های عصبی بخش‌هایی از مغز تشکیل می‌شوند. این پپتید شامل ۴۰ الی ۴۲ اسید آمینه است. هر چند مطالعه‌ی پروتئین‌ها و پپتیدهای کامل که در بیماری‌های صورت‌بندی نقش اساسی دارند بهترین راه برای به دست آوردن اطلاعات حیاتی و یافتن سازوکار خوداجتماعی آن‌هاست، برخی مشکلات نیز در این مسیر وجود دارد. برای مثال تهیه‌ی پپتیدهای بلند مشکل و پرهزینه است و همچنین محدودیت‌های محاسباتی در مدل کردن آن‌ها وجود دارد. بنابراین برای فهم سازوکار تشکیل لیف، از پپتیدهای کوچک‌تر و حتی از بخش‌هایی از پپتیدها و پروتئین‌های دخیل در این بیماری‌ها استفاده می‌شود. در این میان پپتیدهای مکمل یونی به دلیل سادگی ساختار مولکولی و همچنین به دلیل مشابهت با پپتیدهای آمیلوئیدی مدل خوبی برای مطالعه‌ی تشکیل الیاف‌های آمیلوئیدی هستند.

۵ بحث و نتیجه‌گیری

خوداجتماعی مولکولی پپتیدها یکی از راهبردهای تولید نانو ساختارها با دامنه‌ی وسیعی از کاربردهای زیست‌پزشکی است که در دو دهه‌ی اخیر به‌عنوان حوزه‌ی تحقیقاتی جدید و نوظهوری توجه بسیاری از دانشمندان را به خود جلب کرده است. این پدیده در سامانه‌های متشکل از پپتیدهای خوداجتماع سبب جدایی میکروفاز می‌شود و نواحی با ابعاد نانومتری حاصل می‌شوند. رفتارهای غنی خوداجتماعی که در سامانه‌های پپتیدی مشاهده می‌شود به دلیل وجود برهم‌کنش‌های هیدروژنی در سامانه است. در راستای بیان اهمیت خوداجتماعی پپتیدها، پپتیدهای ساده و پیچیده‌ی مختلفی مانند دی‌پپتیدها، پپتیدهای دو محیط‌دوست، پپتیدهای فسفولیپیدی، پپتیدهای بولاد و محیط‌دوست و پپتیدهای مکمل یونی که دارای ظرفیت تولید ساختارهایی مانند نانولوله‌ها و نانوالیاف‌ها هستند در این مقاله به صورت مختصر معرفی شدند. نانو ساختارهای تولید شده توسط انواع این پپتیدها می‌توانند کاربردها و مزایایی در حوزه‌های نانوفناوری و پزشکی داشته باشند. برخی از آن‌ها می‌توانند به‌عنوان داربستی برای ساخت بافت مصنوعی یا به‌عنوان کپسولی برای انتقال داروهای خاص در بدن موجودات زنده مورد استفاده قرار گیرند. ساخت‌وساز در ابعاد نانومتری مانند ساخت نانو سیم‌های نقره، ساخت حسگرهای زیستی و مطالعه‌ی بیماری‌های صورت‌بندی از کاربردهای دیگر خوداجتماعی پپتیدها هستند که در این مقاله به آن‌ها پرداخته شد.

حساس زیستی به عنوان گیرنده و یک مبدل فیزیکی یا شیمیایی تشکیل شده‌اند و می‌توانند در محیط میزان ترکیب خاصی را آشکارسازی و اندازه‌گیری کنند. گیرنده‌های زیستی می‌توانند آزریم‌ها، سلول‌ها و آنتی‌بادی‌ها باشند. مبدل نیز برای تبدیل فرایند واکنش زیستی به علائم الکتریکی قابل اندازه‌گیری به کار می‌رود. آشکارسازی سریع و قابل اطمینان توالی نوکلئیک اسید خاص، پروتئین‌ها و آنتی‌ژن‌ها در بسیاری از عرصه‌ها مانند درمان بیماری‌ها و انتقال دارو لازم و ضروری است. بنابراین تلاش‌های زیادی برای ساخت حسگرهای زیستی قابل اطمینان، مناسب و ارزان که به راحتی قابل استفاده باشد صورت گرفته است. از طرفی در حال حاضر دانشمندان برای رسیدن به این اهداف به خوداجتماعی‌های متفاوت در مقیاس نانو توجه بسیاری دارند و گاهی هم از پپتیدها برای این کار استفاده می‌کنند. برای نمونه، نشان داده شده است که نانولوله‌های به دست آمده از خوداجتماعی پپتیدهای دی‌فنیل‌آلانین قابلیت کاربرد به عنوان گیرنده‌ی زیستی را دارند و این نانولوله‌های پپتیدی از لحاظ شکل و نسبت طول به ضخامت مشابه نانولوله‌های کربنی (Carbon Nanotubes) هستند [۲۹]. نانولوله‌های کربنی به دلیل اندازه‌ی کوچک، بالا بودن نسبت طول به ضخامت و رسانایی الکتریکی قابلیت کاربردهای حسگری دارند. ویژگی‌های دیگر نانولوله‌های پپتیدی مانند سازگاری زیستی و حل‌شوندگی خوب در آب، آن‌ها را برای حسگری، مخصوصاً حسگری الکتروشیمیایی، جذاب می‌سازد.

۴-۵ بیماری‌های صورت‌بندی

دلیل اصلی وقوع بیماری‌های صورت‌بندی تشکیل لیفچه‌های آمیلوئیدی (Amyloid Fibrils) است که طی آن پروتئینی که به‌طور طبیعی در آب محلول است، در مسیر خوداجتماعی قرار می‌گیرد و پلاک‌های ماکروسکوپی غیرحلال و غیرطبیعی را به وجود می‌آورد. این پلاک‌ها که در فضای بین سلول‌ها ایجاد می‌شوند می‌توانند ارتباط سلول‌ها را دچار اختلال کنند. برخی از بیماری‌هایی که در اثر تجمع غیرعادی پروتئین‌ها ایجاد می‌شوند، عبارتند از بیماری آلزایمر، دیابت نوع دو و پارکینسون. با وجود اهمیت زیاد تشکیل الیاف‌های آمیلوئیدی، سازوکار این فرایند هنوز به‌طور کامل شناخته شده نیست و این بیماری‌ها به طور قطع قابل درمان نیستند [۳۰].

پپتید بتا آمیلوئید Aβ از محتویات اصلی پلاک‌های آمیلوئیدی خارج سلولی است که در بیماری آلزایمر در فضای بین

مراجع

- Boncheva M., Whitesides G. M., Making Things by Self-Assembly, *MRS Bull.*, 30, 736-742, **2005**.
- Jones R. A. L., Soft Condensed Matter, Oxford University Press, *Oxford, First ed.*, **2002**.
- Jing H., Wang Y., Desai P. R., Ramamurthi K. S., Das S., Lipid Flip-Flop and Desorption from Supported Lipid Bilayers is Independent of Curvature, *PLoS ONE*, 15, e0244460, **2020**.
- Rathore S. S., Liu Y., Yu H., Wan C., Lee M., Yin Q., Stowell M. H. B., Shen J., Intracellular Vesicle Fusion Requires a Membrane-Destabilizing Peptide Located at the Juxtamembrane Region of the v-SNARE, *Cell Rep.*, 29, 4583-4592.e3, **2019**.
- Peyret A., Zhao H., Lecommandoux S., Preparation and Properties of Asymmetric Synthetic Membranes Based on Lipid and Polymer Self-Assembly, *Langmuir*, 34, 3376-3385, **2018**.
- McManus J. J., Charbonneau P., Zaccarelli E., Asherie N., The Physics of Protein Self-Assembly, *Curr. Opin. Colloid Interface Sci.*, 22, 73-79, **2016**.
- Gui H., Guan G., Zhang T., Guo Q., Microphase-Separated, Hierarchical Macroporous Polyurethane from a Nonaqueous Emulsion-Templated Reactive Block Copolymer, *Chem. Eng. J.*, 365, 369-377, **2019**.
- Glagolev M. K., Glagoleva A. A., Vasilevskaya V. V., Microphase Separation in Helix-Coil Block Copolymer Melts: Computer Simulation, *Soft Matter*, 17, 8331-8342, **2021**.
- Tornesello A. L., Borrelli A., Buonaguro L., Buonaguro F. M., Tornesello M. L., Antimicrobial Peptides as Anticancer Agents: Functional Properties and Biological Activities, *Molecules*, 25, 2850, **2020**.
- Ghadiri M. R., Granja J. R., Milligan R. A., McRee D. E., Khazanovich N., Self-Assembling Organic Nanotubes Based on a Cyclic Peptide Architecture, *Nature*, 366, 324-327, **1993**.
- Hu K., Xiong W., Sun C., Wang C., Li J., Yin F., Jiang Y., Zhang M.-R., Li Z., Wang X., Li Z., Self-Assembly of Constrained Cyclic Peptides Controlled by Ring Size, *CCS Chem.*, 2, 42-51, **2020**.
- Jian H., Wang M., Dong Q., Li J., Wang A., Li X., Ren P., Bai S., Dipeptide Self-Assembled Hydrogels with Tunable Mechanical Properties and Degradability for 3D Bioprinting, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 11, 46419-46426, **2019**.
- Hartgerink J. D., Beniash E., Stupp S. I., Self-Assembly and Mineralization of Peptide-Amphiphile Nanofibers, *Science*, 294, 1684-1688, **2001**.
- Sun L., Zheng C., Webster T. J., Self-Assembled Peptide Nanomaterials for Biomedical Applications: Promises and Pitfalls, *Int. J. Nanomedicine.*, 12, 73-86, **2017**.
- Vauthey S., Santoso S., Gong H., Watson N., Zhang S., Molecular Self-Assembly of Surfactant-Like Peptides to Form Nanotubes and Nanovesicles, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 99, 5355-5360, **2002**.
- Rodrigo E., Walter M., Reza M., Castelletto V., Ruokolainen J., Connon C., Alves W., Hamley I., Self-Assembled Arginine-Capped Peptide Bolaamphiphile Nanosheets for Cell Culture and Controlled Wettability Surfaces, *Biomacromolecules*, 16, 3180-3190, **2015**.
- Jun S., Hong Y., Imamura H., Ha B. Y., Bechhoefer J., Chen P., Self-Assembly of the Ionic Peptide EAK16: The Effect of Charge Distributions on Self-Assembly, *Biophys. J.*, 87, 1249-1259, **2004**.
- Wu F., Fu D., Self-Assembling Peptide as a Carrier for Hydrophobic Anticancer Drug Combretastatin A4-Characterization and In Vitro Delivery, *J. Comput. Theor. Nanosci.*, 13, 2334-2339, **2016**.
- Emamyari S., Fazli H., All-Atom Molecular Dynamics Study of EAK16 Peptide: The Effect of pH on Single-Chain Conformation, Dimerization and Self-Assembly Behavior, *Eur. Biophys. J.*, 43, 143-155, **2014**.
- Emamyari S., Fazli H., pH-Dependent Self-Assembly of EAK16 Peptides in the Presence of a Hydrophobic Surface: Coarse-Grained Molecular Dynamics Simulation, *Soft Matter*, 10, 4248-4257, **2014**.
- Li B., You N., Liang Y., Zhang Q., Zhang W., Chen M., Pang X., Organic Templates for Inorganic Nanocrystal Growth, *Energy Environ. Mater.*, 2, 38-54, **2019**.
- Wang C.-C., Wei S.-C., Luo S.-C., Recent Advances and Biomedical Applications of Peptide-Integrated Conducting Polymers, *ACS Appl. Bio Mater.*, 5, 1916-1933, **2022**.
- Reches, M., Gazit E., Casting Metal Nanowires within Discrete Self-Assembled Peptide Nanotubes, *Science*, 300, 625-627, **2003**.
- Gelain F., Luo Z., Zhang S., Self-Assembling Peptide EAK16 and RADA16 Nanofiber Scaffold Hydrogel, *Chem. Rev.*, 120, 13434-13460, **2020**.
- Gelain F., Luo Z., Rioult M., Zhang S., Self-assembling Peptide Scaffolds in the Clinic, *NPJ Regen. Med.*, 6, 9, **2021**.

26. Kisiday J., Jin M., Kurz B., Hung H., Semino C., Zhang S., Grodzinsky A. J., Self-Assembling Peptide Hydrogel Fosters Chondrocyte Extracellular Matrix Production and Cell Division: Implications for Cartilage Tissue Repair, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 99, 9996-10001, **2002**.
27. Hudalla G. H., Murphy W. L. Mimicking the Extracellular Matrix: The Intersection of Matrix Biology and Biomaterials, Royal Society of Chemistry, Cambridge, UK, **2016**.
28. Keyes-Baig C., Duhamel J., Fung S., Bezaire J., Chen P., Self-Assembling Peptide as a Potential Carrier of Hydrophobic Compounds, *J. Am. Chem. Soc.*, 126, 7522-7532, **2004**.
29. Yemini M., Reches M., Rishpon J., Gazit E., Novel Electrochemical Biosensing Platform Using Self-Assembled Peptide Nanotubes, *Nano Lett.*, 5, 183-186, **2005**.
30. Tublin J. M., Adelstein J. M., Monte F. d., Combs C. K., Wold L. E., Getting to the Heart of Alzheimer Disease, *Circ. Res.*, 124,142-149, **2019**.

واژه‌های کلیدی:

پلیمر حافظه شکلی،
دما،
سازوکار،
برهم‌کنش،
شکل موقت

مروری بر سازوکار، ساختار و کاربرد پلیمرهای حافظه شکلی

حمیدرضا حیدری*

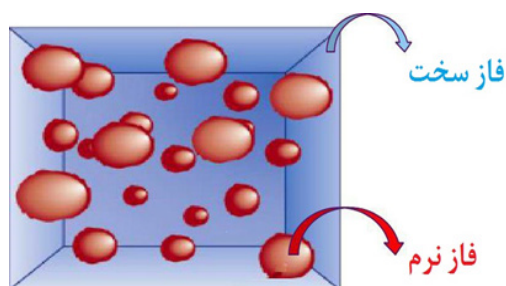
تهران، پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران

چکیده ...

پلیمرهای حافظه شکلی (SMPS)، جایگاهی ویژه از مواد را تشکیل می‌دهند و به‌عنوان یکی از نمایندگان سامانه‌های پلیمری هوشمند، در سال‌های اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. پلیمرهای حافظه شکلی، پلیمرهای پاسخگو به محرک هستند. عوامل تحریک‌کننده ورودی می‌تواند به‌صورت نور، دما، تغییر pH، تغییر حلال، میدان‌های الکتریکی یا مغناطیسی باشد که خروجی آن‌ها کرنش است. امروزه این پلیمرها، توجه زیادی را به خود جلب کرده‌است و علاوه‌براین تحقیقات بنیادی و نوآوری‌های بسیاری روی این مواد انجام می‌شود. بررسی حاضر، مروری کوتاه با توجه ویژه بر ساختار، سازوکارها و کاربردهای SMPها، اثر حافظه شکلی و هم‌چنین پیشرفت‌ها و مفاهیم حال حاضر را که برای این پلیمرها انجام شده‌است، ارائه می‌کند. از جمله کاربردهای پلیمرهای حافظه شکلی می‌توان در صنایع پزشکی، صنایع تجاری، صنایع هوافضا، پلیمرهای خودترمیم‌شونده و غیره اشاره کرد.

*پست الکترونیکی مسئول مکاتبات:

h.heidari@ippi.ac.ir



شکل ۲ تصویری از فاز نرم و سخت در شبکه‌ی پلیمری [۲].

۱ مقدمه

مواد پاسخگو به محرک یا به اصطلاح مواد هوشمند، موادی هستند که می‌توانند محیط اطراف خود را حس کنند و به صورت مستقیم پاسخ دهند [۱]. پلیمر حافظه شکلی (Shape-Memory Polymer) یا به اختصار SMP، پلیمری هوشمند است که توانایی به‌خاطر سپردن شکل اصلی خود را دارد. این شکل اصلی طی مراحل تهیه و قالب‌گیری در حافظه‌ی پلیمر ثبت و با قراردادن پلیمر در شرایط مناسب و اعمال نیروی خارجی، شکل موقت در آن ایجاد می‌شود و تا زمانی که در معرض محرک قرار نگیرد، شکل موقت بدون تغییر باقی خواهد ماند. هنگامی که پلیمر با شکل موقت در معرض محرک مناسب قرار بگیرد، شکل اولیه‌ی خود را بدون اعمال هرگونه نیروی خارجی بازیابی می‌کند که بازگشت پلیمر را از شکل موقت به شکل اصلی، اثر حافظه شکلی (Shape Memory Effect) یا به اختصار SME می‌گویند. این پلیمرها حتی پس از تغییر شکل‌های نسبتاً زیاد، دوباره شکل اولیه‌ی خود را بازیابی می‌کنند و قادرند این چرخه را بارها تکرار کنند (شکل ۱) [۲].

تاکنون از محرک‌های گوناگونی برای طراحی پلیمرهای حافظه شکلی از جمله حرارت، الکتریسته، نور، میدان مغناطیسی، ماکروویو، آب و سایر محیط‌های خارجی استفاده شده است. این توانایی حس کردن تغییرات محیط خارجی باعث می‌شود که SMPها به‌طور گسترده‌ای در صنایع هوافضا، زیست‌پزشکی، پارچه‌های هوشمند، ربات‌های هوشمند، ابزارهای چشمی هوشمند و غیره مورد استفاده قرار گیرند [۶-۲]. در مقایسه با آلیاژها و سرامیک‌های حافظه شکلی، SMPها دارای وزن کمتر، شکل‌پذیری بهتر و فرایندپذیری آسان‌تری هستند و از این رو مورد توجه دانشمندان سراسر جهان قرار گرفته‌اند [۱۰-۷].

برای طراحی پلیمرهای حافظه شکلی باید حداقل دو جزء را درون شبکه‌ی پلیمری قرار داد:

۱- حداقل یک فاز سخت

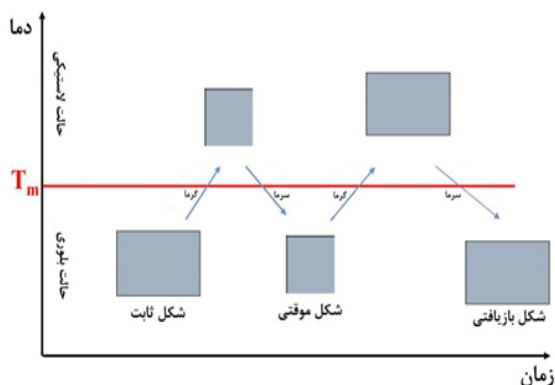
۲- حداقل یک فاز نرم

فاز سخت، بخشی از پلیمر است که ساختار کلی پلیمر را پایدار می‌کند و نسبت به محرک کاملاً پایدار است و به عبارتی می‌توان گفت که نسبت به محرک انعطاف‌پذیر نیست. از جمله فازهای سخت که تاکنون از آنها استفاده شده است می‌توان به شبکه‌های پلیمری دارای اتصالات عرضی، فاز بلورین و شبکه‌های پلیمری درهم تنیده‌شده اشاره کرد [۱۱، ۱۲].

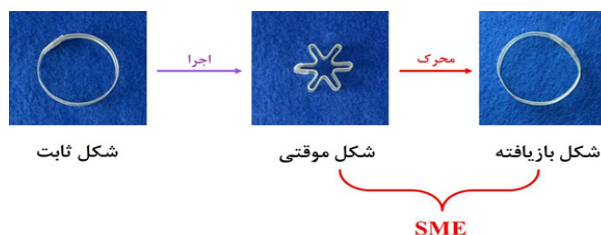
فاز نرم، بخشی از پلیمر است که نسبت به محرک از خود واکنش نشان می‌دهد؛ به عبارتی می‌توان گفت که نسبت به محرک انعطاف‌پذیر است. این فاز وظیفه‌ی ایجاد و پایدارکردن شکل موقت را بر عهده دارد. فاز نرم شکل موقت را به روش تبلور، شیشه‌ای شدن، پیوند هیدروژنی، برهم‌کنش یونی، برهم‌کنش فلز-لیگاند و پیوندهای کووالانسی برگشت‌پذیر پایدار می‌کند (شکل ۲) [۱۲].

۲ بررسی سازوکارهای عملی SMP

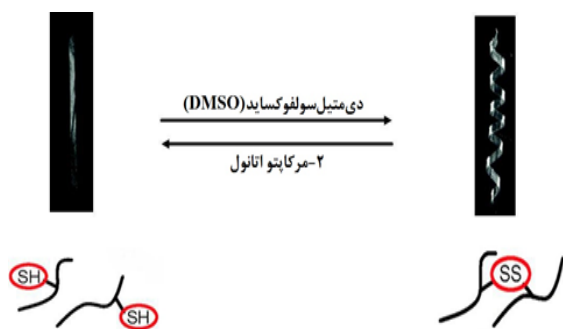
سازوکارهای وابسته به دما، مهم‌ترین و پرکاربردترین سازوکار برای SMPها است که در آن دمایی را که پلیمر شکل اصلی خود را بازیابی می‌کند (شکل موقت به شکل اصلی تبدیل می‌شود)، دمای انتقال نام‌گذاری کرده‌اند. این دما معمولاً دمای ذوب فاز نرم یا دمای انتقال فاز نرم است (شکل ۳) [۱۳].



شکل ۳ دمای انتقال یا دمای ذوب فاز نرم [۱۳].



شکل ۱ اثر حافظه شکلی در پلیمرها [۱].

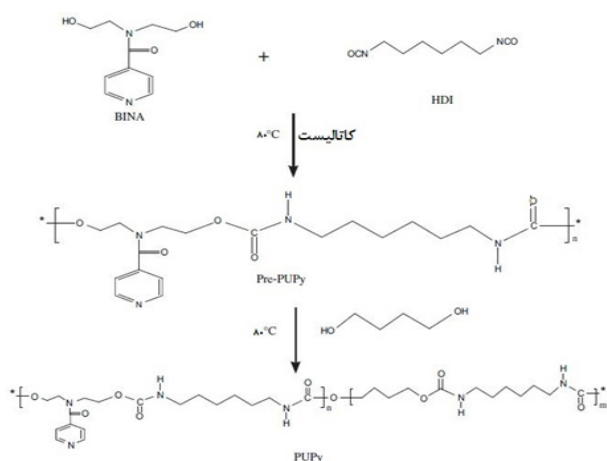


شکل ۴ رفتار حافظه شکلی برگشت پذیر سلولز استات [۱۵].

در شرایط معمولی گروه‌های مرکاپتو از هم جدا بوده، بین زنجیرها هیچ گونه اتصال عرضی برقرار نیست. برای ایجاد شکل موقت، ابتدا باید با اعمال نیرو این تغییر شکل در نمونه ایجاد و با حفظ تنش اعمالی، در حلال DMSO قرار داده شود. در نتیجه اتصالات عرضی برقرار می‌شوند و نمونه شکل موقت به خود می‌گیرد. برای بازیابی شکل اولیه باید در ۲-مرکاپتو اتانول قرار گیرد تا در اثر احیا، اتصالات عرضی شکسته شده و پلیمر دوباره به حالت اولیه خود باز گردد. در واقع این پلیمر شیمی-پاسخ (Chemo-Responsive) است [۱۵].

۲-۲ SMP بر پایه پیوند هیدروژنی

چم و همکارانش [۱۶]، پلی‌یورتانی طراحی کردند که دارای واحدهای تکراری (N,N-بیس(هیدروکسیل اتیل) ایزونیکوتین آمین) یا BINA بود (شکل ۵). در این پلیمر بین نیتروژن پیریدین و هیدروژن گروه عاملی یورتان در دمای معمولی، پیوند هیدروژنی برقرار است و پلیمر



شکل ۵ سنتز پلی‌یورتان/پیریدین با مقادیر متفاوت از BINA [۱۶].

فرایند حافظه شکلی شامل چهار مرحله‌ی تغییر شکل، تثبیت شکل، رهایش تنش خارجی و بازیابی شکل است. قبل از فرایند حافظه شکلی، پلیمرها نیاز به تغییر شکل تحت تنش خارجی همراه با گرمایش دارند. دمای بالا باعث افزایش آنتروپی پلیمرها، کاهش سد انرژی، افزایش تحرک زنجیر مولکولی و در نتیجه عکس‌العمل راحت آن‌ها می‌شود. پس از این که پلیمر در اندازه‌ی مطلوب تغییر شکل موقت یافت، شکل آن با اعمال سرما تثبیت می‌شود و با رهایش تنش خارجی، تغییری نخواهد کرد. البته شرایط فیزیکی و شیمیایی می‌تواند منجر به انسداد تحرک زنجیرهای پلیمر شود [۱۴].

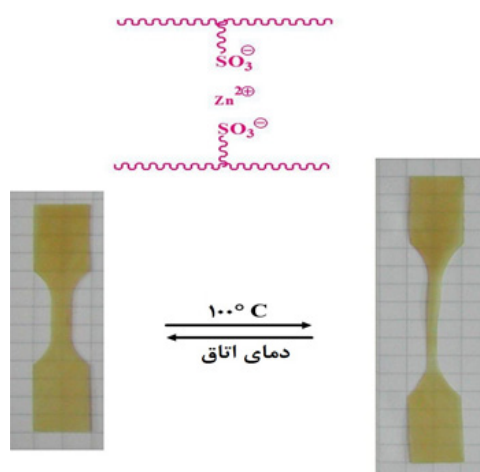
تغییر شکل موقت می‌تواند برای مدت زیادی بدون محرک خارجی نگه داشته شود. تنش و انرژی در پلیمر در طول فرایند حافظه شکلی با افزایش آنتروپی ذخیره می‌شوند؛ بنابراین شکل موقت بسیار ناپایدارتر از شکل اصلی است. وقتی ماده در معرض محرک خارجی قرار گیرد تنش و انرژی خارجی به دلیل تحرک زنجیرها، آزاد خواهند شد. سپس پلیمر پس از تحریک، دوباره به شکل اصلی خود باز می‌گردد (شکل ۳). فرایند حافظه شکلی می‌تواند چندین بار تکرار شود؛ بنابراین SMPها می‌توانند چندین شکل موقت و فقط یک شکل دائمی داشته باشند [۱۴].

مطابق شکل (۳) زمانی که دما کمتر از دمای ذوب باشد و هیچ گونه تنش فشاری به نمونه اعمال نشود، پلیمر شکل اصلی خود را دارد. در این پلیمر نیمه‌بلورین، با افزایش دما بلورها ذوب شده و ماده منعطف می‌شود و در نتیجه با اعمال نیرو شکل موقت ایجاد می‌شود. در ادامه برای تثبیت شکل موقت با حفظ تنش فشاری، باید نمونه تا زیر دمای انتقال سرد شود. بدین ترتیب بلورها مجدداً تشکیل شده و شکل موقت پایدار می‌شود. البته فاز نرم باید خاصیت تبلور را تحت فشار داشته باشد [۱۳، ۱۴].

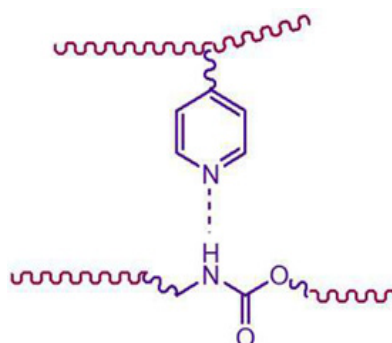
پلیمر با شکل موقت تثبیت شده تا زمانی که در معرض دمای انتقال خود قرار نگیرد، شکل موقتش را حفظ می‌کند. وقتی پلیمر با شکل موقت در معرض دمای انتقال قرار بگیرد، دوباره بلورها ذوب شده و پلیمر به حالت اولیه خود باز می‌گردد و با سرد کردن تا زیر دمای انتقال، شکل اصلی بازیابی و تثبیت می‌شود [۱۳، ۱۴].

۲-۱ SMP بر پایه پیوندهای کووالانسی برگشت پذیر

اوکی و همکارانش [۱۵]، از مشتقات سلولز استات، پلیمری را طراحی کردند که دارای گروه‌های آویزان مرکاپتو بود (شکل ۴).



شکل ۶ برهم‌کنش یونی بین پیریدین و عامل یورتان [۱۶].



در این حالت شکل اصلی خود را به دست می‌آورد (شکل ۶) [۱۸-۱۶].

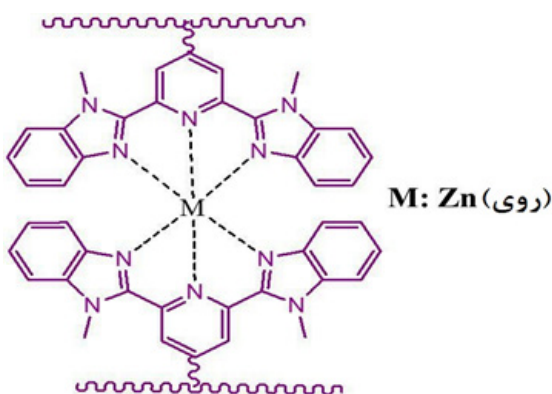
شکل ۷ برهم‌کنش یونی سولفونات با کاتیون روی و ایجاد شبکه فیزیکی [۱۹].

دارای واحدهایی به نام اُکسی-۲،۶-بیس (n-متیل بنزیمیدازولیل) پیریدین بود که این گروه در دمای اتاق با فلز روی برهم‌کنش می‌دهد و شکل اصلی در پلیمر پایدار می‌ماند (شکل ۸). وقتی که پلیمر تا دمای 60°C حرارت داده شود، این برهم‌کنش تضعیف شده و شکل موقت ایجاد می‌شود و بدین ترتیب پلیمر اثر حافظه شکلی خود را به نمایش می‌گذارد [۲۰].

۳ کاربرد SMPها

به‌طور کلی کاربردهای این پلیمرهای هوشمند را می‌توان در چهار دسته زیر قرار داد:

- ۱- تجاری
- ۲- پزشکی
- ۳- هوافضا



شکل ۸ برهم‌کنش روی با واحدهای اُکسی-۲،۶-بیس (n-متیل بنزیمیدازولیل) پیریدین متصل به پلیمر [۲۰].

وقتی این پلیمر تا دمای 60°C حرارت داده شود، پیوندهای هیدروژنی شکسته شده و در نتیجه تحرک زنجیرهای پلیمری افزایش می‌یابد که این منجر به انعطاف‌پذیری پلیمر و ایجاد شکل موقت در آن می‌شود. با سرد شدن پلیمر تا دمای 20°C (البته با حفظ تنش)، مجدداً پیوندها تشکیل شده و شکل موقت تثبیت می‌شود. برای مشاهده‌ی اثر حافظه شکلی یا به عبارتی بازیابی شکل اولیه پلیمر، تا دمای 60°C حرارت داده می‌شود و در نهایت پیوندها شکسته شده و شکل اولیه بازیابی می‌شود [۱۶].

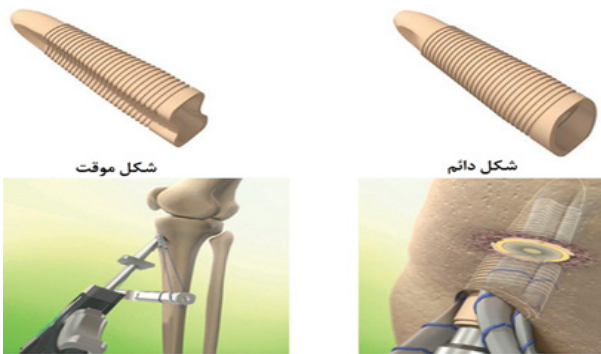
نکته بسیار جالب در این پلیمر طراحی شده این است که علاوه بر دما، به آب و متانول نیز حساس است. در واقع با افزایش آب یا متانول بین پیریدین و آب (متانول) پیوند هیدروژنی برقرار می‌شود در نتیجه پیوند بین زنجیرها شکسته می‌شود [۱۶].

۲-۳ SMP بر پایه‌ی پیوند یونی

در سال ۲۰۱۳ پلیمری طراحی شد که دارای گروه‌های سولفونات است و با کاتیون روی (Zn^{2+}) برهم‌کنش یونی برقرار می‌کند و شبکه‌ای فیزیکی تشکیل می‌دهد. این برهم‌کنش در دمای اتاق انجام می‌شود و پلیمر شکل اصلی را به خود می‌گیرد (شکل ۷) [۱۹]. با گرمایش تا دمای 100°C ، برهم‌کنش‌ها از بین رفته و شکل موقت ایجاد و با سرمایش تا دمای اتاق شکل موقت تثبیت می‌شود. به عبارتی دیگر برای مشاهده اثر حافظه شکلی لازم است که پلیمر تا دمای 100°C حرارت داده شود و بدین گونه شکل اصلی بازیابی می‌شود [۱۹].

۲-۴ SMP بر پایه‌ی برهم‌کنش فلز-لیگاند

ویتل و همکارانش [۲۰]، پلی‌بوتادیانی طراحی کردند که



شکل ۱۳ SMP به صورت پلاک‌های پیچی شکل و قرار دادن آن در مفصل [۲۹].

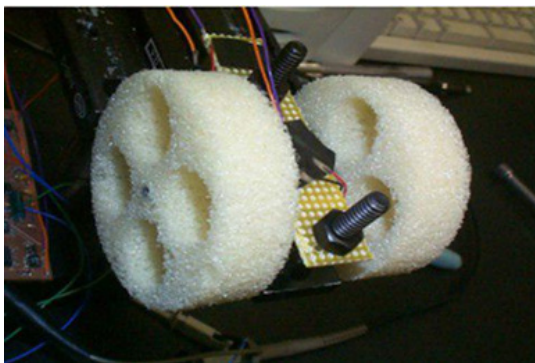
به همین دلیل استفاده از این پلیمرها در ساخت وسایل موجود در سفینه برای رفع این مشکل بسیار مؤثر خواهد بود؛ چون این پلیمرها در حالت فشرده شدن (شکل موقت) حجم کمی را اشغال می‌کنند و در مقایسه با آلایزها جرم کمتری دارند. به این علت محققان در این زمینه بسیار مشغول فعالیت هستند [۳۱].

• چرخ مریخ‌نورد

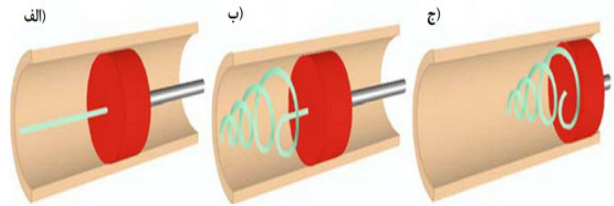
جنس این چرخ‌ها از اسفنج است که تا ۵۰۰ برابر حجم فشرده شده می‌تواند بزرگ‌تر شوند. قطر این چرخ‌ها در حالت فشرده‌گی فقط ۶ سانتی‌متر است (شکل موقت در جو زمین و با سرد کردن تا دمای اتاق ایجاد می‌شود). پس از حرارت دادن تا دمای 80°C ، قطر آن‌ها افزایش می‌یابد (شکل ۱۴) [۳۱،۳۲].

• استفاده در خرپا

برای تهیهی خرپا معمولاً از کامپوزیت حافظه شکلی (Shape-Memory Composites) یا به اختصار SMCs برپایه‌ی رزین اپوکسی استفاده می‌شود که در اثر حرارت تا دمای 150°C در مدت زمان ۸۰ ثانیه، شکل اولیه‌ی خود را بازیابی می‌کند (شکل ۱۵) [۳۱].



شکل ۱۴ چرخ مریخ‌نورد ساخته شده از اسفنج پلیمری حافظه شکلی [۳۱].



شکل ۱۱ (الف) ورود دستگاه به رگ و عبور از لخته، (ب) حرارت دادن و بازیابی شکل اصلی فنر مانند و (ج) خروج دستگاه [۲۵].

لخته‌ی خون با استفاده از لیزر حرارت داده می‌شود و شکل اصلی (فنر مانند) در پلی‌یورتان ایجاد می‌شود و با کشیدن این پلیمر، لخته خون هم‌زمان با آن خارج می‌شود [۲۵،۲۶].

• درمان آنوریسم مغزی

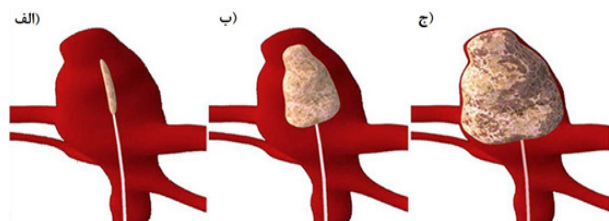
در این بیماری دیواره‌ی رگ مغزی نازک شده و حبابی در آن ایجاد می‌شود که در اثر برخورد خون با فشار به این قسمت ممکن است پارگی و خون‌ریزی مغزی ایجاد شود. اسفنج حافظه شکلی می‌تواند وارد این قسمت شده و با استفاده از لیزر حرارت داده شود و به شکل اصلی خود برگردد و بدین ترتیب حباب پر و خطر برطرف می‌شود (شکل ۱۲) [۲۷،۲۸].

• استفاده به عنوان عضو مصنوعی کاشتنی (Implant)

از پلیمر حافظه شکلی آکریلی پلاک‌های پیچی شکل تهیه شده که در بافت اسفنجی استخوان در محل مفاصل قرار می‌گیرند و سپس حرارت داده می‌شوند و شکل بافت اسفنجی اطراف را به خود می‌گیرند و بدین ترتیب سازگاری آن‌ها با بدن نسبت به سایر اعضای مصنوعی کاشتنی بیشتر است (شکل ۱۳) [۲۹].

۳-۳ هوافضا

SMPها کم‌وزن، کم‌هزینه و دارای خواص ویژه‌ای هستند که در مهندسی هوافضا به خصوص در ساختارهای شکل‌پذیر کاربرد دارند [۳۰]. سفینه‌ی فضانوردی که به فضا ارسال می‌شود از نظر میزان حجم و جرمی که می‌تواند تحمل کند محدود است.



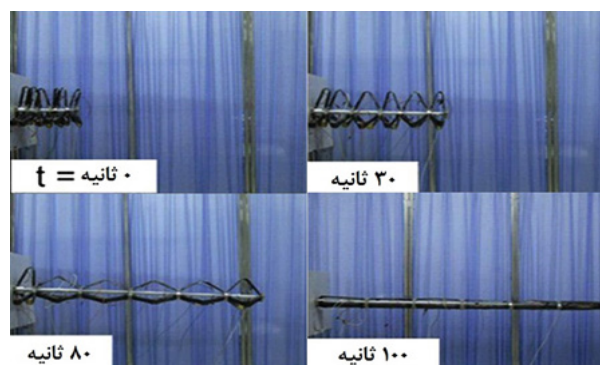
شکل ۱۲ (الف) ورود دستگاه به حباب، (ب) حرارت دادن، (ج) بازیابی شکل اصلی (بزرگ شدن) [۲۷].

مطابق شکل در طول فرایند کشش، ذرات AO-80 (فنول دارای گروه‌های عاملی بسیار زیاد) در امتداد محور بارگیری می‌لغزند و پیوند هیدروژنی بین فنول عامل دار و لاستیک طبیعی اپوکسی دار شده (ENR) باعث می‌شود که زنجیرهای لاستیک در حین تغییر شکل کششی، فشرده‌تر و موازی شوند. با حرارت‌دهی تا دمای بیشتر از دمای انتقال شیشه‌ای، ذرات فنول ذوب می‌شوند و حالت کامپوزیت به تدریج از شیشه‌ای به لاستیکی تغییر میکند. زنجیرهای ENR به دلیل کاهش پیوند هیدروژنی بین ENR و فنول، الاستیک می‌شوند و در نتیجه شبکه کوچک می‌شود و به آرایش تصادفی اولیه‌اش برمی‌گردد [۳۳].

این‌ها نمونه‌هایی از کاربردهای این پلیمرها بودند که البته کاربردهای بیشتری نیز وجود دارد، ولی تقریباً سازوکار همگی مشابه یکدیگر است.

۴ نتیجه‌گیری

پلیمرهای حافظه شکلی، پلیمرهای هوشمندی هستند که توانایی به‌خاطر سپردن شکل اصلی خود را دارند. در حال حاضر، زمینه‌ی پلیمرهای حافظه شکلی به سرعت در حال پیشرفت است. برای طراحی این پلیمرها باید حداقل دو جزء فاز سخت و فاز نرم را درون یک شبکه پلیمری قرار داد که نسبت به محرک به ترتیب ثابت و انعطاف‌پذیر هستند. از مهم‌ترین محرک‌های این مواد می‌توان به دما اشاره کرد. از جمله سازوکارهای SMPهای وابسته به دما پیوند کووالانسی، پیوند یونی، برهم‌کنش هیدروژنی و برهم‌کنش فلز-لیگاند هستند که با اعمال حرارت به این پلیمرها، از شکل موقت به شکل اصلی خود می‌رسند. بخش مهمی از کاربردهای SMPها در صنایع تجاری، پزشکی، هوافضا و پلیمرهای خودترمیم‌شونده هستند که هرکدام باعث افزایش ایمنی و راحتی کار شده‌اند.

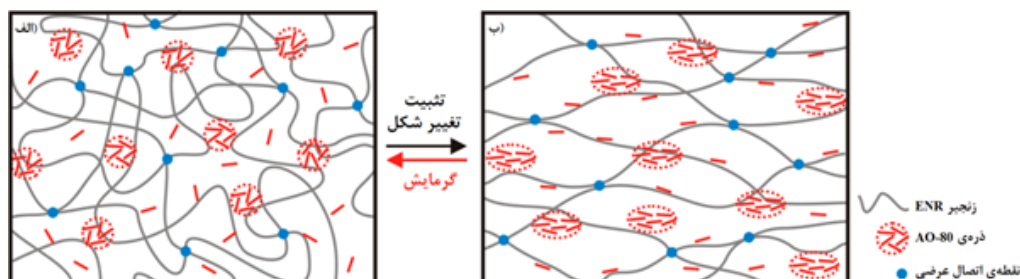


شکل ۱۵ خرابی ساخته‌شده از پلیمر حافظه شکلی و بازیابی آن به شکل اصلی در اثر حرارت در طی زمان [۳۱].

همان‌طور که در شکل (۱۵) مشاهده می‌کنید، با استفاده از کامپوزیت حافظه شکلی پلی‌یورتان/الیاف کربن آنتن سهمی شکلی تهیه شده است که در دمای 70°C فعال می‌شود. این کامپوزیت در حالت فشرده‌شدن حجم بسیار کمتری را اشغال می‌کند [۳۱، ۳۲].

۳-۴ پلیمرهای خودترمیم‌شونده به کمک اثر حافظه شکلی

مواد خودترمیم‌شونده به کمک حافظه شکلی (Shape Memory Assisted Self-Healing)، در دمای اتاق متحمل تغییر شکل پلاستیک شده، به محض حرارت دیدن بازیابی می‌شوند؛ بنابراین هر دو تغییر شکل موقتی نواحی الاستیک و پلاستیک را بهبود می‌بخشند. این پدیده‌ی جدید به‌عنوان حافظه شکلی پلاستیسیته‌ی برگشت‌پذیر (Reversible Plasticity Shape Memory) شناخته می‌شود که تسهیل فرایند تثبیت شکل، قابلیت بازیابی تنش بالاتر، بهبود تغییر شکل‌پذیری ماده و قابلیت خودترمیم‌شوندگی از جمله فواید این پدیده است. شکل (۱۶) سازوکار عملکرد این نوع مواد را نشان می‌دهد.



شکل ۱۶ سازوکار حافظه شکلی پلاستیسیته‌ی برگشت‌پذیر لاستیک طبیعی اپوکسی دار شده حاوی فنول با گروه‌های عاملی زیاد: (الف) شکل دائم و (ب) شکل موقت [۳۳].

مراجع

1. Zhang X., Chen L., Lim K.H., Gonuguntla S., Lim K. W., Pranantyo D., Yong W.P., Yam W.J.T., Low Z., Teo W.J., Nien H. P., Loh W Q., Soh S., The Pathway to Intelligence: Using Stimuli-Responsive Materials as Building Blocks for Constructing Smart and Functional Systems, *Adv. Mater.*, 31, 1804540, **2019**.
2. Hager M.D., Bode S., Weber C., Schubert U.S., Shape Memory Polymers: Past, Present and Future Developments, *Prog. Polym. Sci.*, 49, 3-33, **2015**.
3. Hu J., Zhu Y., Huang H., Lu J., Recent Advances in Shape-memory Polymers: Structure, Mechanism, Functionality, Modeling and Applications., *Prog Pol. Sci.*, 37, 1720-1763, **2012**.
4. Liu W., Electroactive Shape Memory Composites with TiO₂ Whiskers for Switching an Electrical Circuit., *Mater. Des.*, 143, 196-203, **2018**.
5. Zhang F., Nano/Microstructures of Shape Memory Polymers: From Materials to Applications., *Nanoscale Horiz.*, 5, 1155-1173, **2020**.
6. Zhang F., Zhao T., Ruiz-Molina D., Liu Y., Roscini C., Leng J., & Smoukov S. K., Shape Memory Polyurethane Microcapsules with Active Deformation, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 12, 47059-47064, **2020**.
7. Lan X., Liu L., Zhang F., Liu Z., Wang L., Li Q., Peng F., Hao S., Dai W., Wan X and Tang Y. World's First Spaceflight on-Orbit Demonstration of a Flexible Solar Array System Based on Shape Memory Polymer Composites, *Sci. China Technol. Sci.*, 63, 1436-1451, **2020**.
8. Xia Y., He Y., Zhang F., Liu Y., Leng J., A Review of Shape Memory Polymers and Composites: Mechanisms, Materials, and Applications, *Adv. Mater.*, 33, 2000713, **2021**.
9. Huang X., Zhang F., Leng J., Metal Mesh Embedded in Colorless Shape Memory Polyimide for Flexible Transparent Electric-heater and Actuators, *Appl. Mater. Today*, 21, 100797, **2020**.
10. Huang X., Zhang F., Liu Y., & Leng J., Active and Deformable Organic Electronic Devices Based on Conductive Shape Memory Polyimide, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 12, 23236-23243, **2020**.
11. Lendlein A., Kelch S., Shape-memory Polymers, *Angew Chem Int Ed*, 41, 2034-2057, **2002**.
12. Leng J., Lan X., Liu Y., Du S., Shape-Memory Polymers and Their Composites: Stimulus Methods and Applications, *Prog. Mater. Sci.*, 56, 1077-1135, **2001**.
13. Zhao Q., Qi H.J., Xie T., Recent Progress in Shape Memory Polymer: New Behavior, Enabling Materials, and Mechanistic Understanding, *Prog. Polym. Sci.*, 79-120, **2015**.
14. Lendlein A., Oliver EC., Gould. Reprogrammable Recovery and Actuation Behavior of Shape-Memory Polymers, *Nat. Rev. Mater.*, 4, 116-133, **2019**.
15. Aoki D., Teramoto Y., Nishio Y., SH-Containing Cellulose Acetate Derivatives: Preparation and Characterization as a Shape Memory-Recovery Material, *Biomacromolecules*, 8, 3749-3757, **2007**.
16. Chen S., Hu J., Zhuo H., Yuen C., Chan L., Study on the Thermal-induced Shape Memory Effect of Pyridine Containing Supramolecular Polyurethane, *Polymer*, 51, 240-248, **2010**.
17. Chen S., Hu J., Yuen C.W., Chan L., Supramolecular Polyurethane Networks Containing Pyridine Moieties for Shape Memory Materials, *Mater. Lett.*, 63, 1462-1464, **2009**.
18. Chen S., Hu J., Yuen C-W., Chan L., Novel Moisture-sensitive Shape Memory Polyurethanes Containing Pyridine Moieties, *Polymer*, 50, 4424-4428, **2009**.
19. Ying S., Yoonessi M., and Weiss R.A., High Temperature Shape Memory Polymers, *Macromolecules*, 46, 4160-4167, **2013**.
20. Whittell G.R., Hager M.D., Schubert U.S., Manners I., Functional Soft Materials from Metallopolymers and Metallo-supramolecular Polymers, *Nat. Mater.*, 10, 176-188, **2011**.
21. Liu C., Qin H., and Mather P. T., Review of Progress in Shape-Memory Polymers, *J. Mater. Chem.*, 17, 1543-1558, **2007**.
22. Liem H., Yeung L. Y., and Hu J. L., A Prerequisite for the Effective Transfer of the Shape-Memory Effect to Cotton Fibers, *Smart Mater. Struct.*, 16, 45-57, **2007**.
23. Wang L., Zhang F., Liu Y., & Leng J., Shape Memory Polymer Fibers: Materials, Structures, and Applications, *Adv. Fib. Mater.*, 1-19, **2021**.
24. Zhao J., & Cui W., Functional Electrospun Fibers for Local Therapy of Cancer, *Adv. Fib. Mater.*, 2, 229-245, **2020**.
25. Maitland D.J., Metzger M.F., Schumann D., Lee A., Wilson T S, Photothermal Properties of Shape Memory Polymer Micro-actuators for Treating Stroke, *Lasers. Surg. Med.*, 30, 1-11, **2002**.
26. Metzger M.F., Wilson T.S., Schumann D., Matthews D L., Maitland D J., Mechanical Properties of Mechanical Actuator

- for Treating Ischemic Stroke, *Bio. Micro.*, 4, 89-96, **2002**.
27. Rolland P.H., Mekkaoui C., Vidal V., Berry J.L., Moore J.E., Moreno M., Amabile P., Bartoli J M., Compliance Matching Stent Placement in the Carotid Artery of the Swine Promotes Optimal Blood Flow and Attenuates Restenosis, *Eur. J. Vasc. Endovasc. Surg.*, 28, 431-438, **2004**.
28. Higashida R.T., Meyers P.M., Intracranial Angioplasty and Stenting for Cerebral Atherosclerosis: New Treatments for Stroke are Needed, *Neuroradiology*, 48, 367-372, **2006**.
29. Ajili S H., Ebrahimi N G., Soleimani M., Polyurethane/poly-caprolactane Blend With Shape Memory Effect as a Proposed Material for Cardiovascular Implants, *Acta. Biomater.*, 5, 1519-1530, **2009**.
30. Li F., Yanju L., Leng J., Progress of Shape Memory Polymers and Their Composites in Aerospace Applications, *Smart Mater. Struct.*, 28, 103003, **2019**.
31. Schueler R.M. Self-deploying Trusses Containing Shape-memory Polymers, NASA Tech Briefs, 20-1, 2008.
32. Liu Y., Du H., Liu L., Leng J., Shape Memory Polymers and Their Composites in Aerospace Applications: A Review, *Smart Mater. Struct.*, 23, 1-22, **2014**.
33. Tengfei L., Tang Z., and Guo B., New Design Strategy for Reversible Plasticity Shape Memory Polymers with Deformable Glassy Aggregates, *ACS Appl. Mater. Interfaces.*, 6, 21060-21068, **2014**.

مروری بر روش‌های نیمه تجربی تعیین مشخصه برهم کنش فلوری-هاگینز در آمیزه‌های پلیمری

زهرا خوبی آرانی*

تبریز، دانشگاه صنعتی سهند، دانشکده مهندسی پلیمر

چکیده ...

مشخصه برهم کنش فلوری-هاگینز (X)، عاملی کلیدی است که بر امتزاج پذیری و مورفولوژی اجزا در آمیزه‌های پلیمری و در نهایت بر خواص و کاربرد محصولات نهایی اثرگذار است. اندازه‌گیری قابل اعتماد این مشخصه برای درک بنیادین و کاربردهای عملی پلیمرها و هم‌چنین برای تعیین ارتباط کمی ساختار-عملکرد آن‌ها، ارزشمند است. از روش‌های متفاوتی برای ارزیابی این مشخصه استفاده می‌شود. در این مطالعه، شش روش نیمه تجربی: اندازه‌گیری کاهش دمای ذوب، تورم تعادلی، زاویه تماس، نقاط جدایی فازی، فشار بخار و سوانگاری گاز معکوس مرور شدند. در این روش‌ها به ترتیب دمای ذوب تعادلی پلیمر خالص و آمیزه پلیمری، میزان تورم تعادلی پلیمر شبکه‌ای در حضور متورم‌کننده، انرژی سطحی اجزای تشکیل دهنده آمیزه پلیمری، ترکیب درصد تعادلی اجزاء در سامانه دوفازی، نسبت فشار جزئی حلال به فشار جزئی اشباع آن و حجم بازداری به صورت تجربی اندازه‌گیری شده و پس از انطباق معادله مناسب بر این داده‌ها، مشخصه برهم کنش محاسبه می‌شود. در برخی از روش‌ها، مانند اندازه‌گیری زاویه تماس، فقط مشخصه برهم کنش مثبت در دمای آزمون قابل تعیین است. اما در برخی دیگر مانند اندازه‌گیری کاهش دمای ذوب، محدودیتی برای علامت مشخصه برهم کنش وجود ندارد. هم‌چنین، برخی از روش‌ها مانند تعیین نقاط جدایی فازی از قابلیت تعیین وابستگی مشخصه برهم کنش به کسر حجمی اجزا نیز برخوردارند.

واژه‌های کلیدی:

مشخصه برهم کنش فلوری-
هاگینز،
کاهش دمای ذوب،
تورم تعادلی،
زاویه تماس،
نمودار فازی،
فشار بخار،
سوانگاری گاز معکوس

*پست الکترونیکی مسئول مکاتبات:

khoubi@sut.ac.ir

۱ مقدمه

نیمه تجربی پرداخته می شود.

۲ کاهش دمای ذوب (Melting Point Depression)

رویکرد کاهش دمای ذوب، روش متداولی است که می تواند مشخصه های برهم کنش مثبت و منفی را حاصل کند [۱۵]. در این روش، افت دمای ذوب ماده ای با بلورینگی زیاد در اثر حضور مقادیر مختلف از ماده ای با بلورینگی کم (به عنوان رقیق کننده) معمولاً با استفاده از گرماسنجی روبشی تفاضلی (DSC) اندازه گیری می شود. هر کدام از این مواد، می توانند پلیمر یا کوچک مولکول باشند [۱۶]. سپس، با استفاده از معادله توصیف کننده کاهش دمای ذوب که عمدتاً به عنوان معادله فلوری شناخته می شود، مشخصه برهم کنش اجزا در مجاورت دمای ذوب به دست می آید [۱۷]. در صورتی که ماده بلورین، پلیمری با وزن مولکولی به اندازه کافی بزرگ و رقیق کننده یک کوچک مولکول باشد، معمولاً از معادله زیر استفاده می شود:

$$\frac{1}{T_m^0} - \frac{1}{T_m^1} = \frac{V_p}{V_d} \frac{R}{\Delta H_m^0} [\phi_d - \chi \phi_d^2] \quad (1)$$

که در آن، T_m^0 و T_m^1 به ترتیب دمای ذوب ایده آل پلیمر خالص و مخلوط رقیق شده آن، V_p و V_d به ترتیب حجم مولی واحد تکراری پلیمر و رقیق کننده، ΔH_m^0 گرمای ذوب بلور ایده آل پلیمر خالص، χ مشخصه برهم کنش پلیمر-رقیق کننده، ϕ_d کسر حجمی رقیق کننده و R ثابت جهانی گازها است. بر اساس رابطه فوق، افزایش میزان کاهش دمای ذوب به معنای مقدار کمتر χ و برهم کنش بین مولکولی قوی تر است [۱۸]. رویکردهای مختلفی برای استفاده از معادله فوق وجود دارد، اما متداول ترین روش، تلفیق آن با معادله زیر برای توصیف وابستگی مشخصه برهم کنش به دما است:

$$\chi = \frac{B' V_d}{RT} \quad (2)$$

که در آن، B' ثابتی مستقل از دماست که به چگالی انرژی برهم کنش مربوط می شود [۱۶-۱۵]. در رابطه فوق، T با T_m^0 جایگزین می شود. با جایگذاری معادله فوق در معادله ۱ و رسم سمت چپ معادله حاصل (معادله ۳) بر حسب ϕ_d / T_m^0 ، مشخصه برهم کنش با استفاده از شیب بهترین خط برازش یافته به صورت تابعی از دما به دست می آید [۱۹-۱۶، ۱۸].

مشخصه برهم کنش اجزا در آمیزه های پلیمری، عاملی کلیدی است که بر امتزاج پذیری و مورفولوژی و در نهایت بر خواص کاربرد محصولات نهایی اثرگذار است. کمی کردن این مشخصه برای پیش بینی نمودار فازی، حلالیت و بسیاری از خواص دیگر پلیمرها بحرانی است. به عنوان مثال، در سامانه های پلیمری مورد استفاده در سلول های خورشیدی، می توان با تنظیم مشخصه برهم کنش اجزا، عملکرد فوتوولتائیک (Photovoltaic) را بهینه کرد. از این رو، اندازه گیری قابل اعتماد این مشخصه برای درک بنیادین و کاربردهای عملی پلیمرها و هم چنین برای تعیین ارتباط کمی ساختار-عملکرد آنها، ارزشمند است. اما تعیین تجربی و نظری این مشخصه معمولاً چالش برانگیز است [۳-۱]. نظریه فلوری-هاگینز، چارچوب مهمی برای توصیف رفتار فازی آمیزه های پلیمری بر اساس عبارتی وابسته به دما به نام مشخصه برهم کنش فلوری-هاگینز (χ) است. نتایج تجربی برای χ معمولاً به صورت تابعی از دما (T) به شکل $\chi(T) = \chi_S + \chi_H / T$ گزارش می شود که در آن χ_S و χ_H به ترتیب منشأ آنتروپیک و آنتالپیک دارند. برای بخش های پلیمری که از نظر شیمیایی نامشابه هستند، برای مثال پلیمری قطبی با پلیمری غیرقطبی، در اکثر مواقع سهم آنتالپیک غالب و سهم آنتروپیک ناچیز است. اما در مورد بخش های پلیمری که از نظر شیمیایی مشابه هستند، سهم آنتروپیک ناچیز نیست و لازم است در تحلیل رفتار فازی در نظر گرفته شود. به طور کلی، این مشخصه به معنای عدم تمایل اجزا به یکدیگر است. به عبارت دیگر، برهم کنش کم منجر به افزایش مشخصه برهم کنش می شود، در حالی که مشخصه برهم کنش کوچک به برهم کنش های مطلوب در جهت امتزاج پذیری دلالت می کند. در این راستا، عدم شباهت شیمیایی زیاد میان دو جزء معمولاً به مشخصه برهم کنش زیاد منجر می شود، در حالی که برهم کنش میان اجزا با ساختار شیمیایی مشابه منجر به مشخصه برهم کنش کوچک یا منفی می شود [۴-۳].

اندازه گیری زاویه تماس [۵]، تورم تعادلی [۶]، کاهش دمای ذوب [۷]، تعیین نقاط جدایی [۸-۱۰]، "تفرق اشعه ایکس در زاویه کم (SAXS)، تفرق نوترون در زاویه کم (SANS)" [۱۱]، سوانگاری گاز معکوس (Inverse Gas Chromatography, IGC) [۱۲-۱۳] و فشار بخار [۱۴] از جمله روش هایی هستند که این مشخصه را با تلفیق داده های تجربی و معادلات نظری، حاصل می کنند. در مطالعه حاضر، به معرفی برخی از این روش های

که در آن، پلیمر بی نظم یا با بلورینگی کم نقش رقیق کننده (d) را دارد.

۳ زاویه تماس (Contact Angel)

یکی از روش‌های آسان برای تعیین مشخصه برهم‌کنش، اندازه‌گیری زاویه تماس است که می‌تواند برای مخلوط‌های بی نظم یا با بلورینگی کم که اندازه‌گیری نقطه ذوب آن‌ها با استفاده از DSC امکان‌پذیر نیست، استفاده شود [۱]. برای مواد غیرقطبی، رابطه خطی میان مشخصه حلالیت (هیلدبرند، Hildebrand) (δ) و جذر انرژی سطحی (γ) وجود دارد:

$$\delta = K\sqrt{\gamma} \quad (6)$$

در معادله فوق، K ضریب تناسب نسبتاً جامعی است. زمانی که مقدار این مشخصه با استفاده از داده‌های مشخصه حلالیت و انرژی سطح تعیین شده باشد، مشخصه برهم‌کنش را می‌توان با استفاده از رابطه زیر به دست آورد:

$$\chi = \frac{v_{seg}}{kT}(\delta_1 - \delta_2)^2 + \chi_s \quad (7)$$

در معادله فوق، χ_s سهم آنتروپیک مشخصه برهم‌کنش است که مقدار آن برای پلیمری غیرقطبی در حلالی غیرقطبی معمولاً بین ۰/۳ تا ۰/۴ است و غالباً مقدار ۰/۳۴ برای آن در نظر گرفته می‌شود. هم‌چنین kT انرژی حرارتی و v_{seg} حجم یک بخش شبکه است [۲۳].

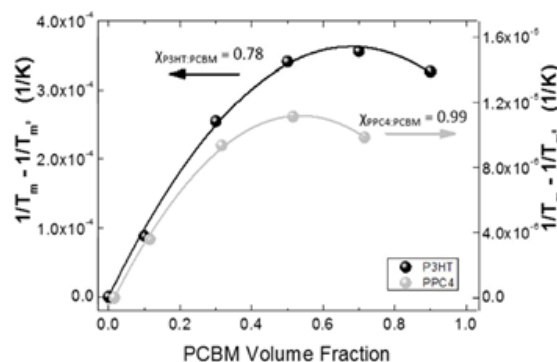
در مراجع مختلف، ارتباط میان مشخصه برهم‌کنش و انرژی سطحی معمولاً به شکل خلاصه شده زیر نشان داده می‌شود:

$$\chi = K(\sqrt{\gamma_1} - \sqrt{\gamma_2})^2 \quad (8)$$

که در آن، K ثابتی مثبت و γ_1 و γ_2 انرژی سطحی دو جزء هستند که با اندازه‌گیری زاویه تماس حاصل می‌شود [۱، ۲۳-۲۵]. برای تبدیل زاویه تماس به انرژی سطحی می‌توان از رابطه‌ای که توسط لی و نیومان [۲۶-۲۷] ارائه شده است، استفاده کرد.

۴ نقاط جدایی فازی

در این روش، لازم است نقاط جدایی فازی با استفاده از روش‌های تجربی مانند نقطه ابری (Cloud Point) [۸]



شکل ۱ کاهش دمای ذوب برای مخلوط‌های دوتایی P3HT:PCBM (دایره‌های سیاه، محور چپ) و PPC4:PCBM (دایره‌های خاکستری، محور راست) به صورت تابعی از کسر حجمی PCBM. مقدار مشخصه برهم‌کنش با انطباق داده‌ها بر معادله ۱ به دست آمده است [۲۱].

$$\frac{1}{\phi_d} \left(\frac{1}{T_m^0} - \frac{1}{T_m} \right) = \frac{V_p}{V_d} \frac{R}{\Delta H_m^0} \left(1 - \frac{BV_d}{R} \frac{\phi_d}{T_m^0} \right) \quad (3)$$

هم‌چنین در صورتی که مقدار واحدی برای مشخصه برهم‌کنش بدون توصیف وابستگی دمایی آن نیاز باشد، سمت چپ معادله ۴ (شکل تغییر یافته‌ای از معادله ۱) بر حسب ترکیب درصد رقیق کننده رسم می‌شود و پس از خطی‌سازی، مقدار واحدی برای مشخصه برهم‌کنش به دست می‌آید [۲۲-۲۰، ۷].

$$\frac{1}{\phi_d} \left(\frac{1}{T_m^0} - \frac{1}{T_m} \right) = \frac{V_p}{V_d} \frac{R}{\Delta H_m^0} (1 - \chi\phi_d) \quad (4)$$

بدیهی است مقدار ΔH_m^0 با استفاده از عرض از مبدأ بهترین خط برازش یافته حاصل می‌شود. هم‌چنین، می‌توان سمت چپ معادله ۱ را بر حسب کسر حجمی رقیق کننده رسم و با عبور دادن بهترین منحنی (درجه دو)، مشخصه برهم‌کنش را محاسبه کرد. دولند و همکاران [۲۱] با این روش، مشخصه برهم‌کنش مخلوط‌های دوتایی فولرن فیل-۶۱-بوتیریک اسید متیل استر (PCBM) را با پلی (۳-هگزیل تیوفن-۲،۵-دیل) (P3HT) و پلی (فولرن)-متناوب-۲،۵-بیس(اکتیل اگری) ترفنال آلدئید [PPC4] تعیین کردند، شکل ۱.

هم‌چنین برای تعیین مشخصه برهم‌کنش دو پلیمر با این روش، از معادله زیر استفاده می‌شود [۴]:

$$\frac{1}{T_m^0} - \frac{1}{T_m} = -\frac{V_p}{V_d} \frac{R}{\Delta H_m^0} \chi\phi_d^2 \quad (5)$$

شوند، یعنی $\chi_1 = \chi_2$. در غیراین صورت، می توان فرض کرد $\chi = (\chi_1 + \chi_2) / 2$. با این روش، می توان مشخصه برهم کنش را به صورت تابعی از دما و ترکیب درصد محاسبه کرد [۱۰]. برای مثال، هانگ و همکاران [۱۰]، نمودار فازی آلیاژ پلی (متیل متاکریلات) (PMMA) / پلی (استایرن-آماری-اکریلونیتریل) (SAN) پرنشده و پر شده با ۵٪ وزنی سیلیکای عمل آوری نشده (SiO₂) (Untreated) را با استفاده از آزمون های رئولوژیکی تعیین کردند، شکل ۲. آن ها سپس مشخصه برهم کنش را پس از در نظر گرفتن تغییر ترکیب درصد زمینه مخلوط به دلیل حضور پرکننده محاسبه کردند. نتایج حاصل در جدول ۱ نشان داده شده است.

۵ تورم تعادلی (Equilibrium Swelling)

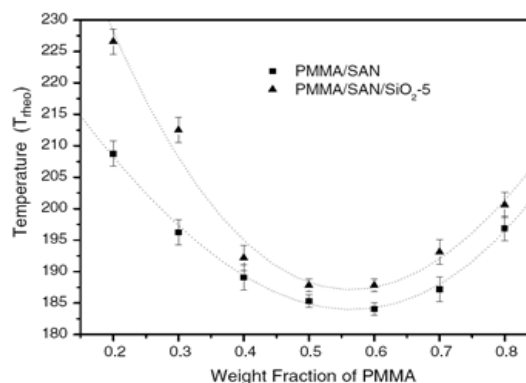
در سامانه های پلیمری اتصال عرضی شده، می توان از نظریه تورم تعادلی فلوری-رینر (Flory-Rehner) برای تعیین مشخصه برهم کنش فلوری-هاگینز استفاده کرد. معادله حاکم بر تورم تعادلی به شکل زیر است:

$$-\left[\ln(1 - \varphi_p) + \varphi_p + \chi\varphi_p^2\right] = 2\nu_{cross}\rho_p V_s(\varphi_p^{1/3} - \varphi_p / 2) \quad (11)$$

که در آن، φ_p کسر حجمی پلیمر متورم شده در حالت تعادل، χ مشخصه برهم کنش پلیمر-حلال، V_s حجم مولی حلال استفاده شده، ν_{cross} چگالی اتصالات عرضی پلیمر و ρ_p چگالی پلیمر است. برای محاسبه φ_p می توان از رابطه زیر استفاده کرد:

$$\varphi_p = \left(\frac{W_{before} - W_{filler}}{\rho_p}\right) / \left(\frac{W_{before} - W_{filler}}{\rho_p} + \frac{W_{after} - W_{before}}{\rho_s}\right) \quad (12)$$

که در آن W_{before} وزن نمونه پلیمری قبل از تورم، W_{after}



شکل ۲ نمودارهای فازی مخلوط های PMMA/SAN/SiO₂-5 و PMMA/SAN که با آزمون های رئولوژیکی تعیین شده اند [۱۰].

آزمون های رئولوژیکی [۹-۱۰] تعیین شوند. بر اساس نظریه فلوری-هاگینز، در حالت تعادل دو معادله زیر با استفاده از برابری پتانسیل شیمیایی دو جزء در دو فاز ($\mu'_i = \mu''_i, i = 1, 2$) حاصل می شود:

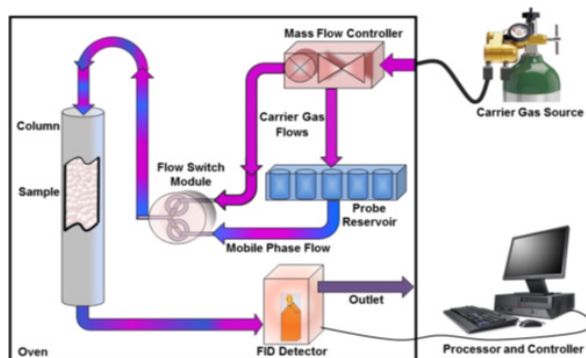
$$\chi_1 = \frac{\ln(\varphi'_1 / \varphi''_1) + (1 - r_1 / r_2)(\varphi'_2 - \varphi''_2)}{r_1(\varphi''_2 - \varphi'^2_2)} \quad (9)$$

$$\chi_2 = \frac{\ln(\varphi'_2 / \varphi''_2) + (1 - r_2 / r_1)(\varphi'_1 - \varphi''_1)}{r_2(\varphi''_1 - \varphi'^2_1)} \quad (10)$$

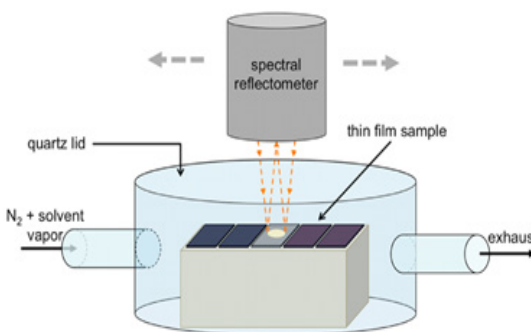
که در آن ها $\varphi'_i (i = 1, 2)$ و φ''_i به ترتیب کسر حجمی تعادلی جزء i در دو فاز هستند که از نمودار فازی حاصل می شوند. هم چنین، r_i تعداد بخش ها در هر زنجیر است که با معادله $r_i = P_i V_i (V_1 V_2)^{-1/2}$ به دست می آید و در آن P_i درجه پلیمر شدن متوسط عددی و V_i حجم منومر جزء i است. از لحاظ نظری، این دو معادله باید منجر به نتایج یکسانی

جدول ۱ نسبت های اجزا و مشخصات برهم کنش محاسبه شده در فازهای مختلف از مخلوط های پر شده و پرنشده PMMA/SAN در دمای ۲۰۰ °C بر اساس نمودار فازی شکل ۲ [۱۰].

$\chi(10^{-3})$	فاز غنی از SAN		فاز غنی از PMMA		مخلوط
	φ''_2, SAN	$\varphi''_1, PMMA$	φ'_2, SAN	$\varphi'_1, PMMA$	
۳/۸۵	۰/۷۴۵	۰/۲۵۵	۰/۱۷۰	۰/۸۳۰	پرنشده
۳/۶۶	۰/۷۰۵	۰/۲۹۵	۰/۲۷۸	۰/۷۲۲	پر شده



شکل ۴ طرح‌واره‌ای از دستگاه سوانگاری گاز معکوس [۳۰]



شکل ۳ طرح‌واره‌ای از محفظه مورد استفاده برای اندازه‌گیری فشار بخار حلال [۱۴]

$$\ln \frac{p}{p_0} = \chi_{12} \varphi_p^2 + \ln(1 - \varphi_p) + \left(1 - \frac{V_1}{V_2}\right) \varphi_p \quad (13)$$

که در آن، p/p_0 نسبت فشار جزئی حلال در محفظه به فشار جزئی اشباع آن، φ_p کسر حجمی پلیمر در فیلم، V_1 و V_2 به ترتیب حجم‌های مولی حلال و پلیمر هستند. کسر حجمی پلیمر را می‌توان به وسیله نسبت ضخامت فیلم متورم به فیلم اولیه تعیین کرد. با رسم عبارت $\ln \frac{p}{p_0} - \ln(1 - \varphi_p) - \left(1 - \frac{V_1}{V_2}\right) \varphi_p$ بر حسب مجذور کسر حجمی پلیمر (φ_p^2) و تعیین شیب بهترین خط عبوری از داده‌ها، مشخصه برهم‌کنش به دست می‌آید [۱۴].

۷ سوانگاری گاز معکوس

روش سوانگاری گاز معکوس، امکان اندازه‌گیری مشخصه برهم‌کنش را برای آمیزه بر پایه پلیمر بلورین و پلیمر بی‌نظم به ترتیب در بالای دمای ذوب (T_m) و دمای انتقال شیشه‌ای (T_g) فراهم می‌کند [۲۹]. در این روش، مقدار مشخصی از یک فاز ساکن غیرفرار درون حلال فراری حل شده و روی یک تکیه‌گاه خنثای متخلخل روکش داده می‌شود. درون دستگاه IGC، یک گاز حامل به صورت پیوسته از طریق ستون عبور داده می‌شود. زمانی که مایع ردیاب (Probe) فراری درون ستون تزریق می‌شود، ردیاب تبخیر شده و با گاز حامل جریان می‌یابد [۳۰]. طرح‌واره‌ای از این دستگاه در شکل ۴ نشان داده شده است. اگر وزن مولکولی فاز ساکن مشخص باشد، حجم بازداری ردیاب (V_R^0 , Retention Volume) با اندازه‌گیری IGC به دست آمده و به ضریب برهم‌کنش فلوری-هاگینز میان ردیاب (جزء ۱) و فاز ساکن (جزء ۲) با استفاده از معادله زیر ارتباط داده می‌شود:

وزن نمونه پلیمری بعد از تورم، W_{filter} وزن پرکننده و ρ_s چگالی حلال است [۲۸]. ابتدا لازم است چگالی اتصالات عرضی پلیمر را با روش دیگری کمی کرد که با وزن مولکولی متوسط پلیمر شبکه‌ای شده میان اتصالات عرضی (M_c) به شکل $v_{cross} (mol/g) = 1 / (2M_c)$ رابطه دارد. اخیراً این نظریه با در نظر گرفتن وابستگی مشخصه برهم‌کنش به دما و کسر حجمی پلیمر بازبینی شده است [۶].

۶ فشار بخار

تورم فیلم‌های پلیمری با بخار حلال یا روش فشار بخار می‌تواند برای تعیین مشخصه برهم‌کنش پلیمر-حلال در پلیمرهای ریخته‌گری شده به صورت فیلم‌های نازک استفاده شود. طرح‌واره‌ای از محفظه مورد استفاده برای انجام این آزمون در شکل ۳ نشان داده شده است. بخار حلال در گاز حامل N_2 به درون محفظه شیشه‌ای مهر و موم شده وارد می‌شود. دو روش آسان برای کنترل فشار بخار حلال وجود دارد: تغییر دادن غلظت حلال از طریق کنترل حرارتی محیط آزمایش یا تنظیم جریان گاز حامل از طریق مخزن حلال. فیلم‌های پلیمری که در معرض بخار حلال قرار دارند، با نفوذ حلال به درون آن‌ها متورم و تغییر در ضخامت آن‌ها به صورت درجا به وسیله انعکاس سنج طیفی (Spectral Reflectometer) متحرک، اندازه‌گیری می‌شود. در واقع، تورم فیلم پلیمری با بخار حلال تا زمانی ادامه می‌یابد که تعادلی میان فاز پلیمر و بخار ایجاد شده که در آن ضخامت فیلم ثابت باقی می‌ماند. در نهایت مخلوط بخار حلال و گاز نیتروژن از محفظه خارج می‌شود [۱۴].

بر اساس نظریه شبکه، مشخصه برهم‌کنش با رابطه زیر کمی می‌شود:

تعریف می کنند و در نتیجه معادله ۱۵ به صورت زیر بازنویسی می شود:

$$\chi_{1(23)} = \phi_2 \chi_{12} + \phi_3 \chi_{13} - \phi_2 \phi_3 \chi_{23} \quad (16)$$

مزیت استفاده از χ_{23} این است که بر اساس رابطه زیر مستقیماً به حجم بازداري بدون محاسبه مشخصات برهم کنش χ_{12} و χ_{13} مرتبط می شود [۱۲]:

$$\chi_{23}' = \frac{1}{\phi_2 \phi_3} \left[\ln \left(\frac{V_{g,blend}^0}{w_2 \nu_2 + w_3 \nu_3} \right) - \phi_2 \ln \left(\frac{V_{g,2}^0}{\nu_2} \right) - \phi_3 \ln \left(\frac{V_{g,3}^0}{\nu_3} \right) \right] \quad (17)$$

نتیجه گیری

در این پژوهش، شش روش نیمه تجربی برای تعیین مشخصه برهم کنش اجزا در سامانه های پلیمری مرور شد. روش کاهش دمای ذوب، مشخصه برهم کنش را در دمای ذوب آمیزه بر پایه پلیمری بلورین تعیین می کند. هم چنین، می تواند وابستگی دمایی آن را در محدوده دمای ذوب آمیزه تخمین زند. دسترسی به مقادیر صحیح دمای ذوب تعادلی پلیمر خالص و آمیزه پلیمری، پیش نیاز استفاده از این روش است. روش اندازه گیری زاویه تماس، برخلاف روش قبلی، فقط می تواند مقادیر مثبتی را برای این مشخصه تعیین کند، اما برای پلیمرهای بی نظم نیز قابل استفاده است. با تعیین نمودار فازی آمیزه پلیمری، می توان مشخصه برهم کنش را در دماها و ترکیب درصدهای مختلف تعیین کرد. برای ارزیابی مشخصه برهم کنش پلیمرهای شبکه ای با سیال متورم کننده می توان از انطباق معادله فلوری-رینر بر داده های تورم تعادلی استفاده کرد، مشروط براین که چگالی اتصالات عرضی پلیمر مشخص باشد. روش تورم فیلم های پلیمری با بخار حلال (روش فشار بخار) می تواند برای تعیین مشخصه برهم کنش پلیمر-حلال در پلیمرهای ریخته گری شده به شکل فیلم های نازک استفاده شود. سوانگاری گاز معکوس، امکان اندازه گیری مشخصه برهم کنش را برای آمیزه بر پایه پلیمر بلورین و پلیمر بی نظم به ترتیب در بالای دمای ذوب و دمای انتقال شیشه ای فراهم می کند.

$$\chi_{12} = \ln \left(\frac{273.16 R \nu_2}{V_g^0 p_1^0 V_1} \right) - 1 + \frac{V_1}{M_2 \nu_2} - \frac{p_1^0}{RT} (B_{11} - V_1) \quad (14)$$

که در آن، T دمای ستون، B_{11} ضریب دوم ویریال ردیاب، p_1^0 فشار بخار ردیاب در دمای T ، V_1 حجم مولی ردیاب در دمای T ، M_2 وزن مولکولی فاز ساکن، ν_2 حجم مخصوص فاز ساکن و R ثابت جهانی گازها است. در مطالعه IGC پلیمرها، مقدار M_2 بزرگ بوده و از عبارت $V_1/M_2 \nu_2$ می توان صرف نظر کرد. از آنجایی که معمولاً فقط چند میکرولیتر از ردیاب تزریق می شود، کسر حجمی پلیمر به سمت یک میل کرده، مشخصه برهم کنش به دست آمده با χ_{12}^∞ نشان داده می شود. در صورتی که مقدار مشخصه برهم کنش کوچک تر از ۰/۵ باشد، مایع ردیاب معمولاً به عنوان حلال خوب در نظر گرفته می شود، درحالی که مقدار بزرگ تر از ۰/۵ به معنای حلال ضعیفی است که منجر به جدایی فازی می شود [۳۱-۱۲، ۱۳]. با استفاده از این روش، مشخصه برهم کنش سدیم آلزینات با ۱۶ حلال در محدود دمایی K ۳۷۳/۲-۳۹۸/۲ تعیین شده است [۱۳].

زمانی که یک آلیاژ پلیمری با IGC مطالعه شود، معادله ۱۴ می تواند با استفاده از داده های زمان بازداري و چگالی آلیاژ برای آلیاژ به کار رود. مشخصه برهم کنش به دست آمده از آلیاژ به صورت $\chi_{1(23)}$ بیان می شود. با اعمال معادله فلوری-هاگینز محلول های پلیمری به سامانه ای سه تایی با دو پلیمر و یک ردیاب، مشخصه برهم کنش $\chi_{1(23)}$ می تواند به مشخصه برهم کنش پلیمر-ردیاب (χ_{12} و χ_{13}) و مشخصه برهم کنش پلیمر-پلیمر (χ_{23}) با استفاده از معادله زیر ارتباط داده شود:

$$\chi_{1(23)} = \phi_2 \chi_{12} + \phi_3 \chi_{13} - \phi_2 \phi_3 \chi_{23} (V_1 / V_2) \quad (15)$$

که در آن ϕ_2 و ϕ_3 کسر حجمی دو پلیمر و V_2 حجم مولی جزء ۲ است. از آنجایی که حجم مولی پلیمرها ممکن است به درستی مشخص نباشد، در IGC متداول است که مشخصه برهم کنش نرمال شده ردیاب را به شکل $\chi_{23}' = \chi_{23} (V_1 / V_2)$

مراجع

- Gao M., Liang Z., Geng Y., Ye L., Significance of Thermodynamic Interaction Parameters in Guiding the Optimization of Polymer: Nonfullerene Solar Cells, *Chemical Communications*, 56, 12463-12478, **2020**.
- Ye L., Collins B.A., Jiao X.C., Zhao J. B., Yan H., Ade H., Miscibility-Function Relations in Organic Solar Cells: Significance of Optimal Miscibility in Relation to Percolation, *Advanced Energy Materials*, 8, 1703058, **2018**.
- Ségolène A., Zhishuai G., Everett S. Zofchak M.C., Fredrickson G.H., Ganesan V., Hawker C.J., Lynd N.A., Non-Intuitive Trends in Flory–Huggins Interaction Parameters in Polyether-Based Polymers, *Macromolecules*, 54, 6670–6677, **2021**.
- Aid S., Eddhahak A., Khelladi S., Ortega Z., Chaabani S., Tcharkhtchi A., On the Miscibility of PVDF/Pmma Polymer Blends: Thermodynamics, Experimental and Numerical Investigations, *Polymer Testing*, 73, 222-231, **2019**.
- Ma R., Li G., Li D., Liu T., Luo Z., Zhang G., Zhang M., Wang Z., Luo S., Yang T., Liu F., Yan H., Tang B., Understanding the Effect of End Group Halogenation in Tuning Miscibility and Morphology of High-Performance Small Molecular Acceptors, *Solar RRL*, 4, 2000250, **2020**.
- Paulin J.A., Lopez-Aguilar J.E., Fouconnier B., Vargas R.O., Lopez-Serrano F., Revisiting the Flory–Rehner Equation: Taking a Closer Look at the Flory–Huggins Interaction Parameter and Its Functionality with Temperature and Concentration with Nipa as a Case Example, *Polymer Bulletin*, 79, 6709–6732, **2022**.
- Liu Y., Xian K., Peng Z., Gao M., Shi Y., Deng Y., Geng Y., Ye L., Tuning the Molar Mass of P3ht Via Direct Arylation Polycondensation Yields Optimal Interaction and High Efficiency in Nonfullerene Organic Solar Cells, *Journal of Materials Chemistry A*, 9, 19874-19885, **2021**.
- Friedrich C., Riemann R.E., Rheological and Thermodynamic Study of the Miscible Blend Polystyrene/Poly(Cyclohexyl Methacrylate), *Polymer*, 37, 2499-2507, **1996**.
- Chopra D., Kontopoulou M., Vlassopoulos D., Hatzikiriakos S. G., Effect of Maleic Anhydride Content on the Rheology and Phase Behavior of Poly(Styrene-Co-Maleic Anhydride)/Poly(Methyl Methacrylate) Blends, *Rheologica Acta*, 41, 10-24, **2002**.
- Huang Y., Jiang S., Li G., Chen D., Effect of Fillers on the Phase Stability of Binary Polymer Blends: A Dynamic Shear Rheology Study, *Acta Materialia*, 53, 5117–5124, **2005**.
- Lee J.H., Balsara N.P., Chakraborty A.K., Krishnamoorti R., Hammouda B., Thermodynamics and Phase Behavior of Block Copolymer/Homopolymer Blends with Attractive and Repulsive Interactions, *Macromolecules*, 35, 7748–7757, **2002**.
- Huang J.C., Determination of Polymer–Polymer Interaction Parameters Using Inverse Gas Chromatography, *Journal of Applied Polymer Science*, 671-680, 90, **2003**.
- Ugraskan V., Isik B., Yazici O., Cakar F., Thermodynamic Characterization of Sodium Alginate by Inverse Gas Chromatography, *Journal of Chemical & Engineering Data*, 65, 1795-1801, **2020**.
- Emerson J.A., Toolan D.T., Howse J.R., Furs E. M., Thomas H. Epps I., Determination of Solvent–Polymer and Polymer–Polymer Flory–Huggins Interaction Parameters for Poly(3-Hexylthiophene) Via Solvent Vapor Swelling, *Macromolecules*, 46, 6533–6540, **2013**.
- Zhang L., Yi N., Zhou W., Yu Z., Liu F., Chen Y., Miscibility Tuning for Optimizing Phase Separation and Vertical Distribution toward Highly Efficient Organic Solar Cells, *Advanced Science*, 6, 1900565, **2019**.
- Ai Q., Zhou W., Zhang L., Huang L., Yin J., Yu Z., Liu S., Ma W., Zeng J., Chen Y., Ternary Organic Solar Cells: Compatibility Controls for Morphology Evolution of Active Layers, *Journal of Materials Chemistry C*, 5, 10801-10812, **2017**.
- Flory P.J., Principles of Polymer Chemistry, Cornell University Press, USA, **1953**.
- Ghasemi M., Ye L., Zhang Q., Yan L., Kim J.H., Awartani O., You W., Gadisa A., Ade H., Panchromatic Sequentially Cast Ternary Polymer Solar Cells, *Advanced Materials*, 29, 1604603, **2017**.
- Kim J. Y., Order–Disorder Phase Equilibria of Regioregular Poly (3-Hexylthiophene-2, 5-Diyl) Solution, *Macromolecules*, 51, 9026-9034, **2018**.
- Wang Q., Li M., Peng Z., Kirby N., Deng Y., Ye L., Geng Y., Calculation Aided Miscibility Manipulation Enables Highly Efficient Polythiophene:Nonfullerene Photovoltaic Cells, *Science China Chemistry*, 64, 478-487, **2021**.
- Dowland S.A., Salvador M., Perea J.D., Gasparini N., Langner S., Rajoelson S., Ramanitra H.H., Lindner B.D., Osvet A., Brabec C.J., Suppression of Thermally Induced Fullerene Aggregation in Polyfullerene-Based Multiacceptor Organic Solar Cells, *ACS Applied Materials & Interfaces*, 9, 10971-10982, **2017**.

22. Liang Z., Li M., Wang Q., Qin Y., Stuard S.J., Peng Z., Deng Y., Ade H., Ye L., Geng Y., Optimization Requirements of Efficient Polythiophene: Nonfullerene Organic Solar Cells, *Joule*, 1278-1295, **2020**.
23. Kouijzer S., Michels J.J., van den Berg M., Gevaerts V.S., Turbiez M., Wienk M. M., Janssen R. A.J., Predicting Morphologies of Solution Processed Polymer:Fullerene Blends, *Journal of the American Chemical Society*, 135, 12057-12067, **2013**.
24. Lv J., Tang H., Huang J., Yan C., Liu K., Yang Q., Hu D., Singh R., Lee J., Lu S., Additive-Induced Miscibility Regulation and Hierarchical Morphology Enable 17.5% Binary Organic Solar Cells, *Energy & Environmental Science*, 14, 3044-3052, **2021**.
25. Nilsson S., Bernasik A., Budkowski A., Moons E., Morphology and Phase Segregation of Spin-Casted Films of Polyfluorene/Pcbm Blends, *Macromolecules*, 40, 8291-8301, **2007**.
26. Li D., Neumann A., A Reformulation of the Equation of State for Interfacial Tensions, *Journal of Colloid and Interface Science*, 137, 304-307, **1990**.
27. Li D., Neumann A., Contact Angles on Hydrophobic Solid Surfaces and Their Interpretation, *Journal of Colloid and Interface Science*, 148, 190-200, **1992**.
28. Kim D.Y., Park J.W., Lee D.Y., Seo K.H., Correlation between the Crosslink Characteristics and Mechanical Properties of Natural Rubber Compound Via Accelerators and Reinforcement, *Polymers*, 12, 2020, **2020**.
29. Riedl B., Prud'homme R. E., The Determination of the Thermodynamic Interaction Parameter X in Polymer Blends, *Polymer Engineering & Science*, 24, 1291-1299, **1984**.
30. Mohammadi-Jam S., Waters K.E., Inverse Gas Chromatography Applications: A Review, *Advances in Colloid and Interface Science*, 212, 21-44, **2014**.
31. Fernandez-Berridi M.J., Eguiazabal J.I., Elorza J.M., Irui J.J., Vapor-Pressure Osmometry and Inverse Gas Chromatography in the Analysis of Thermodynamic Properties of Polymer Solutions, *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, 21, 859-868, **1983**.

شناخت و تبیین اصطلاحات فرایند ساخت و ارزیابی تولید زیست‌پایدار-بخش اول؛ معرفی و تاریخچه

مترجمان: سیدحمیدرضا صباغی، علی عباسیان*

تهران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران، گروه مهندسی پلیمر

چکیده ...

اصطلاحات رایج و تدوین شده، برای ارتباط و تعامل دقیق در میان پژوهشگران، دانشمندان، مهندسان و دیگر تصمیم‌گیرندگان، نیازی حیاتی محسوب می‌شود. برای کمک به شناخت فرایند ساخت، درک مشترکی از اصطلاح‌شناسی به منظور تعامل و ارتباطی کارا و موثر در صنعت، اجباری است؛ هم‌چنین این مهم می‌تواند خودکارسازی (Automation) و هم‌کنش‌پذیری (Interoperability) ابزارهای نرم‌افزاری را تسهیل ببخشد. شناخت مشخصات فرایند ساخت، ارزیابی و پیشبرد دقیقی از فرایندهای ساخت واحد، محصولات و سامانه‌های مرتبط با آن را در چشم‌انداز زیست‌پایدار (Sustainable) امکان‌پذیر می‌کند. برای توسعه و اجرای استانداردهای مرتبط با موضوع زیست‌پایداری (Sustainability) و دستیابی به بهترین اقدام‌ها در صنعت، لازم است تا علاوه بر نام‌گذاری‌های مصوب؛ معانی، تعاریف و درکی رایج و مشترک از اصطلاحات در کاربردهای گوناگون به وجود آید. در حال حاضر بسیاری از اصطلاحات مورد استفاده معنایی نامشخص، مبهم، و گنگ دارد و به طور کلی از لحاظ مفهومی [برای پژوهشگران و کارکنان در صنعت] هم‌پوشانی داشته و سردرگمی ایجاد می‌کند. اگرچه تلاش‌های استانداردسازی در ارتباط با شناسایی و تعریف اصطلاح‌شناسی ادامه دارد، اما هم‌چنان مجموعه‌ی مشترک و مدونی در این حوزه توسعه نیافته است.

هدف از این کار در پژوهش و بازنگری فعلی، تسهیل تلاش‌های مداوم برای توسعه‌ی استانداردهای مشخص، از طریق هماهنگ‌سازی ارائه‌ی متنوعی از اصطلاحات مورد استفاده در راستای توصیف فرایندهای تولید بود. نتیجه‌ی بازنگری این مقاله، مجموعه‌ی مختصری از ۴۷ اصطلاح با تمرکز بر شناخت مشخصات فرایند است که روش‌های ایجادشده در جهت تولید زیست‌پایدار را توصیف می‌کند؛

واژه‌های کلیدی:

مشخصه‌سازی فرایند،
اصطلاح‌شناسی،
تولید زیست‌پایدار،
مدل‌سازی فرایند،
فرایند ساخت واحد (فرسو)،
ساخت

*پست الکترونیکی مسئول مکاتبات:

abbasian.a@srbiau.ac.ir

۱ مقدمه

تولید غالباً به عنوان خاستگاه بسیاری از آسیب‌های زیست‌محیطی یا بوم‌شناختی (Ecological) شناخته می‌شود و همین امر موجب شده است تا پژوهش‌ها، گزارش‌ها و حتی قوانینی با نگاه زیست‌پایداری برای بهبود این مهم، شکل گیرد. اولین قانون محیط‌زیست در اواخر دهه ۱۹۴۰، با نام قانون کنترل آلودگی آب در ایالت متحده ظاهر شد. در سال ۱۹۶۳ قانون اقدام برای هوای پاک (Clean Air Act) توسط قانون سیاست ملی زیست‌محیطی (National Environmental Policy Act) تا سال ۱۹۶۹ پیگیری و دنبال شد که به‌طور قاطع اجرای سیاست‌های زیست‌پایداری را تصویب می‌کرد. اندکی بعد در سال ۱۹۷۰ کارگزار حفاظت از محیط‌زیست آمریکا (EPA) به وجود آمد. با ادامه این روند قوانین مشابهی هم در سطح جهانی در بازه‌ی زمانی مشابه وضع شدند. برای نمونه می‌توان به آلودگی تغذیه (Pollution Diet) ژاپن (در سال ۱۹۷۰) و کارگزاری محیط‌زیست آلمان غربی فدرال (در سال ۱۹۷۱) اشاره کرد. تلاش‌های بین‌المللی مهمی در قالب جلسات و گزارش‌ها صورت گرفت؛ برای مثال همایش سازمان ملل متحد با نام Human Environment (محیط‌زیست انسان در سال ۱۹۷۲)، گزارش Brundtland (سال ۱۹۸۷)، Earth Summit in Rio (اجلاس زمین در سال ۱۹۹۲)، و Agenda ۲۱ (در سال ۱۹۹۲) چند نمونه از اقدام‌های مهم در آن بازه‌ی زمانی هستند. Brundtland گزارشی قابل ملاحظه است زیرا برای اصطلاح «توسعه زیست‌پایدار» (Sustainable Development) تعریف قابل‌تأملی ارائه داده است: «توسعه‌ای که نیازهای نسل حاضر را در شرایطی برآورده می‌کند که هیچ‌گونه تسامح و سازشی را در به خطر افتادن توانایی نسل‌های آینده برای تأمین نیازهای خودشان نمی‌پذیرد.»

Elkington در سال ۱۹۹۷ اظهار داشت کسب‌وکارها موظفند برای دستیابی به خط‌مشی سه‌گانه (مردم، سودآوری، سیاره: که امروزه با مثلث انسان-اقتصاد-محیط‌زیست شناخته می‌شوند) در برنامه‌ریزی‌های مدیریتی خود، هم سرمایه‌ی اجتماعی و هم سرمایه‌ی طبیعی را در کنار سرمایه‌ی اقتصادی‌شان منظور کنند. بنابراین، تعریف Brundtland به ابعاد چندمنظوره بسط و گسترش یافت و توسط Hockerts و Dyllick در سال ۲۰۰۲ برای تبیین نقشه‌ی راه شرکت‌های بزرگ در قابلیت زیست‌پایداری به‌عنوان «مواجه شدن با نیازهای ذی‌نفعان مستقیم و غیرمستقیم شرکت‌ها (مانند سهام‌داران، کارمندان، موکلان، گروه‌های فشار، و جوامع) بدون به خطر انداختن توانایی ذی‌نفعان آینده در تأمین نیازهای خودشان» تطبیق داده شد.

قرن جدید شاهد تغییر در استفاده از واژه‌ی «زیست‌پایداری»

Sustainability» به‌عنوان اسم به سمت واژه "زیست‌پایدار" - Sustainable" به‌عنوان صفت بود، این مهم نشان‌دهنده‌ی جابه‌جایی مفهومی در اندیشیدن قابلیت زیست‌پایداری به‌عنوان هدفی نهایی برای محصولات است، به‌طوری که قابلیت زیست‌پایداری در ویژگی محصولات، سامانه‌ها و روش‌های صنعتی نمود پیدا کرده است. اما طراحی زیست‌پایدار به‌عنوان فعالیتی مهندسی در داخل صنعت، برای نمونه توسط Mihelcic و همکارانش در سال ۲۰۰۳ این گونه بیان شد: «طراحی سامانه‌های انسانی و صنعتی باید به گونه‌ای باشد که بتوان اطمینان حاصل کرد که بشر، از منابع طبیعی و ظرفیت چرخه‌های عمر طوری استفاده نکند که منجر به کاهش کیفیت سلامت زندگی شود؛ یا حتی فرصت‌های اقتصادی در آینده را به علت واردکردن ضربه‌های مضر به شرایط اجتماعی، سلامت انسان و محیط‌زیست تحت‌الشعاع قرار دهد. ساخت زیست‌پایدار دهه‌ی بعد توسط وزارت بازرگانی ایالت متحده در سال ۲۰۱۳ به‌عنوان «خلق محصول ساخته‌شده از طریق فرایندها و تجهیزاتی که حداقل اثر مخرب بر محیط‌زیست، صرفه‌جویی در انرژی و منابع طبیعی دارند و هم‌چنین برای کارمندان و جوامع ایمن بوده، شرایط اقتصادی مفیدی را به ارمغان می‌آورند»، تعریف شد. این دو تعریف بیانگر ایده‌هایی است که قبلاً در گزارش Brundtland و Elkington ارائه شده است. هر دو تعریف ادعا می‌کنند که آثار منفی زیست‌محیطی، اقتصادی و اجتماعی مرتبط با صنعت تولید وجود دارند که باید برای حفظ و پشتیبانی از توسعه‌ی تمدن جهانی کاهش یابند.

به‌عنوان اولین گام در جهت کاهش چنین آثار منفی، بسیاری از شرکت‌ها سنجه‌هایی را برای بررسی زیست‌پایداری ارائه کردند که عملکرد اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی اقدامات کسب‌وکارها را به‌صورت کمی می‌سنجد. به‌منظور تعیین کمی عملکرد زیست‌پایداری، معمولاً از روش‌های ارزیابی-چرخه‌ی عمر یا LCA که در چندین ابزار نرم‌افزاری پیاده‌سازی شده‌اند، استفاده می‌شود. با این وجود، باید همواره در نظر داشت در حالی که همین روش‌ها و ابزارهای موجود اغلب خسته‌کننده، پرهزینه و زمان‌بر هستند؛ می‌توانند ارزیابی‌ای هرچند کوچک برای بهبود عملکرد پیشنهاد دهند و اقدامات زیست‌پایدارتری را به ارمغان آورند.

برای رفع این مشکلات روش‌های زیست‌پایدار و جامع‌تری برای طراحی محصول توسعه یافته است، به‌عنوان نمونه می‌توان به گزارش Chiu و Kremer در سال ۲۰۱۱ و Ramani و همکارانش در سال ۲۰۱۰ مراجعه کرد، اما این گزارش‌ها اغلب ارزیابی دقیقی از فرایند تولید و عملکرد سامانه در اختیار

رایج است (اصطلاح‌شناسی و تعریف‌ها).» در حال حاضر، بسیاری از اصطلاحاتی که در زمینه‌ی ساخت زیست‌پایدار استفاده می‌شوند، معنایی نامشخص، مبهم و گنگ داشته و به‌طور کلی از لحاظ مفهومی سردرگمی ایجاد می‌کنند. اگرچه تلاش‌های استانداردسازی در راستای توسعه‌ی اصطلاحات از جمله اقدامات ارائه‌شده از جانب ASTM در دست انجام است، اما هنوز مجموعه‌ای مدون از اصطلاحات و تعاریف مشخص توسعه نیافته است.

بدین ترتیب، هدف این مقاله تعریف و معنای ادبیاتی است که قادر باشد به‌گونه‌ای استاندارد برای شناخت مشخصات فرایند ساخت واحد (UMP) یا به اختصار فرسو مورد استفاده قرار گیرد. این مهم موجب می‌شود تا بتوان علاوه بر پشتیبانی، ارزیابی مناسبی از زیست‌پایداری محصولات، فرایندهای تولید، و سامانه‌های تولید به‌دست آورد. شناخت دقیق مشخصات فرایند ساخت واحد می‌تواند به‌عنوان مولفه‌ای از رویکردهای تجزیه و تحلیل پایین-بالا (Bottom-Up) برای هدایت و راه‌یابی ارزیابی‌های قابلیت زیست‌پایداری محصول مورد استفاده قرار گیرند. تأکید و تکیه‌ی این مقاله بر اصطلاح‌شناسی و مقدم بودن آن بر ادبیات تولید زیست‌پایدار یا ارزیابی-چرخه‌عمر، از آن‌جا سرچشمه می‌گیرد که همواره باید در نظر داشت هدف اصلی این مقاله آن است که بتوان ارزیابی‌های تولید زیست‌پایدار را به‌طور گسترده در دسترس همگان برای استفاده قرار دهد و این مهم هیچ‌گاه امکان‌پذیر نخواهد بود مگر آن‌که درک و تعامل مشترک از اصطلاح‌ها در بین همگان شکل گیرد. بسیاری از اصطلاحات مورد استفاده در این مقاله، دارای تعاریف رایج و پذیرفته‌شده‌ای هستند که برای کامل بودن در این‌جا آورده شده‌اند.

۲ روشی برای تعریف و بیان اصطلاح‌شناسی

در سال ۲۰۰۸ Muller و Seuring با توجه به مطالعه خود گزارش دادند که بازنگری (Review) نوشتارگان، اصطلاحات و مقاله‌ها دو هدف اساسی را دنبال می‌کند: «اول: با شناسایی الگوها، مضامین، محتویات و اشکالات، می‌توان تحقیقات و پژوهش‌های گسترده‌ی موجود را خلاصه و تدوین کرد. دوم: این بازنگری به شناسایی محتوای مفهومی هر مقاله در قالب زمینه‌ی موردنظرش کمک کرده و قادر است برای توسعه‌ی نظری نیز سهم باشد.» با وجود این توضیح و از همین منظر، اهداف این مقاله دسته‌بندی می‌شود: (۱) خلاصه کردن زبان و مفهوم‌های استفاده شده در زمینه شناخت مشخصات فرایند ساخت واحد، برای محصول برآورد و ارزیابی زیست‌پایداری،

نمی‌گذارند. شناخت مشخصات هر فرایند ساخت می‌تواند با هدف کمک به جزئیات ارزیابی‌های سامانه تولید استفاده شود و از این طریق این خلأ مهم را جبران کند. مدل‌سازی فرسو (UMP) (فرایند ساخت واحد (Unit Manufacturing Process) و توسعه‌های مقرون‌به‌صرفه و سازگار با محیط‌زیست توسط شورای تحقیقات ملی آمریکا (National Research Council, NRC) در سال ۱۹۹۵ به‌عنوان دو حوزه اصلی برای پژوهش‌های مهندسی و نوآوری مشخص شده‌اند.

به‌طور خلاصه در بازار رقابتی جهان امروز، تولیدکنندگان می‌بایست ملزم و متعهد به: خلق و ارائه محصولات با کیفیت زیاد به روشی موثر، مقرون به صرفه و کاهش آثار زیست‌محیطی ناشی از فعالیت‌هایشان و از همه مهم‌تر دارای «مسئولیت اجتماعی» باشند. بنابراین، دور از انتظار نیست که همواره چالشی مهم در کمی‌کردن اثرگذار و برقراری ارتباط و تعامل موثر در «عملکرد زیست‌پایدار» فعالیت فرایندهای فرسو، به‌منظور تسهیل در روند بهبود تصمیم‌ها نهفته باشد و در نظر داشته باشید که هم‌چنان هم شیوه‌ها و اقدامات فعلی صنعت برای محاسبه «عملکرد زیست‌پایدار» تولیداتشان، استاندارد نیستند. در نتیجه، به تدریج این‌گونه اقدام‌ها برای محاسبه و سنجش «عملکرد فرایندهای تولید و تجهیزات» به اطلاعات موقت و روش‌های غیریکنواخت متکی می‌شوند. خوشبختانه میل و علاقه‌ای از جانب صنعت، سازمان‌های دولتی و سازمان‌های توسعه‌ی استاندارد، برای تغییر این وضعیت به وسیله‌ی توسعه‌ی راهنماهای استاندارد مرتبط با موضوع زیست‌پایداری در حال شکل‌گیری است، تا از این طریق بتوان در جهت تسهیل ارتباطات و تصمیم‌گیری‌ها گام برداشت.

نمونه‌ای از این نوع تلاش‌ها استانداردهای بین‌المللی E3012 ASTM سال ۲۰۱۶ (راهنمای استاندارد برای شناخت جنبه‌های زیست‌محیطی فرایندهای ساخت) و ASTM WK35705 سال ۲۰۱۴ (راهنمای جدید شناخت مشخصات زیست‌پایداری فرایندهای ساخت) است. طیف و گستره ASTM در استانداردهای ساخت زیست‌پایدار (در حال حاضر به صورت ارقام کاری) به جنبه‌های تحلیلی، اصطلاح‌شناسی، مشخصات فرایندهای ساخت و طبقه‌بندی زباله‌ها در تأسیسات تولیدی معطوف می‌شود. راهنمایی‌هایی که در حال حاضر در دست تهیه هستند برای کمک به سازندگان در مشخصه‌یابی فرایندهای ساخت در جهت زیست‌پایداری و پشتیبانی از تصمیم‌گیری‌های لازم در آینده، پیش‌بینی شده‌اند. اما هرگز نباید فراموش کرد که «انتقال استانداردها و راهنمایی‌های مرتبط با موضوع زیست‌پایداری به صنعت، مستلزم زبان و ادبیات مشترک و

این بازنگری، به منظور بیان و تعریف دقیق‌تر، چندین مفهوم در سطح‌های اساسی‌تر، دسته‌های جریان، گستره و طبقه‌بندی اضافه شدند. بنابراین در اصلاح ثانویه دسته‌بندی‌ها، سیر دسته‌بندی مفاهیم به صورت مرز، جریان، مواد، اندازه‌گیری، مدل، فرایند، گستره و طبقه‌بندی شکل گرفت. با ادامه روند بررسی و پژوهش، مشخص شد که دسته‌های فرایند و طبقه‌بندی اضافه بوده و می‌توان اصطلاحات آن‌ها را به دسته‌های دیگر مانند جریان، مدل، و گستره نسبت داد. در نهایت با اصلاح پایانی دسته‌بندی‌های تعریف‌شده به صورت مرز، جریان، ماده، مدل، اندازه‌گیری و گستره اختصاص یافتند. شاید بتوان گفت که به این دسته‌بندی نهایی می‌توان دسته‌های دیگری اضافه کرد، ولی این رویکرد و شیوهی دسته‌بندی برای سازمان‌دهی اصطلاح‌شناسی مناسب واقع شده است.

در تصمیم‌گیری درباره‌ی درج یک اصطلاح درون مجموعه‌های ذکر شده، با هدف ایجاد هماهنگی بیشتر میان اصطلاح‌ها، معیار اصلی برای ارتباط و هماهنگی این اصطلاحات نیازمند پاسخ به یک سوال است: «چگونه فرایند ساخت واحد یا فرسو توصیف و مشخص می‌شود؟» همان‌طور که طبقه‌بندی اصطلاحات ادامه یافت، برخی اصطلاح‌ها به عنوان مترادف سایر اصطلاحات از پیش تعریف‌شده، ارائه می‌شوند. از این مترادف‌ها می‌توان برای تعریف بیشتر معنای هر اصطلاح خاص کمک گرفت. با توجه به پایه و اساس هر اصطلاح مطابق با منابعش، تعریف‌های کلیدی آن‌ها در بیشتر موارد اصلاح نشد چرا که مطابق ادبیات منابعشان مفید به نظر می‌رسیدند.

۳ بازنگری نوشتارهای پیشین

می‌توان اقرار کرد که پذیرش مفهوم قابلیت زیست‌پایداری تلاشی همگانی بوده که مسلماً سرآغاز آن از کارگروه Brundtland با توجه به تعریفی که از توسعه‌ی زیست‌پایدار ارائه داد، آغاز شده است؛ چه تا پیش از این تعریف، بیشتر توجه‌ها معطوف به بهره‌وری اقتصادی در کاربردها بوده و کمتر جنبه‌های زیست‌محیطی و توسعه‌ی اجتماعی مدنظر قرار می‌گرفت. حال در کشورهای توسعه‌یافته با گذشت زمان، جامعه این مسئولیت اجتماعی مهم را درک کرده و شروع به پرداختن و تلفیق مفهوم توسعه‌ی زیست‌پایدار در پژوهش‌ها و کاربردهای عملیاتی‌تر با استفاده از شاخص‌های اساسی (Parris and Kates 2003) کرده است. به‌طور وسیع‌تر، قابلیت زیست‌پایداری در توسعه طیف گسترده‌تری از فناوری‌ها و همچنین سامانه‌های تخصصی و کاربردی گنجانده شده است. در حالی که ممکن است در بسیاری از موارد، گستره‌ی

۲) تا بتوان از این طریق، توسعه دلخواه را با حمایت نظری، روش‌ها و ابزارهای مرتبط با صنعت ایجاد کرد (مضامین و محتوای برخاسته از هر زمینه‌ای، به‌عنوان نتیجه‌ای از همین هدف هستند). در مقاله‌ی فعلی، روند بازنگری، رویکرد اصلاحی جدیدی را در پیش گرفته که برای استفاده به ترتیب زیر ارائه شده است:

۱. به‌منظور شناسایی زمینه‌های مرتبط به اصطلاح‌شناسی، ادبیات و متن مقالات بررسی شد.
۲. مجموعه اولیه‌ای از اصطلاحات کلیدی و منابع مرتبط با آن‌ها ایجاد شد.
۳. تعاریف صریح و مشخصی که جامع (Self-Contained) و شفاف هستند، شناسایی شد.
۴. بستری از اصطلاحات و تعاریف با هدف دسته‌بندی اصطلاح‌شناسی به وجود آورده شد.
۵. بستر ایجادشده بازنگری شد تا هم‌پوشانی‌ها، خلأها و سردرگمی‌های معنایی شناسایی شوند.
۶. اصطلاحات نهایی بازبینی و هماهنگ شد.

در گام اول لازم است منابع مرتبطی که از طریق چندین تحقیق و پژوهش در زمینه‌های اساسی شامل ارزیابی-چرخه-عمر و مدیریت، مدل‌سازی فرایند ساخت، صنایع شیمی و فرایندی، سیاست زیست‌پایدار، استانداردهای سازمان‌دهی‌شده و برنامه‌ریزی فرایند شناسایی شده‌اند تنظیم شوند. بعد از تنظیم تعاریفی که در منابعشان دارای معنای صریح و شفافی بود برای استفاده و تطبیق مشخص شدند، هم‌چنین نوشتارهایی که از یک اصطلاح استفاده نموده اما به صراحت آن‌ها را تعریف و معنا نکرده‌اند جدا شدند. حین پژوهش، اصطلاحاتی که در یک گروه از دسته‌بندی‌های تعریف‌شده جای نمی‌گرفتند، ابتدا از فهرست حذف شده و سپس با ادامه روند بازنگری و تنظیم واژه‌ها، به‌عنوان اصطلاحات جدید یا مترادف به دسته‌ی دیگری انتقال یافتند.

ابتدا در مرحله‌ی اول این بازنگری دسته‌بندی‌های اولیه و تعریف‌شده شامل دسته‌های مرز-Boundary، داده-Data، تصمیم-Decision، اندازه‌گیری-Measurement، خط‌مشی-Policy، فرایند-Process، و عمومی-General بود. اما در نهایت در بازنگری فعلی از این دسته‌ها نام‌برده شده، دسته‌ی داده با دسته‌ی اندازه‌گیری ترکیب شد، زیرا تعداد کمی اصطلاح مرتبط با داده در پژوهش شناسایی شده‌اند؛ هم‌چنین دسته‌ی خط‌مشی هم با دسته‌ی عمومی ترکیب شد؛ چرا که تمرکز اصلی پژوهش بر تحلیل سیاست‌های دولت و شرکت‌ها نیست، بلکه تمرکز اصلی روی مدل‌سازی و ارزیابی است. با پیشبرد روند

تبیین مشخصات فرایندی دنبال می‌شوند. براساس این بازنگری، در این بخش‌ها اصطلاحات کلیدی و مقالات متناظر با آن‌ها که برای تعریف این نوع اصطلاحات استفاده شده‌اند، خلاصه می‌شوند. در انتها هرچه در جهت بررسی نوشتارهای پیشین مقاله پیش می‌رود این نکته مهم آشکار می‌شود که مضمون مشترک در مطالعات پیشین وجود دارد و این مضمون بیانگر آن است که «افزایش رقابت جهانی، نیاز به اقدامات زیست‌پایدارتر را بیشتر می‌کند».

توجه: مقاله‌ی حاضر ترجمه‌ی خلاصه‌شده‌ای از مقاله اصلی بوده و همه‌ی آن را شامل نمی‌شود.

موضوعاتی این نوع بازنگری‌ها با یکدیگر هم‌پوشانی داشته باشند، اما همچنان قادر نیستند اصطلاح‌شناسی «مدل‌سازی فرسوی زیست‌پایدار» را به‌طور کامل در اختیار و در برگیرند. بخش‌هایی که در ادامه به ترتیب و به‌صورت شماره‌گذاری شده می‌آیند، مقالات مروری و بازنگری‌شده‌ای است که در گذشته پیرامون مدل‌سازی فرسوی زیست‌پایدار انجام شده، روش پژوهش در این بازنگری‌ها بدین شکل است که از مفاهیم گسترده و مهم آغاز کرده و به‌سوی کاربردهای عملی ویژه حرکت می‌کند. این بخش‌ها مطالب و موضوعات مرتبط با اصطلاح‌شناسی را که مطابق با شیوه‌های زیست‌پایدار در صنایع ساخت و شیمیایی و فرآوری است، ارائه کرده، به‌تبعیت از آن چشم‌انداز ویژه‌ای برای

مرجع

Ian C. Garretson, Mahesh Mani, Swee Leong, Kevin W. Lyons, Karl R. Haapala; "Terminology to support manufacturing process characterization and assessment for sustainable production"; ELSEVIER, Journal of Cleaner Production 139 (August 2016) 986-1000

واژه‌های کلیدی:

مشخصه‌سازی فرایند،
اصطلاح‌شناسی،
تولید زیست‌پایدار،
مدل‌سازی فرایند،
فرایند ساخت واحد (فرسو)،
ساخت

شناخت و تبیین اصطلاحات فرایند ساخت و ارزیابی تولید زیست‌پایدار - بخش دوم؛ اصطلاحات

مترجمان: سیدحمیدرضا صباغی، علی عباسیان*

تهران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران، گروه مهندسی پلیمر

چکیده ...

اصطلاحات برای معنا و تعریف در مفاهیم کلان (Overarching) در ۶ دسته سازمان‌دهی شده‌اند: گستره (Scope)، مرز (Boundary)، ماده (Material)، اندازه‌گیری (Measurement)، مدل (Model)، و جریان (Flow). سپس معنا و تعریف‌های هر کدام از این اصطلاحات از متن مقاله‌ها و استانداردهای پیشین به دست آمده و برای ارائه در کاربردهایی نظیر ساخت صنایع فرایندی و شیمیایی زیست‌پایدار، برنامه‌ریزی و مشخصه‌یابی فرایند، سازمان‌دهی استانداردها، ارزیابی چرخه‌ی عمر و مدیریت آماده هستند. (ارزیابی چرخه‌ی عمر LCA یا Life Cycle Assessment، تحلیل فناوریانه‌ای است که برای ارزیابی تأثیرات زیست‌محیطی مواد، همراه با تمامی مراحل مختلف چرخه‌ی عمر آن‌ها یعنی از گهواره (تولید) به گور (دفع)، یا از گهواره به گهواره (Cradle to Cradle، تولید به بازیافت) ارائه شدند؛ از استخراج مواد خام گرفته تا فرآوری مواد، ساخت، توزیع، استفاده و در نهایت دفع یا بازیافت آن‌ها را به دقت مورد ارزیابی و تحلیل قرار می‌دهد. مترجم)). اصطلاحات و معانی گزارش شده منحصر به تولید زیست‌پایدار نبوده و قادرند استفاده گسترده‌ای از این مفاهیم را برای بهبود اقتصاد، محیط‌زیست و عملکرد اجتماعی صنعت پرورش دهند. اصطلاح‌شناسی توصیف‌شده در این کار، در آینده می‌تواند از طریق سازمان‌های استانداردهای بین‌المللی ارائه شود. از این بیشتر، هم‌چنان جای آن که بازنگری موشکافانه و دقیق‌تری از پژوهش فعلی، در مورد شناخت مشخصات فرایند ساخت و مدل‌سازی آن، در حمایت از تولید زیست‌پایدار تکمیل شود، باقی است. چنین بازنگری‌ای می‌تواند به سازمان‌دهی کارهای پیشین براساس نوع فرایند، شاید با استفاده از طبقه‌بندی - استاندارد - فرایندها (Standard Process Taxonomy) در آینده، کمک کند. بنابراین روش تعمیم‌یافته و باب میل صنعت، برای شناخت مشخصات فرایند ساخت می‌تواند ایجاد شود؛ تا افزون بر پشتیبانی از ارزیابی‌های زیست‌پایدار، بتواند از طریق برنامه‌های نرم‌افزاری قابل دسترس برای کاربران مختلف به اجرا گذاشته شود.

*پست الکترونیکی مسئول مکاتبات:

abbasian.a@srbiau.ac.ir

۴ بحث اصطلاح‌شناسی

اصطلاحات تعریف‌شده در این قسمت تا جایی که امکان آن وجود داشت و دسترسی به منابع مختلف امکان‌پذیر بود، از منابع متعددی استخراج شده‌اند. برای شمار متعددی از اصطلاحات تعاریف و معانی صریح و شفاف شناسایی شده‌اند، اگرچه که همگی این تعاریف‌ها برای یک اصطلاح واحد یکسان نبودند. زمانی که تعاریف‌های متفاوت ارائه شدند، تعاریف‌های هماهنگ (Harmonized) بر اساس ایده‌های (Notions) مقاله Block در سال ۲۰۰۱ خلق شدند. زیرا ایده‌ها و مفاهیم مطرح‌شده در این مقاله نکته‌ی مهمی را یادآور شده‌اند: «بسیاری از اصطلاحات (پراکندگی در صنعت و فناوری) معنای مبهم و گنگی داشته و استفاده‌ی هر نویسنده‌ای از این اصطلاحات چه برای پژوهش‌های دانشگاهی و چه برای فعالیت‌های صنعتی، با معنای ضمنی و برداشت‌های متفاوتی صورت می‌گیرد»، این روند تا زمانی که برای اصطلاحات معانی و تعاریف‌های رسمی و تدوین‌شده ارائه نشود ادامه خواهد داشت. از همین رو، نگرش و رویکرد بازنگری فعلی به منظور خلق تعاریف‌ها و معانی هماهنگ‌شده، به وسیله‌ی شناسایی فراگیرترین و مرتبط‌ترین تعاریف‌ها برای هر اصطلاح واحد آغاز می‌شود. این امر با استفاده از (۱) گرفتن تعاریف از منبع مشخص صورت می‌پذیرد، و در صورت عدم امکان، (۲) ایجاد نسخه‌ی هماهنگ‌شده‌ی جدید که به سایر تعاریف‌های دیگر ارجاع داده شده است، محقق می‌شود. هم‌چنین از آن جایی که تمامی تعاریف‌ها به صورت دقیق به منابعشان ارجاع داده می‌شوند (در تمامی جدول‌هایی که در ادامه خواهیم داشت) جای هیچ‌گونه بحث و اختلافی باقی نخواهد ماند.

فرایند ساخت، خلق محصولات گسسته و مجزا از هم را شامل می‌شود؛ اما فرآورش (Processing) توالی‌ای از «عملیات واحد شیمیایی» است که با هدف تولید محصولات شیمیایی چه به صورت پیوسته یا پیمانانه‌ای (Batch) انجام می‌پذیرد. در نتیجه تولید می‌تواند به عبارتی هر دو مفهوم را یعنی هم فرایند ساخت و هم فرآورش را دربرگیرد. به همین ترتیب، عملیات واحد و فرایند کامل می‌توانند از یکدیگر متمایز باشند (Shreve ۱۹۵۴). چرا که عملیات واحد، عملیات فیزیکی پایه‌ای است که از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به پدیده‌های واکنش، جداسازی، اختلاط، گرمایش، سرمایش، انتقال سیال و انتقال جرم اشاره کرد، درحالی‌که فرایند کامل مشتمل بر تبدیل شیمیایی (Chemical Conversion) به‌عنوان مثال اکسایش، کاهش، و استری شدن است.

اصطلاح‌شناسی با هدف انتقال مفاهیم مشخصه فرایند ساخت واحد، به‌منظور برآوردی از قابلیت زیست‌پایداری به شش گروه

دسته‌بندی شده‌اند (جدول ۱ الی ۶). برای جزئیات بیشتر می‌توان به بخش‌های بعدی مراجعه کرد اما خلاصه مختصری در این قسمت بیان خواهد شد: ابتدا، اصطلاح‌شناسی گستره (Scope) به شناسایی هدف غایی قلمروی مطالعاتی قابلیت زیست‌پایداری کمک می‌کند. سپس، اصطلاح‌شناسی مرزی (Boundary) برای شفاف کردن شرایط مرزی با هدف مدل‌سازی جریان ورودی و خروجی استفاده می‌شود. در مرحله‌ی سوم، اصطلاح‌شناسی ماده (Material) به طور خاص، رسانه‌ی (بستر) فیزیکی در تولید محصول را توصیف می‌کند. در مرحله‌ی چهارم، اصطلاح‌شناسی اندازه‌گیری (Measurement) مرتبط با مقادیر کمی است، که از ارزیابی و کمیت‌بخشی قابلیت زیست‌پایداری پشتیبانی می‌کند. در مرحله‌ی پنجم، اصطلاح‌شناسی مدل (Model) مدل‌های متفاوت و وابستگی (Attributes) مدل‌ها به یکدیگر را معنا و بیان می‌دارند. درنهایت، اصطلاح‌شناسی جریان (Flow) حرکت و انتقال انرژی، مواد، و اطلاعات را درون سامانه‌ی تولید توصیف می‌کنند. اصطلاحات با استفاده از روش تکاملی سازمان‌دهی شده‌اند که نتیجه‌ی آن دسته‌بندی، در شش گروه ذکر شده است؛ همان‌گونه که پیشتر هم کامل بحث شد (۲). روشی برای تعریف و بیان اصطلاح‌شناسی دسته‌هایی شامل تغییر، ادغام، یا حذف شدند (نظیر داده، تصمیم، خط‌مشی، فرایند و محصول). در بعضی موارد، زمانی که این اصطلاحات در گروه مشخصی جای نمی‌گرفتند، گروهی که بیشترین تناسب و سازگاری را با ایشان داشت انتخاب می‌شد. برای نمونه، اصطلاح تخصیص (که به دسته‌ی جریان وابسته بود) درنهایت به دسته‌ی مرز اختصاص یافت؛ اصطلاح واحد کارویژه که در واقع توصیفی از دسته‌ی گستره است، به دسته‌ی جریان پیوست؛ و عامل مشخصه (Characterization Factor) که اصطلاحی است که در مدل استفاده می‌شده‌است، در دسته‌ی اندازه‌گیری ادغام شد.

۴-۱ اصطلاح‌شناسی گستره

به‌طورکلی اصطلاح‌شناسی گستره، به شناسایی فرایند ساخت واحد و نوع محیط تولیدی که فعالیت‌ها در آن مورد بررسی قرار می‌گیرد کمک می‌کند. اصطلاحاتی که در دسته‌ی «اصطلاح‌شناسی گستره» مورد بحث قرار خواهند گرفت شامل ساخت زیست‌پایدار، سامانه‌ی ساخت، فرایند ترکیبی، فرایند ساخت واحد (فرسو)، زیرفرایند (Sub-Process)، ماشین‌آلات، فرایند ساخت پیوسته، فرایند ساخت گسسته و فرایند ساخت پیمانانه‌ای (Batch) است. در جدول ۱ برای این اصطلاحات تعاریف‌های هماهنگ و متوازن‌شده‌ای به‌صورت خلاصه ارائه

جدول ۱ اصطلاح‌شناسی گستره (Scope).

اصطلاحات	مترادف‌ها	تعریف هماهنگ‌شده	مراجع
تولید زیست‌پایدار	ساخت زیست‌پایدار	خلق کالاها یا خدمات با استفاده از سامانه‌ای از فرایندها که جنبه‌های اقتصادی، زیست‌محیطی، و اجتماعی را به طور هم‌زمان در نظر دارد؛ تا قادر باشد با اقداماتی مسئولانه و آگاهانه، به منظور بهبود تأثیرات مثبت یا کاهش آثار منفی تولید، نقش بسزایی ایفا کند.	(Glavic and Lukman, 2007; Mani et al., 2014; US Department of Commerce (2013); Veleva and Ellenbecker, 2001; Zhang et al., 2015)
سامانه‌ی تولید	سامانه‌ی ساخت، خط تولید، سلول، سامانه‌ی چندماشینی، بوم‌سامانه‌ی چندماشینی	مجموعه یا توالی‌ای در هم تنیده از فرایندها، که قادرند منابع انسانی و طبیعی را به محصولات تبدیل کنند.	(Glavic and Lukman, 2007; Mani et al., 2014; US Department of Commerce (2013); US National Research Council, 1995; Veleva and Ellenbecker, 2001; Zhang et al., 2015)
فرایند ترکیبی	ایستگاه کاری ترکیبی	ترکیب واحدهای فرایندی چندگانه که درون ماشین منفرد عمل می‌کنند. این فرایندها به طور جداگانه قابل تجزیه و تحلیل هستند، اما شامل فرایندهای واحد با تجهیزات پشتیبانی‌کننده یکپارچه نیستند.	(Duflou et al., 2012)
فرایند ساخت واحد یا به اختصار "فرسو" UMP	عملیات واحد، فرایند واحد، عملیات	کوچک‌ترین فعالیت ابتدایی فرایند ساخت بوده که مورد نیاز برای تبدیل طبقه‌بندی مشخص است که متشکل از ماشین‌آلات، دستگاه‌ها یا تجهیزات می‌شود.	(Blackadder and Nedderman, 1971; ISO, 2006; Kellens et al., 2012a; Mani et al., 2014; McCabe et al., 2004; Overcash and Twomey, 2012; US National Research Council, 1995; Zhang et al., 2015)
زیرفرایند		جزئی از فرایند ساخت واحد است که می‌تواند به عنوان عامل کمکی فرسو پنداشته شود. مشابه فرسو، زیرفرایند به ورودی منابع نیاز داشته و خروجی منابع را ایجاد می‌کند؛ این ورودی‌ها و خروجی‌ها از یک زیرفرایند به دیگری در قالب فرسو جریان می‌یابند.	(Mani et al., 2014)
ماشین	دستگاه، تجهیزات، سازوکار، وسیله، ابزارآلات	دستگاه، قطعه‌ای از تجهیزات، سازوکار، یا ماشین منفرد که قادر است عملیات پایه‌ای و فعالیت ابتدایی را انجام دهد؛ علاوه‌براین، ترکیبی از اجسام صلب است که روند کار را پیش برده و فرایند آن را آسان‌تر می‌کند.	(Duflou et al., 2012; Oxford University Press, 2010; McGraw-Hill, 2003; Larousse, 1995)

(Duflo et al., 2012)	فرایندهای تولیدی که در آن‌ها می‌توان خروجی را شناسایی کرد و این مهم به وسیله دو نشانگر یعنی آهنگ جریان جرمی یا حجمی (Mass-Volume Flow Rate)، در صنایع فرایندی به جای واحدهای مجزا قابل اندازه‌گیری است.	فرایند پیوسته، فرسو پیوسته، عملیات پیوسته	فرایند ساخت پیوسته
(Duflo et al., 2012)	فرایندهای تولیدی که در آن‌ها می‌توان خروجی را به صورت واحدهای مجزا شناسایی کرد و شمرد و این عمل نه به وسیله آهنگ جریان جرمی یا آهنگ جریان حجمی به مانند آن چه در صنایع فرایندی انجام می‌شود، قابل اندازه‌گیری است.	فرایند گسسته، فرایند قطعه گسسته، فرسو گسسته	فرایند ساخت قطعه گسسته
(Hopp and Spearman, 2011)	یک فرایند پیمان‌های هم‌زمان، فرایندی است که در آن اجزا به طور هم‌زمان تولید می‌شوند؛ به عنوان مثال فرایند تبادل گرمایی نمونه‌ای از آن است. فرایند پیمان‌های (Batching)، به جای آن که در طی روند انتقال مواد صورت پذیرد، در هنگام فرایندکاری مواد اتفاق می‌افتد.	فرایند پیمان‌های، عملیات پیمان‌های، فرسو پیمان‌های	فرایند ساخت پیمان‌های

شده و نیز مترادف‌های وابسته به این نوع اصطلاحات را هم شامل می‌شوند.

۴-۱-۱ تولید زیست‌پایدار

واژه‌ی «زیست‌پایدار» در استاندارد ISO کمیسیون جهانی محیط زیست و توسعه، (۱۹۸۷) بدین صورت تعریف شده: «وضعیت و حالتی از سامانه‌ی جهانی، شامل جنبه‌های زیست‌محیطی، اجتماعی و اقتصادی است که در آن نیازهای فعلی بشر، بدون آن که توانایی نسل‌های آینده برای تأمین نیازهای خودشان را به خطر بیاندازد برآورده می‌شود و هیچ‌گونه تسامحی را در احقاق این مهم نخواهد پذیرفت». از آن طرف واژه‌ی «ساخت» به معنای خلق و ایجاد محصولات، کالاها و خدمات با استفاده از مجموعه‌ای از فرایندها است. «ساخت زیست‌پایدار» یا به عبارتی در معنای گسترده‌تر آن تولید «زیست‌پایدار»، به وسیله‌ی ارزشیابی و رسیدگی به آثار منفی و زیان‌آوری که صنعت می‌تواند به منظور تولید محصول یا فرایند برای محیط‌زیست به‌طور جامع به وجود آورد، پدیدار می‌شود؛ معیارهایی که با استفاده از آن‌ها ارزشیابی صورت می‌گیرد شامل پایداری (صرفه‌جویی) انرژی و منابع طبیعی، ایمنی کارکنان و نیز ایمنی

جامعه و اجتماعی که در آن فعالیت‌ها احاطه شده و در نهایت دوام اقتصادی است. دوام (سودآوری) اقتصادی (Economic Viability) به تحلیل و ارزیابی تأثیرات مختلف اقتصادی پروژه‌ای خاص، که ممکن است در نتیجه اجرای آن آثار محیط‌زیستی حاصل شود، می‌پردازد. این بررسی پیامدهای ملی و منطقه‌ای هر پروژه و عوامل اجتماعی و زیست‌محیطی آن را می‌سنجد. شیوه اصلی به منظور ارزیابی دوام اقتصادی هر پروژه، تحلیل-هزینه-سود (CBA) در کنار پیامدهای زیست‌محیطی است. اگر منافع پروژه‌ای بیش از هزینه‌های آن بوده و از لحاظ محیط‌زیستی هم سازگار باشد، این پروژه از لحاظ اقتصادی ماندگار است. (مترجم). در نتیجه به این سه جنبه‌ی حمایتی «محیط‌زیست-جامعه-اقتصاد» سه رکن اساسی و اصلی قابلیت زیست‌پایداری گفته می‌شود.

۴-۱-۲ سامانه‌ی تولید

سامانه‌ی تولید شامل فرایندها، فعالیت‌ها و دستگاه‌ها است. برخی از نویسندگان معتقد هستند که فرایندهای ساخت واحد با توالی مشخص و منظمی سازمان‌دهی شده‌اند و جدا از یکدیگر و به ترتیب تنظیم می‌شوند، در حالی که برخی دیگر این برداشت

هم‌چنین تعریف‌های جدول ۱ خاطر نشان می‌کنند که فرایندهای ساخت واحد از شکل‌های مختلف فناوری با شیوه‌های فناورانه مانند ترکیب اجزای عملکردی یک یا چند ماشین (دستگاه) در کنار یکدیگر استفاده می‌کنند، اگرچه این مثال کوچک‌ترین عنصر در تولید است، اما می‌بایست مواردی را هم در نظر داشت که از چندین ماشین برای به ثمر نشاندن تنها یک فعالیت استفاده می‌شود. با این حال، به نظر می‌رسد که کالبدشکافی بیشتر در مورد فرایندها دیگر هیچ تحول بنیادینی را فاش نخواهد کرد.

۴-۱-۵ زیرفرایند

زیرفرایند به‌عنوان سطحی فرعی از فرایند اصلی شناخته می‌شود. توجه داشته باشید که زیرفرایندها تحولات و تبدیل‌های طبقه‌بندی‌شده‌ی قابل تشخیص را انجام نمی‌دهند، در حالی که این کار توسط خود فرایندهای اصلی انجام می‌شوند؛ این ویژگی یا اگر دقیق‌تر بخواهیم بگوییم «مشخصه» کمک می‌کند تا بین زیرفرایندی که در درون فرایند اصلی عمل می‌کند و فرایندی که در روند فرایندهای ترکیبی عمل می‌کند تمیز قائل شویم. هم‌چنین زیرفرایند از ماشین‌ها قابل تفکیک است و می‌بایست از آن‌ها متمایز شود، زیرا فعالیت زیرفرایندی، می‌تواند با یک یا چند ماشین یا حتی بدون ماشین انجام شود.

۴-۱-۶ ماشین

ماشین فعالیت‌های فرایند ساخت واحد را میسر می‌کند. ماشین دستگاهی است که کار را انجام داده یا به تعبیری فرایند انجام کار را تسهیل می‌بخشد و نیز ترکیبی از اجسام صلب است که معمولاً بر نیروی مقاوم غلبه می‌کند. اصطلاحاتی با معانی مشابه ماشین نظیر دستگاه (Device)، تجهیز (Equipment)، سازوکار (Mechanism)، سنج-افزار (Instrument) و ابزار (Tool) است. تجهیزات پشتیبانی‌کننده‌ای که حتی در روند پیشبرد فرسو سهیم نیستند هم در این تعریف‌ها گنجانده شده است. در کل اصطلاح ماشین در این بازنگری ذکر شده تا معنای آن، چه در بطن یا محتوا با فرسو و زیرفرایند اشتباه نشده و تعریف آن‌ها از یکدیگر جدا شود؛ زیرا عملکرد فرسو یا زیرفرایند نیز شامل چندین ماشین بوده و ممکن است به صورت تفکیکی به آن‌ها نیاز شود. مثلاً، به منظور انجام فرایند آزمون مایع رسوخ‌کننده (Penetrant Testing)، روشی برای بررسی نواقص سطحی مواد از جمله سرامیک‌ها، فلزات، و پلاستیک‌ها است. مترجم، نیازمند دستگاه انتقال مایع رسوخ‌کننده، دستگاه انتقال پودر، دستگاه خشک کردن سطح نمونه و لامپ تاباننده نور فرابنفش برای کاوش و آشکارسازی ناپیوستگی‌های سطح نمونه است. به

را دارند که فرایندهای ساخت واحد از درون به یکدیگر وابسته هستند. سرانجام، بسیاری از نویسندگان اظهار داشته‌اند که تبدیل (Transformation) رخ می‌دهد و باعث می‌شود که درون‌دادها به برون‌دادها تبدیل شوند. به عنوان بخشی از سامانه‌ی تولید، اصطلاحات سامانه‌ی ساخت و سامانه‌ی فرایند مشابه یکدیگر هستند، اما تفاوت‌های ظریفی نیز دارند که قبلاً در همین بخش توضیح داده شده است.

۴-۱-۳ فرایند ترکیبی (Hybrid)

فرایندهای ترکیبی به دلیل منحصربه‌فرد بودنشان در این بخش گنجانده شده‌اند. هر فرایند ترکیبی را می‌توان ترکیبی از فرایندها دانست که تنها توسط یک ماشین فرآوری می‌شوند. این عمل از سلول تولید تمیز داده می‌شود، چرا که سلول تولید جایی است که چندین ماشین در مجاورت یکدیگر به ترتیب برای تکمیل مجموعه‌ای از عملیات‌ها استفاده می‌شود.

۴-۱-۴ فرایند ساخت واحد به اختصار "فرسو"

(Unit Manufacturing Process)

فرایند ساخت واحد با دو مضمون مشترک شناسایی می‌شود. مضمون اول در نظر می‌گیرد که فرایند ساخت واحد کوچک‌ترین جزء در فرایند ساخت است که به آن مراحل مجزا هم می‌گویند. هم‌چنین این ملاحظه تعریفی برای اصطلاح «واحد» هم ارائه می‌دهد. مضمون دوم، انتقال یا به عبارت دقیق‌تر تبدیلی را به منظور افزودن ارزش یا از طریق تبدیل درون‌داد به برون‌داد، یا با شیوه‌ای خلاقانه‌تر از راه شکل، ساختار و خاصیت تبدیلی ویژه، شناسایی می‌کند.

در مقاله‌ی Twomey و Overcash که در سال ۲۰۱۲ نگارش شده، بر نکته‌ی مهمی تأکید شده و اشاره به آن خالی از لطف نیست و آن این است که به‌طور کلی فرایندهای ساخت واحد تعویض‌پذیر (Interchangeable) هستند؛ این مهم بدین معنا است که اگر فرایندهایی برای ساخت و تولید محصولی مشخص انجام می‌شوند می‌توانند به فرایندهای دیگر برای عملکردهای مشابه یا متفاوت تعمیم داده شوند و جایگزین یکدیگر بشوند. تفاوت در میان عملکرد مختلف فرایندهای ساخت واحد در پژوهش‌ها و تحقیقات پیشین به شکل مستقیم مورد توجه قرار نگرفته بود، اما برخی از نویسندگان به‌طور غیرمستقیم و در حاشیه‌ی مطالبشان از طریق تبدیل‌ها به تفاوت‌های این موضوع اشاره داشتند. بنابراین، با تجربه‌ای که از این پژوهش‌ها وجود داشت به شناسایی تبدیلی‌های طبقه‌بندی (Taxonomical Transformation) مختلف در این بازنگری پرداخته شده است.

۴-۲-۱ مرزها

مرزها بر پایه‌ی (۱) مبانی ارزشیابی (۲) سطح جزئیات تحقیق (۳) درون‌دادها و برون‌دادهای در نظر گرفته شده و (۴) داشتن هدفی خاص برای بررسی، اندازه‌گیری، یا مطالعه‌ی سامانه تعیین می‌شوند. پژوهشگران مختلف پیش از بررسی هر فرسو مرزهای آن را دقیق مشخص می‌کنند. انجام چنین کاری منجر به ایجاد مدل‌هایی متناسب با واقعیت می‌شود، این نوع استانداردسازی برای تعریف مدل‌ها (جدول ۵) بسیار مفید خواهد بود.

۴-۲-۲ درون‌داد

درون‌داد به‌عنوان ماده، محصول میانی (جدول ۳)، انرژی، یا کاری که به فرایند ساخت واحد ورود می‌کند، شناخته می‌شود. توجه داشته باشید که محصولات میانی می‌توانند ورودی فرسوی بعدی باشند. نویسندگان همواره تشخیص می‌دهند که اطلاعات یا دانش، برای نمونه در شکل علائم و تنظیم‌ها نیز وارد مرزهای تعریف‌شده می‌شوند. بازه‌ی هر مرز می‌تواند از یک فرایند یا ماشین، تا کل سامانه تولید را دربرگیرد. بنابراین، تعریف ارائه‌شده در جدول ۲ شامل اطلاعاتی است که به مرز سامانه‌ی مورد مطالعه وارد می‌شود. واژه‌نامه اصطلاحات علمی و فنی McGrew-Hill در سال ۲۰۰۳، درون‌دادها را به‌عنوان منابعی که به وسیله‌ی سامانه [به برون‌داد] تبدیل شده‌اند، تعریف کرده است، اما باید توجه داشت همه درون‌دادهایی که وارد فرایند می‌شوند در نتیجه‌ی فراوری تبدیل به برون‌داد نمی‌شوند. نمونه‌هایی از ورودی غیرقابل تبدیل شامل آب یا مایع خنک‌کننده در حال چرخش است (با این فرض که کثیف نشود یا از سامانه خارج نشود)، یا تنظیمات دستگاه که برای کنترل وارد شده، استفاده می‌شوند، اما به برون‌داد بازخوردی تبدیل نمی‌شوند.

۴-۲-۳ درون‌داد فرعی

اصطلاح «درون‌داد فرعی» بر اساس استاندارد ISO 14040: 2006 (مدیریت محیط‌زیست-ارزیابی چرخه‌ی عمر-مبانی و چارچوب. سازمان‌دهی بین‌المللی به منظور استانداردسازی) تعریف شده است.

۴-۲-۴ برون‌داد

برون‌داد محصول، ماده یا انرژی‌ای که فرسو را ترک می‌کند تعریف می‌شود. از آن‌جا که مرزهای ارزیابی قابلیت زیست‌پایداری می‌توانند از یک فرایند یا ماشین تا کل سامانه‌ی تولید متغیر باشند، تعریف برون‌داد [همانند درون‌داد که به مرز وارد می‌شد]

طرز مشابه، ماشین تراش سه‌محوره که بسیار هم در صنعت رایج است دارای چهار موتور است: سه موتور برای سه محور و یک موتور برای دوک (Spindle). حال به این نکته توجه کنید که دستگاه تراش خود یک ماشین است، در حالی که هر موتور و تجهیزات زیرمجموعه آن را هم می‌توان یک ماشین تعریف کرد. فرسو می‌تواند متشکل از چندین ماشین در مجاورت یکدیگر به منظور ایجاد سلول ساخت باشد، یا می‌تواند در ماشین یکپارچه منفردی تجسم یابد که قادر است قطعات را از طریق هر مرحله از فرایند انتقال دهد.

۴-۱-۷ فرایند ساخت پیوسته

اصطلاح فرایند ساخت پیوسته روشن می‌کند که فرایندهای ساخت پیوسته با استفاده از آهنگ جریان (Flow Rates) اندازه‌گیری می‌شوند.

۴-۱-۸ فرایند ساخت گسسته/مجزا

اصطلاح فرایند ساخت گسسته بر تقابل میان فرایندهای ساخت قطعات گسسته و پیوسته تأکید می‌کند.

۴-۱-۹ فرایند ساخت پیمانه‌ای

فرایند ساخت پیمانه‌ای شامل فرایندهایی است که قادرند هم‌زمان چندین محصول را فراوری کنند. این متفاوت از سامانه‌ی ترتیبی پیمانه‌ای (Batch Queuing System) رایج است، جایی که محصولات به صورت پیمانه‌ای انتقال و بارگیری شده، سپس جداگانه فراوری می‌شوند. فرایند ناپیوسته در صنعت شیمی و فرایند اتفاق می‌افتد، جایی که حجم یا جرم مشخصی از ماده‌ی شیمیایی به شکل پیمانه‌ای فراورش می‌شوند.

۴-۲ اصطلاح‌شناسی مرزها

مرزها برای راهنمایی و هدایت روند تصمیم‌گیری لازم هستند، به عنوان مثال میزان آسیب در فرایند چندماشینی می‌تواند تنها به یک ماشین مرتبط باشد و در نتیجه [عدم مرزبندی صحیح موجب می‌شود] ارزیابی و تحلیل کل فرایند را مخدوش کند. در طی مطالعه و بررسی ارزیابی قابلیت زیست‌پایداری، شناسایی مرزهای سامانه نه فقط برای تصمیم‌های فوری مطالعه، بلکه به منظور تسهیل مطالعات و مقایسه‌های معطوف به آن در آینده لازم است. اصطلاحاتی که دسته‌بندی مرز را در بر می‌گیرد شامل: مرزها، درون‌داد، درون‌داد فرعی، برون‌داد و تخصیص است. در جدول ۲ تعاریف هماهنگ‌شده‌ی اصطلاح‌شناسی مرزی به صورت خلاصه ارائه شده است.

جدول ۲ اصطلاح‌شناسی مرز (Boundary).

اصطلاحات	مترادف‌ها	تعریف هماهنگ‌شده	مراجع
مرزها	مرزهای سامانه	مجموعه‌ی قواعدی که گستره‌ی مطالعاتی را مشخص و سطح جزئیات معطوف به آن‌ها را شناسایی می‌کند. برای نمونه به جزئیاتی نظیر ماشین‌آلات، فرایندهای فرعی، فرایندهای اصلی، سامانه تولید، درون‌داده‌ها، برون‌داده‌ها و جریان‌ها می‌توان اشاره کرد. به منظور شناسایی نقطه‌ای که ارزیابی شروع یا متوقف می‌شود، از مرزهای دسته‌بندی شده می‌بایست استفاده کرد. بررسی‌ها با مرزهای مشخص و دقیقی می‌تواند در کاربردهای نامنظم برای برآوردهای قطعی به کار رود.	(Dufflou et al., 2012, 2011; ISO, 2006; Kellens et al., 2012a; Veleva and Ellenbecker, 2001; Zhang et al., 2015)
درون‌داد		ماده، انرژی، یا اطلاعاتی که به مرزهای سامانه‌ی تعریف‌شده وارد می‌شوند. شامل محصولات میانی (مانند هم‌محصولات و محصولات جانبی)، مواد خام، یا هرگونه جریان ماده‌ای که در جایگاه بالادستی فرایند صورت می‌پذیرد.	Haapala et al., 2013; ISO, 2006
درون‌داد فرعی		ورود ماده‌ای که به وسیله‌ی فرایند واحد برای تولید محصول استفاده شده، ولی در نهایت به‌عنوان قطعه سازنده یا بخشی از محصول نهایی در نظر گرفته نخواهد شد.	ISO 14040; 2006
برون‌داد		به ماده، انرژی، یا اطلاعاتی که از مرزهای سامانه‌ی تعریف‌شده خارج می‌شوند گفته شده؛ و شامل هم‌محصولات و محصولات جانبی، محصولات میانی، آلاینده‌ها، پساب‌ها، و ضایعاتی هستند که وارد سامانه‌های صنعتی دیگر یا طبیعت خواهند شد.	Haapala et al., 2013; ISO, 2006
تخصیص		تقسیم جریان‌های ورودی یا خروجی فرایند یا سامانه‌ی محصول، میان سامانه‌ی محصول تحت بررسی و یک یا چند سامانه‌ی محصول دیگر.	ISO 14040; 2006

به‌گونه‌ای گسترش یافت که از مرز سامانه خارج شود.

۴-۲-۵ تخصیص

واژه‌ی تخصیص مطابق استاندارد ISO 2006 تعریف شده است. در حالی که در واژه‌نامه‌ی اصطلاحات علمی و فنی -McGrew-Hill برای تعریف آن آمده است «نسبت دادن (اختصاص) بخشی از منبع به فعالیت»، در جدول ۲ تعریف ISO انتخاب شد، زیرا این تعریف برای مشخصه‌ی فرسو بیشتر کاربرد دارد.

۴-۳ اصطلاح‌شناسی مواد

اصطلاح‌شناسی مواد برای شناسایی هر ماده، محصول یا حتی ضایعاتی که به فرسو جریان داشته یا از آن خارج می‌شود،

استفاده می‌شود. این مهم شامل هر ماده‌ای که در فرسو استفاده شده، یا هر محصول یا پسماندی که فرسو تولید می‌کند، است. تعریف و بسط این اصطلاحات مبنا و اساس مشخص‌سازی واحد کارویژه، تخصیص و آثار است. در جدول ۳ تعاریف هماهنگ‌شده‌ی اصطلاح‌شناسی مواد ارائه شده است.

۴-۳-۱ مواد

مواد خام به عنوان موادی که با هدف تولید محصول استفاده می‌شوند، توصیف می‌شوند. این مواد مطابق استاندارد ISO 2006 به صورت اولیه (بازیافت نشده) یا ثانویه (بازیافتی) تعریف شده‌اند. Zhang و همکارانش در سال ۲۰۱۵، مواد خام را به عنوان اجزای فیزیکی استخراج‌شده از بوم‌سازگان

جدول ۳ اصطلاح‌شناسی ماده (Material).

اصطلاحات	مترادف‌ها	تعریف هماهنگ‌شده	مراجع
مواد	مواد خام	هرگونه ماده‌ی فیزیکی که برای تولید محصول استفاده می‌شود. ماده اولیه شامل ماده‌ی حاصل از استخراج و فراوری ابتدایی و ماده‌ی ثانویه شامل محتوای بازیافتی بوده که می‌توان از آن‌ها مجدداً به منظور بازفراوری استفاده کرد.	(ISO, 2006; Zhang et al., 2015)
محصول		هر نوع کالا یا خدمتی که با هدف تأمین نیازهای افراد جامعه ارائه می‌شود.	Zhang et al., (2015), (ISO, 2006)
محصول میانی		برونداد فرایند واحد که در واقع درونداد سایر فرایندهای واحدی است تا فراوری بیشتری روی آن انجام شود.	ISO 14040; 2006
هم‌محصول		هر یک از دو یا تعداد بیشتری محصول که به‌طور هم‌زمان از فرایند واحد یا سامانه‌ی تولید، گرفته می‌شوند.	ISO 14040; 2006
محصول جانبی		ماده‌ی نامطلوب خروجی در هر حالتی (گاز، مایع، جامد) از فرایند واحد که منجر به خسارات اقتصادی یا آثار منفی زیست‌محیطی می‌شود.	(Cano-Ruiz and McRae, 1998; Lowe, 1997; Turton et al., 2008)
پسماند	آلاینده‌ها، پساب	مواد یا اشیایی که کاربر یا خودخواسته یا بالاجبار باید دور بیندازد.	(ISO, 2006; Zhang et al., 2015), (United Nations, 1989)

۴-۳-۴ هم‌محصول

اصطلاح «هم‌محصول» با استفاده از تعریف مشخص آن در استاندارد ISO 14040: 2006 (مدیریت محیط‌زیست - ارزیابی چرخه‌ی عمر-مبانی و چارچوب. سازمان‌دهی بین‌المللی به منظور استانداردسازی) تعریف می‌شود. بحث‌های بیشتر معطوف به آن در بخش ۴-۳-۵ فراهم آمده است.

۴-۳-۵ محصول جانبی

محصولات جانبی فرایند ممکن است به صورت‌های متنوعی نظیر حاصل استوکیومتری واکنشی دلخواه، در نتیجه‌ی واکنش‌های ثانویه‌ی ناخواسته یا از سامانه‌های جداسازی (ستون‌های تقطیر) تولید بشوند. برای مثال آلاینده‌ها را می‌توان به‌عنوان محصولات جانبی فرسو در شکل مواد غیربازیابی شده (Unrecovered) و گسیل‌شده‌ها (Emissions) پنداشت. شناخت و ارزشیابی ترکیب محصولات جانبی به هنگام تحلیل تبادل‌های میان فرایندهای متفاوت بسیار حائز اهمیت است. برای نمونه در نظر گرفتن هم‌زمان «واکنش‌پذیری، میزان سمیت، و جرم» محصولات جانبی

(Ecosystem) و فراوری آن‌ها به شکل دیگری از ماده برای استفاده‌های آتی توصیف کرده‌اند. در اکثر تولیدات از موادی که مستقیماً از بوم‌سازگان به دست می‌آیند استفاده نمی‌شود. به همین خاطر، برای پیشگیری از برداشت‌های متفاوت [یا همپوشانی معانی]، اصطلاح مواد برای تعریف مواد فیزیکی از فرایندهای بالادستی (بالاجریان)، به جای اصطلاح مواد خام انتخاب شد. مواد می‌توانند فرعی هم باشند، مانند یاری‌گرها، حلال‌ها و افزودنی‌ها. هم‌چنین می‌توانند تجدیدپذیر یا بازیافتی هم در نظر گرفته شوند.

۴-۳-۲ محصول

اصطلاح «محصول» با استفاده از تعریف مشخص آن در مقاله‌ی Zhang و همکاران در سال ۲۰۱۵ تعریف شده است.

۴-۳-۳ محصول میانی

اصطلاح «محصول میانی» با استفاده از تعریف مشخص آن در استاندارد ISO 14040: 2006 تعریف شده است.

محصول، یا خدمت انجام می‌شود. این آثار با استفاده از سه سازوکار گزارش می‌شوند: داده‌ها، سنجشگرها (Metrics) و نشانگرها (Indicators)؛ که در آن‌ها داده‌ی مقادیر اندازه‌گیری خام هستند، سنجشگرها واحدی از سنجیدن به منظور تسهیل روند ارزشیابی هستند و نشانگرها ارائه‌های کمی‌نگاری شده‌ی معنی‌دار و قابل درکی هستند که برای عادی‌سازی (مرتب‌سازی) دسته یا ارائه‌ای از سنجشگرها با استفاده از «عامل مشخصه» نمایش داده می‌شوند. سه سازوکار گزارش‌دهی یعنی بخش‌های ۴-۴-۱ تا ۴-۴-۷، عموماً با اطلاعات فرایند و پارامترها متفاوت هستند، زیرا این بخش‌ها و بخش‌های بعدی معمولاً مستقیماً از قابلیت زیست‌پایداری فرایند پرده‌برداری می‌کنند. با این اوصاف، این موارد به طور غیرمستقیم بر نتایج ارزیابی قابلیت زیست‌پایداری تأثیر می‌گذارند.

در نهایت باید گفت اصطلاح قابلیت اندازه‌گیری (Measurable) در این پژوهش تعریف و گنجانده شد چه پوشاندن جامه‌ی کمی بر قبا‌ی نتایج مطالعه‌ی قابلیت زیست‌پایداری، به منظور تسهیل روند تصمیم‌گیری بسیار مهم است. سه اصطلاح پایانی مفاهیم فرایند مشخصه‌ی زیست‌پایداری، مشخصه‌ی فرایند و ارزیابی زیست‌پایداری را از یکدیگر متمایز می‌کند. در جدول ۴ می‌توانید تعاریف هماهنگ‌شده‌ای از اصطلاح‌شناسی اندازه‌گیری را مشاهده کنید.

۴-۴-۱ آثار (Impacts)

به دلیل استفاده‌ی مکرر و متعدد واژه «آثار» در تعاریف اصطلاحاتی که در این پژوهش ارائه شده‌اند، می‌توان گفت این واژه به اصطلاح جدایی‌ناپذیر در مشخصات فرایند تولید تبدیل شده است. ISO 2006 (استاندارد مدیریت محیط‌زیست - ارزیابی چرخه‌ی عمر - مبانی و چارچوب) تأکید کرده است که آثار کمی‌نگاری شده (قابل اندازه‌گیری) یا پیامدهای ورودی‌ها و خروجی‌های فرایند روی سلامت انسان و محیط‌زیست، می‌تواند در دسته‌بندی‌های متنوعی از آثار سازمان‌دهی شوند. Zhao و همکارانش در سال ۲۰۱۲ اشاره داشتند که آثار زیست‌محیطی محصولات باید از طریق تحلیل‌های خود فرسو کاهش یابند. به طور کلی می‌توان گفت تعریف و بیان آثار شامل مزایای مثبت و زیان‌های منفی است. آثار مرتبط با تولید، به عنوان عواقب و پیامدهای فرایندهای فرسو در نظر گرفته می‌شوند و می‌توانند در مقیاس‌های زمانی کوتاه و دراز مدت اتفاق بیفتند. آثار مثبت شامل جنبه‌های اقتصادی، زیست‌محیطی، یا اجتماعی است. برای نمونه حفظ هزینه‌ها، کاهش آلودگی و ایجاد اشتغال از مهم‌ترین این موارد است. از آن طرف، آثار منفی دربرگیرنده‌ی

نسبت به حالتی که مستقلاً بررسی می‌شوند، منجر به تحلیل‌های هدفمندتر و عملی‌تر خواهد شد. از آن طرف Lowe در سال ۱۹۹۷ معتقد بود، «اساساً این دیدگاه که باید با خلق بازارهای متنوع محصولات جانبی را مدیریت کرد، می‌بایست تغییر کند و تا حد ممکن تلاش کرد که ایجاد محصولات جانبی از همان منبع [قدم اول تولید] کاهش یابد». در نظر داشتن این نوع دیدگاه نسبت به محصولات جانبی، به این معنی است که باید از آن‌ها در زمان طراحی، برنامه‌ریزی، و تصمیم‌گیری اجتناب کرد، چه این ترکیبات در نهایت منجر به خسارات اقتصادی یا آثار زیست‌محیطی برای سازنده خواهند شد.

اما در مقابل هم‌محصول‌ها، مفید هستند و به صورت محصولات جانبی یا پسماندها در نظر گرفته نمی‌شوند. مثلاً بسیاری از مواد فلزی که با آن‌ها سروکار داریم، خودشان هم‌محصول‌هایی هستند که از فراوری فلزات دیگر تولید می‌شوند. برای نمونه عناصر کادمیوم (Ca)، ایندیوم (In)، ژرمانیوم (Ge) و گالیوم (Ga)، همگی هم‌محصولات تولید روی (Zn) از ماده معدنی اسفالت‌ریت هستند. معمولاً هنگامی که فلزات تولید می‌شوند، به عنوان محصولات جانبی تولید Zn بازیابی شده و از ناخالصی‌های موجود در اجزای معدنی ناشی می‌شوند.

۴-۳-۶ پسماند (Waste)

اصطلاح «پسماند» با استفاده از تعریف استاندارد ISO 14040: 2006 تعریف شده بود، که در واقع از تعریف توافق‌نامه Basel (سازمان ملل ۱۹۸۹) استفاده کرده بود. پساب‌ها و آلاینده‌ها به عنوان اصطلاحات مترادف با پسماند گنجانده می‌شوند، چه برای تولیدکننده هیچ ارزشی ندارند و معمولاً با برخی هزینه‌ها دفع یا رها می‌شوند (برای مثال هزینه‌های جابه‌جایی و مجوزها). پسماندهای گازی یا پرتوزا (Radioactive) همواره به صورت ترکیبات گسیل‌شده شناخته شده، در حالی که پسماندهای مایع به عنوان پساب‌ها شناسایی می‌شوند. به طور کلی پسماندها می‌توانند [در بعضی شکل‌ها برای سلامتی انسان و محیط‌زیست] خطرناک فرض شوند یا خطری ایجاد نکنند.

۴-۴ اصطلاح‌شناسی اندازه‌گیری

اصطلاح‌شناسی اندازه‌گیری [بیانی از نحوه‌ی بررسی و شاخص‌گذاری با هدف شفاف‌سازی] تفاوت‌ها میان سازوکارهای گزارش‌نویسی/گزارش‌دهی است؛ بخش‌های ۴-۴-۱ تا ۴-۴-۷ مقادیر عددی را بیان می‌کند، در حالی که بخش‌های ۴-۴-۸ الی ۴-۴-۱۱ به بررسی فرایند می‌پردازد. «ارزیابی قابلیت زیست‌پایداری» به منظور شناسایی آثار متفاوت فرایند، سامانه،

جدول ۴ اصطلاح‌شناسی اندازه‌گیری (Measurement).

اصطلاحات	مترادف‌ها	تعریف هماهنگ‌شده	مراجع
آثار	نتایج زیست‌پایداری	نتایج یا برون‌دادهای مطالعه یا ارزیابی است که پیامدهای زیست‌محیطی، اقتصادی و اجتماعی را کمی‌نگاری کرده، با استفاده از داده‌ها یا سنجش‌ها شناسایی و توصیف می‌شوند. اصطلاح آثار می‌تواند بار معنایی مثبت یا منفی داشته باشد.	(ISO, 2006; Zhang et al., 2015; Zhao et al., 2012)
داده	اندازه‌گرفته‌ها	«اندازه‌گیری‌های حقیقی مشاهده شده‌ی متغیر» است.	Veleva and Ellenbecker, 2001
سنجش‌گر	اندازه‌گر، سنج‌هی عملکرد، اندازه‌گر عملکرد، میان‌نقطه (Midpoint)	واحد اندازه‌گیری است که به منظور ارزشیابی یا برآورد در سامانه، ماشین‌آلات، فرایند، یا زیرفرایند استفاده می‌شود. [همواره در صنعت] سنجشگرها با هدف محاسبه‌ی نشانگرها به کار می‌روند. شیوه‌های گوناگونی از سنجشگری برای ارزیابی جنبه‌های زیست‌پایداری «اقتصاد، محیط‌زیست، و جامعه» متداول است. سنجش‌گرها براساس نیازها و گستره‌ی سطح برآورد مصرف‌کننده‌ی نهایی، ارزشیابی و گزینش می‌شوند.	Eastwood et al., 2013; Haapala et al., 2013; US Department of Commerce (2013); Veleva and Ellenbecker, 2001
نشانگر	دسته‌بندی آثار، نشانگر دسته‌بندی، نشانگر عملکرد کلیدی (KPI)، شاخص / نشانگر ترکیبی، نقطه‌ی پایانی (Endpoint)	متغیر یا پارامتر معنی‌داری (قابل درک) است که اطلاعاتی درباره‌ی فرایند تولید یا سامانه‌ی تولید [قابلیت زیست‌پایداری فرایند] فراهم می‌آورد. معمولاً برای تحلیل، نشانگرهای چندتایی استفاده می‌شوند. [همواره در صنعت] سنجش‌گرها با هدف محاسبه‌ی نشانگرها به کار می‌روند.	ISO, 2006; Mani et al., 2014; US Department of Commerce (2013); Veleva and Ellenbecker, 2001, Zhang et al., 2015
عامل مشخصه‌یابی	عامل تبدیل	عاملی که از مدل مشخصه‌یابی شده به دست آمده و در تبدیل نتایج تحلیل‌های «موجودی چرخه‌ی عمر مشخص (Life Cycle Inventory)» به کار گرفته می‌شود به صورت واحد متداول نشانگر هر مقوله ارائه می‌شود. این واحد محاسبه‌ی نتایج نشانگر مقوله‌ها را آسان می‌کند.	ISO, 2006
اطلاعات فرایند		توصیف فرایند ساخت واحد و توصیف محصولات مرتبط به آن فرایند است. این اصطلاح هر اطلاعات مرتبط با محصول یا فرایندی را در که در شرف ورود به واحد کارویژه است، دربرمی‌گیرد.	ASTM, 2014; Overcash et al., 2012
پارامترها	متغیرها، فراسنج‌ها	شرایط، نشانه‌ها (Attribute)، یا تنظیمات و ترتیب‌هایی از فرایند تولید که، می‌تواند به منظور تأثیر در عملکرد فرایند پیوسته در حال تغییر باشند.	Kellens et al., 2012a; US Department of Commerce (2013); Veleva and Ellenbecker, 2001

(US Department of Commerce (2013))	قابلیت اندازه‌گیری کمی و برآورد کیفی در ژرف‌نمایی چندبعدی مانند اقتصادی، اجتماعی، زیست‌محیطی و فنی است.		قابلیت اندازه‌گیری
Mani et al., 2014	به توالی عملیات با ابزارآلات و وسایل لازم، با داشتن هدف تعیین مقدار کمی نشانگر [به منظور کمی کردن قابلیت زیست‌پایداری فرایند] گفته می‌شود.	فرایند اندازه‌گیری زیست‌پایداری	فرایند مشخصه زیست‌پایداری
Mani et al., 2014	معمولاً مشخصه‌یابی فرایند فعالیت‌هایی شامل «شناسایی ورودی‌ها و خروجی‌های کلیدی یک فرایند، گردآوری داده روی بازه کلی عملیات، تخمین حالت پایا (Steady-State) در شرایط عملیاتی بهینه، و ساختن مدل‌های ریاضی که روابط پارامتری میان بازه عملیات را توصیف می‌کنند» بر عهده دارد. نتیجه و برون‌داد نهایی فعالیت مشخصه‌یابی فرایند، به صورت مجموعه‌ای از مدل‌های فرایندی ریاضی بوده که می‌توانند به منظور نمایش تحلیل‌ها و بهبود فرایند استفاده شوند.	مشخصه فرایند تولید، مشخصه زیست‌پایداری فرایند	مشخصه فرایند
ISO, 2006; Ness et al., 2007; Zhang et al., 2015	بررسی روش شناختی از سامانه، فرایند، یا محصولی که برای درک تأثیرات اجتماعی (انسان‌ها)، اقتصادی، و زیست‌محیطی، با توجه به گستره و مقیاس زمانی خاص انجام می‌پذیرد.	تحلیل‌های قابلیت زیست‌پایداری، مطالعه‌ی قابلیت زیست‌پایداری، تحلیل‌های عملکرد سامانه	ارزیابی زیست‌پایداری

بالاتر سامانه کمتر در مورد جزئیات رده‌ی پایین‌تر راهنمایی‌های مشخصی ارائه می‌دهد. مقادیر معنی‌دار برای تصمیمات متفاوت وابسته به میزان دور بودن تصمیم از بافت تحلیل‌ها دارد. همواره سنجشگرها کم‌تر از نشانگرها از متن دور شده و مستقیم‌تر راه‌حل‌های فرسو را پشتیبانی می‌کنند.

برای مثال، به منظور حساب کردن سنجشگر برای پسماند نسبت به مقدار محصول، داده‌های جمع‌آوری شده به نوع پسماند بستگی داشته، می‌توانند بر حسب حجم یا جرم ضایعات تولید شده در واحد زمان محاسبه شوند. یک نمونه نشانگر محاسبه‌شده بر اساس سنجشگر پسماند، پتانسیل سمیت انسانی یا HTP است. HTP نشان‌دهنده‌ی آسیب احتمالی ناشی از رهایش توده‌ی معینی از مواد شیمیایی به محیط‌زیست بر اساس سمیت و مقدار بالقوه‌ی ترکیبی است که وارد بدن شده است. انتشار آلاینده‌ها می‌تواند بر حسب معادل بنزن (سرطان‌زا) یا تولوئن (غیرسرطان‌زا) ارائه شود.

دقت شود که در این دو مثال، نتایج سنجشگر (پسماند) برای تصمیم‌گیری را نشان می‌دهد ولی نتایج نشانگر HTP به

کاهش استفاده از تأمین‌کنندگان محلی، افزایش پساب‌های آبی و افزایش خطرهای شغلی است.

۴-۴-۲ داده

اصطلاح «داده» با استفاده از تعریف پژوهش Velva و Ellenbecker (نشانگرهای تولید زیست‌پایدار: چارچوب و روش‌شناسی) در سال ۲۰۰۱ ارائه شده است.

۴-۴-۳ سنجشگرها (Metrics)

سنجشگرها با هدف محاسبه یا ردیابی نشانگرها استفاده شده و می‌توانند به منظور توصیف عملکرد زیست‌پایداری سامانه به کار روند. [اندازه‌گیری] انواع متفاوتی از معیارهای ارزشیابی نظیر نقاط پایانی/ نقاط میانی و نشانگرها/ سنجشگرها را در سطوح متفاوتی از تحلیل‌های سامانه‌ای دربرمی‌گیرد. به دلیل وجود جزئیات وابسته به سطوح مختلف، هر چه تحلیل‌های سامانه گسترده‌تر می‌شوند، نیاز به معیارهای سطح بالاتری که از تنظیمات فرایند دورترند پیدا می‌شود. بنابراین، تحلیل‌های سطح

NIST-موسسه‌ی استانداردها و فناوری ملی آمریکا) در سال ۲۰۱۳ تعریف شده است.

۴-۴-۹ فرایند مشخصه‌ی زیست‌پایداری

اصطلاح «فرایند مشخصه‌ی زیست‌پایداری» با استفاده از تعریف موجود در مقاله Mani و همکاران در سال ۲۰۱۴ (مشخصه‌ی قابلیت زیست‌پایداری برای فرایندهای ساخت) تعریف شده است.

۴-۴-۱۰ فرایند مشخصه‌یابی

اصطلاح «فرایند مشخصه‌یابی» با استفاده از تعریف موجود در مقاله Mani و همکاران در سال ۲۰۱۴ (مشخصه‌ی قابلیت زیست‌پایداری برای فرایندهای ساخت) تعریف شده است.

۴-۴-۱۱ ارزیابی زیست‌پایداری

به دلیل استفاده‌ی مکرر و متعدد از «ارزیابی زیست‌پایداری» در مباحث مقاله، این اصطلاح هم به دسته‌بندی‌های این پژوهش افزوده شد. این اصطلاح به عنوان پیامدی از گسترش و بسط مفهوم LCA تعریف شده و شامل آثار اقتصادی و اجتماعی است. Zhang و همکارانش در سال ۲۰۱۵ روش‌های ارزیابی مشارکتی را، شامل ارزیابی «آثار اجتماعی و جامعه‌شناختی»، ارزیابی «آثار زیست‌محیطی»، و هزینه‌ی چرخه‌ی عمر را شناسایی کردند. هر یک از این روش‌ها را می‌توان ذیل چتر «ارزیابی زیست‌پایداری» تعریف و بسط داد. Ness در سال ۲۰۰۷ سه جزء مرتبط با تعریف قابلیت زیست‌پایداری را شناسایی کرد: (۱) یکپارچگی طبیعت و جامعه، (۲) جنبه‌های محیطی و فضایی، (۳) جنبه‌های موقتی (وابسته به زمان).

۴-۴-۱۵ اصطلاح‌شناسی مدل

اصطلاح‌شناسی مدل، انواع مختلفی از مدل‌هایی را که معمولاً در مشخصات فرسو کاربرد دارند و یافت می‌شوند، بیان می‌کند. قصد نویسندگان این مقاله کنکاش تمام معادلات یا مدل‌های ممکن که همواره در روند مشخصه‌یابی (مدل‌سازی) استفاده می‌شوند، مانند روابط خاص معادلات Navier-Stokes نیست، چه انواع متعددی از این نوع مدل‌ها وجود داشته و نیز در گذشته هم تعریف شده‌اند. اصطلاحاتی که در این دسته به کار می‌روند شامل، مدل فرایند ساخت واحد، موجودی چرخه‌ی عمر فرایند واحد (UPLCI)، تحلیل موجودی روشمند و ژرف‌نگر، تحلیل موجودی روشمند غربالگر، مدل جریانی فرایند ساخت و مدل اطلاعات فرایند ساخت است (بخش‌های ۴-۵-۱ و ۴-۵-۳).

صورت ذاتی غیرشفاف بوده، می‌تواند تعارض تفسیری ایجاد کند. اگر مقدار پسماند فرایندی زیاد باشد، [این بدان معنی است که فرایند از منظر زیست‌محیطی خطرناک بوده و] می‌بایست راهکاری مبنی بر کاهش ضایعات/آلاینده‌های فرایند ارائه کرد؛ در نقطه مقابل مقدار زیاد نشانگر HTP یا به‌خاطر افزایش ضایعات/آلاینده‌ها است یا تغییر در مواد/مواد شیمیایی در هنگام تولید، خاستگاه این مهم بوده است.

۴-۴-۴ نشانگر (Indicator)

نشانگر معیار یا اندازه‌ای است که به منظور تعیین کمیت اطلاعات، با هدف توصیف پدیده یا جنبه‌ای از سامانه، برای تصمیم‌گیرندگان حوزه‌های کسب‌وکار یا مهندسی استفاده می‌شوند. معمولاً مجموعه و ترتیبی از نشانگرها به منظور اندازه‌گیری جمعی «عملکرد زیست‌پایداری» استفاده می‌شوند. مجموعه‌ی نشانگرها به عنوان شاخص‌ها یاد می‌شود.

۴-۴-۵ عامل مشخصه‌یابی (Characterization Factor)

اصطلاح «عامل مشخصه‌یابی» با استفاده از تعریف آن در استاندارد ISO 14040: 2006 (مدیریت محیط‌زیست-ارزیابی چرخه عمر- مبانی و چارچوب) تعریف شده است.

۴-۴-۶ اطلاعات فرایند

اطلاعات فرایند به عنوان اطلاعاتی که با فرسو مرتبط هستند شناخته می‌شوند. Overcash و همکارانش در سال ۲۰۱۲، اطلاعات فرایند را مشتمل بر واحد کارویژه، مدت زمانی، جغرافیا، و فناوری بیان کردند؛ اما ASTM 2014 هندسه‌ی قطعه، نشانگرهای کلیدی عملکرد (KIPs)، خواص ماده، دستورکارهای تنظیم و عملیات، برنامه‌های کیفیت، و برنامه‌های کنترل را مشمول اطلاعات فرایند می‌دانستند. اطلاعات فرایند، اصطلاحی کلی و تعمیم‌یافته بوده، دربرگیرنده‌ی کلیه‌ی اطلاعات مرتبط با فرایند و/یا برهم‌کنش (تعامل) فرایند-محصول است.

۴-۴-۷ عوامل

عوامل و متغیرها به عنوان شرایط ورودی فرسو، ویژگی‌های سامانه، یا خواص سنجیده‌شده، توصیف می‌شوند. عوامل نوع خاصی از اطلاعات فرایند هستند.

۴-۴-۸ قابلیت اندازه‌گیری

اصطلاح «قابلیت اندازه‌گیری» با استفاده از تعریف آن US Department of Commers (نشانگرهای ساخت زیست‌پایدار

این رویکرد به چهار مطالعه تقسیم می‌شود: زمان، توان (قدرت)، مواد مصرفی و بررسی‌های انتشار آلاینده‌گی. این مطالعات تمام ورودی‌ها و خروجی‌های مرتبط با فرایند را همراه با جزئیات مستند می‌کند.

۴-۵-۵ تحلیل موجودیِ روشمند غربالگر

تحلیل موجودیِ روشمندِ غربالگر که آن هم از روش CO2PE! برخاسته است، داده‌های UPLCI تولید کرده، اولین دیدگاه را در مورد فرسو ارائه می‌دهد. مطالعه‌ی غربالگری به عنوان بررسی ابتدایی درباره‌ی فرسو پنداشته شده و قادر است مرز، واحد فرایندی، عوامل ماشینی و اطلاعات فرایند را تعریف کند. [درنهایت] این نوع اطلاعات با هدف محاسبات اتلاف جرم و انرژی تولید می‌شوند.

۴-۵-۶ مدل جریان فرایند ساخت

اصطلاح «مدل جریان فرایند ساخت» با استفاده از تعریف موجود در مقاله Mani و همکاران در سال ۲۰۱۴ (مشخصه قابلیت زیست‌پایداری برای فرایندهای ساخت) تعریف شده است.

۴-۵-۷ مدل اطلاعات فرایند ساخت

اصطلاح «مدل اطلاعات فرایند ساخت» با استفاده از تعریف موجود در مقاله Mani و همکاران در سال ۲۰۱۴ (مشخصه قابلیت زیست‌پایداری برای فرایندهای ساخت) تعریف شده است.

۴-۵-۸ طبقه‌بندی Taxonomy

اصطلاح طبقه‌بندی با هدف دسته‌بندی (طبقه‌بندی) تنوع وسیعی از فرایندهای تولید استفاده می‌شود (Dufflou و دستیارانش در سال ۲۰۱۲). هم‌چنین طبقه‌بندی مدون، به مهندسان و دیگر کارکنان تولید کمک می‌کند تا بتوانند فرایندهای در دسترس را به صورت تدوین‌شده درک کنند و روش‌هایی را که در محصولات ساخت به کار می‌روند به خوبی شناسایی کنند. در نهایت می‌توان گفت، طبقه‌بندی‌ها به انتقال اطلاعات برای تسهیل تصمیم‌گیری‌ها [در روند ساخت/تولید] کمک می‌کند. مثال‌هایی که شامل طبقه‌بندی‌ها هستند، به وسیله‌ی پژوهش‌های متعددی نظیر NRC در سال ۱۹۹۵، Todd و همکارانش در سال ۱۹۹۴، و DIN ۸۵۸۰ ارائه شده‌اند.

۴-۶ اصطلاح‌شناسی جریان

اصطلاح‌شناسی جریان، حرکت «انرژی، مواد، و اطلاعات» را درون سامانه‌ی تولید تعریف می‌کند. در واقع جریان‌ها برای

الی (۴-۵-۷). دو اصطلاح دیگر مبتنی بر ترکیب‌پذیری (بخش ۴-۵-۲) که برهم‌کنش مدل را توصیف می‌کند و طبقه‌بندی (بخش ۴-۵-۸) که فرایندهای فرسوی متفاوت را به وسیله‌ی عملکردی که دارند بیان می‌کند، وجود دارند. جدول ۵ تعاریف هماهنگ‌شده‌ی اصطلاح‌شناسی مدل را ارائه می‌دهد.

۴-۵-۱ مدل فرایند ساخت واحد

اصطلاح مدل‌های فرایند ساخت واحد به منظور کشف برهم‌کنش‌های ماده و فرایند توسعه داده شده است و می‌تواند برای کمی کردن سنجش‌های قابلیت زیست‌پایداری استفاده شوند. این مدل‌ها با هدف برقراری ارتباط میان ورودی‌های ماده و انرژی به خروجی‌ها به کار رفته و قادر هستند برای تغییرات در فرایندها به حساب آیند. مدل‌ها درون روابط مکانیستیکی یا مشاهدات تجربی بسط داده شده‌اند. ارزشیابی مدل، امکان تحلیل محصول و طراحی‌های فرایند و بررسی در برای بهبود را فراهم می‌آورد.

۴-۵-۲ ترکیب‌پذیری Composability

ترکیب‌پذیری پس از تعریف تحقیق Anderson و Davis در سال ۲۰۰۴ تعریف شده است. هدف مدل‌سازی فرایند ساخت واحد، داشتن قابلیت است که بتواند مدل‌های مختلف فرسو را برای ایجاد سامانه‌ی تولید یا ارزیابی محصول، به یکدیگر مانند زنجیر وصل کند. خودکارسازی برنامه‌ریزی جریان فرسو و بهینه‌سازی سامانه‌ی تولید با استفاده از کنترل فرایند، همگی در صورتی رخ خواهند داد که مدل‌های ارائه‌شده ظرفیت تعامل و برهم‌کنش با یکدیگر را داشته باشند. این تعامل یا به عبارت دقیق‌تر برهم‌کنش میان مدل‌ها را ترکیب‌پذیری می‌نامند.

۴-۵-۳ موجودی چرخه‌ی عمر فرایند واحد (UPLCI)

UPLCI، داده‌هایی را برای فرایند دربرمی‌گیرد که حاصل مطالعه‌ی قابلیت زیست‌پایداری باشد. UPLCI با استفاده از تعریف Overcash و Twomey در سال ۲۰۱۲ تعریف شده است. UPLCI به گونه‌ای قالب‌بندی شده که شامل نمای کلی از فرایند، مراجع و داده‌ی نوشته‌ها، انتخاب عوامل، محاسبات انرژی LCI، و محاسبات اتلاف جرم LCI می‌شود. بنای UPLCI در روش CO2PE! رسمیت یافته است.

۴-۵-۴ تحلیل موجودیِ روشمند و ژرف‌نگر

رویکرد تحلیل موجودیِ روشمند و ژرف‌نگر که از روش CO2PE! نشئت گرفته شده، داده‌های UPLCI دقیق‌تری را نسبت به تحلیل موجودیِ روشمندِ غربالگر تولید می‌کند. اساساً

جدول ۵ اصطلاح‌شناسی مدل.

اصطلاحات	مترادف‌ها	تعریف هماهنگ‌شده	مراجع
مدل فرایند ساخت واحد	مدل فرایند واحد، مدل فرسو	به شماری مدل‌های ریاضی توسعه‌یافته برای فرایند ساخت واحد مشخص که به تحلیل ویژه‌ی سنجش‌ها یا نشانگرها می‌پردازند، گفته می‌شود. مدل‌ها می‌توانند از منظر روابط مکانیستیک (نظریه‌هایی که هر پدیده را تماماً از نظر فیزیکی توضیح می‌دهند، مترجم) یا مشاهدات و اندازه‌گیری تجربی توسعه بیابند. مدل‌ها می‌بایست برای تمامی ورودی‌ها و خروجی‌های فرایند محاسبه و تعمیم داده شوند.	Eastlick and H a p a l a , 2012; Eastwood et al., 2013
ترکیب‌پذیری		قابلیت‌گزینش و سرهم‌بندی مدل‌ها به شیوه‌های گوناگون برای نمایش جریان فرایند یا توانایی مدل‌هایی که قادرند مقیاس‌های فرایندی متفاوتی را نشان دهند، است. مدل‌ها را می‌توان به صورت جداگانه یا ترکیبی ارزیابی کرد تا تأثیرات آن روی سطوح مختلف تولید (مانند زیرفرایند، فرایند ساخت واحد، یا سامانه تولید) مشخص شود.	Davis and Anderson, 2004
موجودی چرخه‌ی عمر فرایند واحد (UPLCI)		مشخصه‌ی فرایند که درباره چارچوب موجودی‌های آن شامل داده [ورودی]، معادلات [مدل]، نتایج [خروجی] گزارش می‌دهد؛ این مشخصه مثالی برای فرایند مشخص و برهم‌کنش واحد کارویژه و مرجع است. داده‌ها شامل توصیف‌های فرایند، شکل‌ها، عکس‌ها، محاسبات انرژی و جدول‌های خواص فیزیکی و انرژی است. معادلات، جرم اتلافی و انرژی لازم را با استفاده از ورودی‌ها و اطلاعات فرایند محاسبه می‌کنند.	Kellens et al., 2012a), (Overcash and Twomey, 2012), (Overcash et al., 2009
تحلیل موجودی روشمند و ژرف‌نگر	رویکرد ژرف‌نگر، تحلیل‌های موجودی روشمند و ژرف‌نگر	روش مشخصه‌یابی فرایند که شامل چهار بررسی از دستگاه خاص است: زمان، توان (Power)، مواد مصرفی، و گسیل‌شده‌ها (آلاینده‌ها)؛ با استفاده از همین دستگاه، داده‌ی ورودی و خروجی مواد و انرژی (LCI) فرایند ساخت واحد را نتیجه می‌دهد. می‌تواند به‌عنوان روش برای توسعه‌ی مدل‌های فرایند واحد پنداشته شود.	Duflou et al., 2012; Kellens et al., 2012a, 2012b
تحلیل موجودی روشمند غربالگر	رویکرد غربالگری، تحلیل موجودی روشمند غربالگر	روش مشخصه‌یابی فرایند که داده‌ی ورودی و خروجی LCI را با استفاده از محاسبات انرژی و محاسبات اتلاف انرژی گزارش شده در واحد کارویژه، تقریب می‌زند. می‌تواند به‌عنوان روش برای توسعه‌ی مدل‌های فرایند واحد پنداشته شود.	Duflou et al., 2012; Kellens et al., 2012a, 2012b
مدل جریانی فرایند ساخت		جریان داده‌ها (مانند ورودی‌ها، خروجی‌ها، جریان‌های مرجع و کنترل) و اولویت‌بندی را در فرایندهای ساخت توصیف می‌کند. به‌عنوان مثال سنگ‌بنای مرجع یعنی یکپارچه‌سازی سامانه‌ها برای کاربردهای ساخت (SIMA) از نمونه‌های آن است.	Mani et al., 2014
مدل اطلاعاتی فرایند ساخت		روابط میان عملکرد قابلیت زیست‌پایداری و اطلاعات مرتبط با فرایندهای ساخت را تعریف می‌کند (برای نمونه منابع، مواد ابزاری، و انرژی). نهادها و روابط آن‌ها را تعریف می‌کند. می‌تواند شامل سطح‌های چندگانه، مثل خاصیت یا روابط ریاضی‌شناختی باشد.	Mani et al., 2014
طبقه‌بندی	طبقه‌بندی فرایند ساخت	نظم مدون از طبقه‌بندی فرایند ساخت است که برای شناسایی فرایندهای ساخت واحد مشخص به وسیله‌ی عملکردشان استفاده می‌شود.	Duflou et al., 2012; Mani et al., 2014

عمر- مبانی و چارچوب) ارائه شده است.

۴-۶-۳ جریان میانی

اصطلاح «جریان میانی» با استفاده از تعریف مشخص آن در استاندارد ISO 2006 (مدیریت محیط زیست-ارزیابی چرخه‌ی عمر- مبانی و چارچوب) تعریف شده است.

۴-۶-۴ جریان انرژی

اصطلاح «جریان انرژی» با استفاده از تعریف ارائه شده در استاندارد (ASTM 2014: WK35705)؛ راهنمای جدید به منظور مشخصه‌ی قابلیت زیست‌پایداری فرایندهای ساخت) تعریف شده است.

۴-۶-۵ جریان اطلاعات

اصطلاح «جریان اطلاعات» با استفاده از تعریف موجود در مقاله Mani و همکاران در سال ۲۰۱۴ (مشخصه‌ی قابلیت زیست‌پایداری برای فرایندهای ساخت) تعریف شده است.

۴-۶-۶ تبدیل ماده

اصطلاح «تبدیل ماده» با استفاده از تعریف ارائه شده در استاندارد (ASTM 2014: WK35705)؛ راهنمای جدید به منظور مشخصه‌ی قابلیت زیست‌پایداری فرایندهای ساخت) تعریف شده است.

۴-۶-۷ تبدیل انرژی

اصطلاح «تبدیل انرژی» با استفاده از تعریف ارائه شده در استاندارد (ASTM 2014: WK35705)؛ راهنمای جدید به منظور مشخصه‌ی قابلیت زیست‌پایداری فرایندهای ساخت) تعریف شده است.

۴-۶-۸ تبدیل اطلاعات

اصطلاح «تبدیل (انتقال) اطلاعات» با استفاده از تعریف ارائه شده در استاندارد (ASTM 2014: WK35705)؛ راهنمای جدید به منظور مشخصه‌ی قابلیت زیست‌پایداری فرایندهای ساخت) تعریف شده است.

۵ توصیه‌ها و جمع‌بندی مطالب

نیاز مبرم و اساسی برای تدوین مجموعه‌ای از اصطلاح‌شناسی رایج و مشترک در حوزه‌ی زیست‌پایداری، برای پژوهشگران، دانشمندان، مهندسان و به طور کلی تصمیم‌گیرندگانی که

واحد کارویژه (بخش ۴-۶-۱) عادی‌سازی شده و از طریق سه نوع اصلی شناسایی می‌شوند: جریان ماده، جریان انرژی و جریان اطلاعات (۴-۶-۲ الی ۴-۶-۵). اساس این جریان‌ها انتقال از یک شکل به شکل دیگر (تبدیل) است که به وسیله‌ی راه‌های متفاوتی صورت می‌گیرد: تبدیل ماده، تبدیل انرژی و تبدیل اطلاعات (بخش‌های ۴-۶-۶ تا ۴-۶-۸). تعاریف دسته‌ی جریان که در زیر ارائه شده‌اند جریان‌های ماده‌ی گسسته را توصیف می‌کنند، به عبارتی می‌توانند در واحد زمان (مثلاً s^{-1}) یا در واحد خروجی فیزیکی (مثلاً در واحد محصول) کمی‌نگاری شوند؛ تمایز میان این‌که نوع بررسی یا مطالعه چطور اجرا شود به دسترس پذیری داده‌هایی که در اختیار تحلیل‌گر قرار می‌گیرد، بستگی دارند. برای نمونه، کمی‌نگاری «مقدار» مصرف ماده‌ی سالیانه‌ی یک واحد تولیدی نیاز مبرم به استفاده از جریان‌های تولیدی برپایه-زمان دارد، یعنی آهنگ‌های جریان جرمی (مثلاً kg/s) سطح فرایندی منحصربه‌فرد دارد. تعریف‌های تبدیلی که در ادامه به ترتیب ارائه خواهند شد، تبدیل ورودی‌های مواد، انرژی یا اطلاعات را که در فرسو به صورت خروجی در می‌آیند، توصیف خواهد کرد. در جدول ۶ تعاریف هماهنگ‌شده‌ی اصطلاح‌شناسی نمایان است.

۴-۶-۱ واحد کارویژه (Functional Unit)

واحد کارویژه به عنوان واحد مرجع کیفی و کمی از سامانه‌ی تولید شناخته می‌شود. برای نمونه در حین روند فرایند ساخت واحد، کارویژه، شماری از محصولات گسسته یا جرم/حجمی از محصول پیوسته است که در مدت زمان مشخص درون سامانه‌ی تولید جریان یافته، به عنوان بستری برای تمامی اندازه‌گیری‌های کارایی فرایند عمل می‌کند و نیز به منظور ارزشیابی کارکرد هر فرسو در جریان فرایند ساخت استفاده می‌شود. همواره برای یک فرسو، واحد کارویژه واحد مرجع کمی و کیفی است که کارایی و کارکرد فرایند را نشان داده و می‌سجد (کمی‌نگاری می‌کند)، و نیز می‌تواند شامل حجم یا جرمی از ماده خارج شده در فرایند ماشین‌کاری، ظرفیت تجهیزات (مثلاً گرمخانه (Oven) در دسترس، یا آهنگ جریان فرایند شیمی باشد. CO_2PE واحدهای کارویژه استاندارد را به منظور تعیین داده‌های به‌هنگار شده (UPLCI (Normalized UPLCI Data) برای فرایندهای گوناگون به‌طور مشخص تبیین می‌کند.

۴-۶-۲ جریان (شارش) ماده

اصطلاح «جریان یا شارش ماده» با استفاده از تعریف موجود در استاندارد (ISO 2006)؛ مدیریت محیط زیست-ارزیابی چرخه‌ی

جدول ۶ اصطلاح‌شناسی جریان (Flow).

اصطلاحات	مترادف‌ها	تعریف هماهنگ‌شده	مراجع
واحد کارویژه (Functional Unit)	واحد مرجع Reference Unit	واحد مرجع کیفی و کمی برای سامانه‌ی تولید و فرسو است [نشان می‌دهد دقیقاً چه عواملی مورد کاوش قرار می‌گیرند. به طور کلی مرجعی است که با تحلیل کیفی-کمی بدین می‌پردازد که ورودی و خروجی چطور به یکدیگر مرتبط می‌شوند]، این واحد برای بهنجارسازی سنجشگرهای عملکردی سامانه ساخت یا فرسو برای تولید محصول مشخص استفاده می‌شود.	(ISO, 2006; Kel-lens et al., 2012a; Overcash et al., 2012
جریان ماده		محصولاتی که به سامانه‌ی محصول دیگری وارد یا از آن خارج می‌شوند.	ISO 14040; 2006
جریان میانی		جریان ماده، انرژی، یا اطلاعات، که میان فرایندهای واحد سامانه‌ی محصول اتفاق می‌افتد و از قبل مورد مطالعه قرار گرفته‌اند.	ISO 14040; 2006
جریان انرژی		به ورودی یا خروجی فرایند واحد یا سامانه محصول گفته شده که در واحدهای انرژی کمی‌نگاری می‌شوند. می‌توان آن را انرژی ورودی یا خروجی هم نام نهاد.	ISO 14040; 2006
جریان اطلاعات		کنترل جریان‌های مرجع، ورودی و خروجی است؛ می‌توان آن را نهادی در قالب مدل‌های اطلاعاتی فرض کرد.	Mani et al., 2014
تبدیل ماده		می‌تواند شامل تغییر جرم، تغییر فاز، تغییر ساختار، تغییر شکل (Deformation)، و ادغام مواد (Consolidation) باشد.	ASTM, 2014. WK35705
تبدیل انرژی		می‌تواند مشتمل بر تبدیل و تبدیل منابع شیمیایی، الکتریکی، گرمایی، مکانیکی و الکترومغناطیسی باشد.	ASTM, 2014. WK35705
تبدیل اطلاعات		اطلاعات ورودی همواره دستخوش تغییراتی می‌شود که می‌تواند شامل تلاش‌هایی مانند کاهش یا افزایش داده، تبدیل و ترجمه باشد. این مهم می‌تواند منجر به تغییر مواردی نظیر سنجش‌های تولید (مانند توان عملیاتی و اثربخشی کلی تجهیزات) و سنجش‌های زیست‌محیطی (مانند انرژی، مواد، آب، نشر گازها و ضایعات) است.	ASTM, 2014. WK35705

زیست‌پایدار مرتبط می‌شوند، برداشته است. بازنگری و مرور اساسی بر نوشتارگان پیشین شامل مدل‌سازی و مشخصه‌ی فرایند تولید زیست‌پایدار، با هدف افزایش درک مفاهیم کلیدی و شناسایی اصطلاح‌شناسی مرتبط با آن‌ها ارائه شد. واژگان مترادف برای اصطلاحات کلیدی به وسیله‌ی بررسی و بازنگری نوشتجات مربوط، به منظور شفاف‌سازی و هماهنگ‌سازی تعاریفی که در بسیاری از کاربردها از لحاظ معنی با یکدیگر همپوشانی داشته و ممکن است برداشت‌های متفاوتی ایجاد

به‌طور مشخص در امر «تولید زیست‌پایدار» درگیر هستند احساس می‌شود؛ چه خوانش صحیح همگانی (برای درک بهتر اصطلاحات مورد استفاده‌شان) در میان فعالان این حوزه وجود نداشته و توسعه داده نشده است. متعاقباً، امکان این که بتوان ارتباط موثری میان نیازهای فرایند تولید زیست‌پایدار و نتایج برخاسته از سامانه‌ی تولیدی یا بنگاه اقتصادی متناسب با زیست‌پایداری به دست آورد، نیست. این مطالعه گامی برای شناسایی اصطلاحات و تعاریف کلیدی، از زاویه‌ای که به تولید

(میزگردها)، سخنرانی و ارائه در همایش‌ها، جلسات هم‌اندیشی یا کارگاه‌های پژوهشی-آموزشی برگزار شوند.

کارهای آینده می‌تواند شامل استانداردسازی اصطلاح‌شناسی از طریق سازمان‌های توسعه استاندارد مانند ASTM باشد. براساس همین اصطلاح‌شناسی رایج و مشترک حاصل از مکالمات و گفتگوها در میان صنایع بی‌شمار، می‌بایست روش مشخص تعمیم‌یافته‌ای برای فرایندهای تولید ظهور کند. در نهایت، برای اطمینان از تصویب نهایی صنعت، روش‌ها بایستی در مدل‌های مقیاس‌پذیر و ترکیب‌پذیر شکل‌بندی ریاضی (Formalized) و معناشناسی تفهیم شده تا از این طریق قادر باشند در برنامه‌های نرم‌افزاری مقرون به صرفه اجرا شوند. چنین شکل‌بندی و فرمول‌بندی‌ای کاملاً نیاز مبرم امروزه است چرا که: (۱) برآورد و ارزیابی قابلیت زیست‌پایداری به مجموعه‌ی وسیعی از تخصص‌ها در میان رشته‌های مختلف نیاز داشته و به تنهایی امکان‌پذیر نیست، (۲) گردآوری داده همواره خسته‌کننده و ملال‌آور است (منظور داده‌ها و اطلاعاتی است که کمک به اندازه‌گیری و برآورد تخمینی از میزان زیست‌پایداری فرایند می‌کند، مترجم)، (۳) محاسبات ریاضی، به خصوص برای محصولات و سامانه‌های تولید پیچیده بدیهی و ساده نیستند. چنین نرم‌افزاری می‌تواند تصمیمات زیست‌پایدار و تنظیم زمان-واقعی شبکه‌های تولید را بهبود ببخشد. هر جنبه از این کار نیاز به تلاش و همکاری بی‌وقفه از طرف محققان و دست‌اندرکارانی را که وجه عظیمی از رشته‌ها و تجارب صنعتی را در بر می‌گیرند، می‌طلبد. تکمیل این پژوهش بنیادی امکان استفاده از کاربردهای «مشخصه‌ی فرایند تولید زیست‌پایدار» را فراهم کرده، تا بدین طریق از بهبود محصول، بهینه‌سازی فرایند و فعالیت‌های گزینش تأمین‌کننده بهره‌مند شوند.

توجه: مقاله‌ی حاضر ترجمه‌ی خلاصه‌شده‌ای از مقاله اصلی بوده و همه‌ی آن را شامل نمی‌شود.

نمایند، مشخص شد. ۴۷ اصطلاح شناسایی شده در ۶ دسته‌ی مجزا شامل: گستره Scope، مرز Boundary، ماده Material، اندازه‌گیری Measurement، مدل Model، و جریان Flow به منظور استخراج و تدوین منظم مفاهیم کلان سازماندهی شدند. نویسندگان این پژوهش پیشتر مشاهده کرده بودند که بررسی جامع از تحقیقات در مورد مشخصه‌ی فرایند و مدل‌های فرایند در حمایت از تولید زیست‌پایدار هنوز انجام نشده است؛ از همین روی ممکن است چنین بازبینی‌ای برای خوانندگان مفید واقع شده و شاید با سازمان‌دهی کارهای پیشین به وسیله‌ی نوع فرایند و هم‌چنین با استفاده از طبقه‌بندی فرایندهای استاندارد گام مهمی در جهت پیشبرد این امر مهم برداشته شود.

نویسندگان این مقاله بر این امر واقفند که این نوع دسته‌بندی از اصطلاحات، جامع نیست؛ با این وجود این تلاش را گام ارزشمندی در راستای شناسایی و استانداردسازی اصطلاح‌شناسی رایج برای تفهیم مشخصه‌ی فرایند تولید زیست‌پایدار می‌دانند. این دسته‌بندی اولیه و ابتدایی از اصطلاح‌شناسی، می‌تواند به‌عنوان نیرو محرکه، «گفتگوها» و «ارتباطات» تسهیلات (امکانات) تولیدی و زنجیره‌های تأمین را به منظور حمایت از کوشش‌ها و فعالیت‌های تولید زیست‌پایدار سرعت ببخشد. توجه به یک نکته از اهمیت بسزایی برخوردار است و آن این است که «عادی‌سازی زبان گفتگو از طریق اصطلاح‌شناسی و تعریف‌های استاندارد (با معانی مشخص) امری ماندگار و ضروری است». هم‌چنین این پژوهش می‌تواند بحث‌های بین اجتماع‌های مختلف (Community Discussions) را درباره‌ی استانداردها برای اصطلاح‌شناسی مشخصه‌ی فرایند تولید آغاز کند. این بحث‌های سازمان‌یافته می‌تواند با مشارکت پژوهشگران و شاغلان صنعت به منظور تسهیل اجماع روی اصطلاحات تعمیم‌یافته (عمومی)، تعریف‌ها، رویه‌ها و روش‌های عملی پیش رود. چنین بحث‌هایی می‌توانند در قالب گروه‌های کوچک

مرجع

Ian C. Garretson, Mahesh Mani, Swee Leong, Kevin W. Lyons, Karl R. Haapala; "Terminology to support manufacturing process characterization and assessment for sustainable production"; ELSEVIER, Journal of Cleaner Production 139 (August 2016) 986-1000