



مجله علمی و فناوری پلیمر ایران

فصلنامه علمی، سال یازدهم، شماره ۱
شماره پیاپی ۴۱، بهار ۱۴۰۵، بهاء ۴۰۰۰۰ ریال
Iran Polymer Technology; Research and Development



فهرست مطالب:

شناسنامه:

مقالات علمی

- مسیریابی مبتنی بر الگوریتم‌های جست‌وجوی مسیر بهینه ... ۵
علی اسمعیلی، محمد حسین خالصی، محمدرضا دوست‌محمدیان
- نانوکامپوزیت‌های پلیمری پیشرفته برای جذب انتخابی ... ۱۷
محمد خلیلی ماهانی
- مهم‌ترین گیاهان کائوچویی در دنیا و گونه‌های کائوچوی ... ۲۷
مهری ندیری نیری
- مروری بر فناوری نوظهور چاپ سه‌بعدی گرانولی ... ۳۹
عاطفه نژادابراهیم
- پوشش‌های ضدحریق و مقاوم در برابر آتش: مروری بر ... ۵۳
مجید میرزایی
- پلیمرهای هوشمند زیست‌تخریب‌پذیر ... ۷۳
دنیا نمادی وثوقی، فاطمه زین الدینی، مهرنوش محمدی

... تبلیغات

۸۳

صاحب امتیاز:

انجمن علوم و مهندسی پلیمر ایران

مدیر مسئول:

دکتر مهرداد کوکبی

سر دبیر:

دکتر محمدرضا مقبلی

دبیر اجرایی:

مهندس سیده‌آرزو میرقاسمی

ویراستار:

دکتر زهره دلجوی کج‌آباد

نشانی دفتر نشریه:

تهران، صندوق پستی ۱۴۹۷۷۱۳۱۱۵

تلفن و دورنگار: ۴۴۷۸۷۰۶۰

پست الکترونیکی: irdpt.ips@gmail.com

پایگاه اینترنتی: www.irdpt.ir

چاپ و صحافی:

کانون تبلیغات معاصر

دارای مجوز رسمی از وزارت علوم، تحقیقات و فناوری

مسئولیت صحت مطالب بر عهده نگارنده است.

اعضای هیئت تحریریه

شروین احمدی

استاد 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

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

فاطمه رفیع منزلت

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

احمد رمضانی

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

استاد دانشگاه تربیت مدرس
Ebrahimn@modares.ac.ir

فاطمه گوهر بی

دانشیار دانشگاه صنعتی امیرکبیر
Goharpey@aut.ac.ir

محمدرضا مقبلی

استاد دانشگاه علم و صنعت
Mr_moghbeli@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.

سخن نخست ...

تاب‌آوری زنجیره ارزش پتروشیمی و پلیمر ایران؛ از بحران تولید تا راهکارهای راهبردی

صنعت پتروشیمی و پلیمر ایران یکی از راهبردی‌ترین بخش‌های اقتصاد ملی به شمار می‌آید و نقشی کلیدی در تأمین مواد اولیه صنایع پایین‌دستی، ایجاد اشتغال پایدار، ارزآوری و توسعه زنجیره ارزش نفت و گاز دارد. در چنین صنعتی، مفهوم تاب‌آوری اهمیت ویژه‌ای پیدا می‌کند. تاب‌آوری به معنای توانایی تحمل شوک‌ها، تطبیق با شرایط جدید و بازیابی سریع پس از اختلالات است. این مفهوم تنها یک ویژگی فنی نیست، بلکه مجموعه‌ای از ابعاد اقتصادی، فناورانه، تدارکاتی، نیروی انسانی و حتی اجتماعی را در بر می‌گیرد و میزان پایداری صنعت را در برابر بحران‌ها مشخص می‌کند. تجربه‌های اخیر نشان می‌دهد که هرگونه اختلال در تولید مجتمع‌های بزرگ پتروشیمی، به‌ویژه در مناطق مهمی مانند ماهشهر و عسلویه، آثار زنجیره‌ای گسترده‌ای بر کل صنعت بر جای می‌گذارد و می‌تواند تأمین مواد اولیه صنایع پایین‌دستی را با مشکل جدی مواجه کند.

در شرایط بحرانی که تولید مجتمع‌ها به‌طور کامل یا جزئی متوقف می‌شود، نخستین اقدام معمول، استفاده از ذخایر و انبارهای موجود برای تأمین مواد اولیه است. با این حال، این راهکار تنها در کوتاه‌مدت پاسخ‌گوست و در صورت تداوم بحران، ناگزیر باید به واردات اضطراری برای جبران کمبودها اندیشید. در کنار آن، برق و تاسیسات پشتیبان به‌عنوان شریان‌های اصلی تولید، نقشی تعیین‌کننده دارند و اولویت‌بندی مجتمع‌ها در تخصیص برق شبکه سراسری از الزامات مدیریت بحران محسوب می‌شود. همچنین نمی‌توان از نقش سیاست‌های بازرگانی غافل شد؛ زیرا قطع ناگهانی صادرات مواد اولیه، هرچند ممکن است در ظاهر برای رفع کمبود داخلی مفید به نظر برسد، اما در عمل به روابط تجاری، اعتبار صادراتی و سیاست اقتصادی کشور آسیب وارد می‌کند. از این رو، لازم است ساختارهای بازرگانی ویژه‌ای برای شرایط بحران تعریف شود تا تعادل میان نیاز داخلی و منافع بلندمدت اقتصادی حفظ شود.

ابعاد اقتصادی اختلال در تولید نیز بسیار سنگین است. در برخی موارد، تنها قطع تاسیسات پشتیبان موجب زیان روزانه‌ای بالاتر از یک میلیون دلار برای یک مجتمع شده است. این رقم نشان می‌دهد که توقف تولید در صنعت پتروشیمی صرفاً مسئله‌ای عملیاتی نیست، بلکه مستقیماً به خسارت‌های کلان مالی و از دست رفتن فرصت‌های اقتصادی منجر می‌شود. به‌عنوان نمونه، در مورد واحد پلی‌اتیلن سنگین با ظرفیت ۳۰۰ هزار تن در سال و ارزش تقریبی هر تن محصول معادل ۸۰۰ دلار، عدم تولید تنها برای یک ماه می‌تواند حداقل ۲۰ میلیون دلار خسارت ایجاد کند؛ رقمی که بدون محاسبه هزینه‌های بازسازی، راه‌اندازی مجدد، افت بازار و آسیب‌های جانبی است. بدیهی است که چنین زیان‌هایی در مقیاس ملی، ضرورت توجه به تاب‌آوری را دوچندان می‌کند.

از منظر راهبردی، ارتقای تاب‌آوری صنعت پلیمر مستلزم نگاه صرفاً تولیدمحور نیست، بلکه نیازمند رویکردی جامع به زنجیره تأمین، الگوی مصرف و نظام بازیافت است. کاهش مصرف پلاستیک‌ها، به‌ویژه در مصارف عمومی، می‌تواند بخشی از فشار موجود بر منابع را کاهش دهد. همچنین توسعه فرهنگ صرفه‌جویی، تقویت بازیافت و حرکت به سمت فرایندهای چرخشی، نه تنها به پایداری محیط‌زیست کمک می‌کند، بلکه در شرایط بحران می‌تواند به‌عنوان منبعی مکمل برای تأمین مواد اولیه عمل کند. این رویکرد به‌ویژه برای صنایع پایین‌دستی اهمیت دارد، زیرا اتکای صرف به خوراک بکر و جریان‌های متمرکز تولید، ریسک‌پذیری سامانه را افزایش می‌دهد.

در نهایت، تاب‌آوری صنعت پتروشیمی و پلیمر را باید به‌عنوان راهبردی ملی در نظر گرفت؛ راهبردی که بر پایه مدیریت هوشمند انرژی، برنامه‌ریزی برای شرایط اضطرار، سیاست‌گذاری بازرگانی انعطاف‌پذیر و توسعه اقتصاد چرخشی بنا می‌شود. استمرار فعالیت این صنعت در شرایط پرنوسان امروز، تنها با اتکا به تولید بیشتر ممکن نیست، بلکه نیازمند آمادگی برای مواجهه با بحران، توان بازگشت سریع و طراحی سازوکارهایی است که از آسیب‌پذیری زنجیره ارزش بکاهد. از این منظر، تاب‌آوری نه یک انتخاب اختیاری، بلکه ضرورتی برای حفظ جایگاه صنعت پتروشیمی و پلیمر ایران در اقتصاد ملی و رقابت‌پذیری بلندمدت آن است.

دکتر مهدی قافله‌باشی

رئیس پژوهش‌های پلیمری شرکت پژوهش و فناوری پتروشیمی و

عضو هیئت مدیره انجمن علوم و مهندسی پلیمر ایران



فصلنامه علمی
سال یازدهم، شماره ۱، شماره پیاپی ۴۱، بهار ۱۴۰۵
Vol. 11, No. 1 Issue No. 41
Autumn 2025, Quarterly
صفحه ۵-۱۵

Iran Polymer Technology;
Research and Development

واژه‌های کلیدی:

ربات نرم پلیمری،
الگوریتم مسیریابی،
هموارسازی مسیر،
محیط ایستا.

مسیریابی مبتنی بر الگوریتم‌های جست‌وجوی مسیر بهینه و هموارسازی برای ربات‌های نرم پلیمری در محیط ایستا

علی اسمعیلی، محمد حسین خالصی^{*}، محمدرضا دوست‌محمدیان
نسمنان، دانشگاه سمنان، گروه مهندسی مکانیک

چکیده ...

ربات‌های نرم پلیمری با بدنه انعطاف‌پذیر خود برای نوابری ایمن به مسیرهایی هموار با انحنای پیوسته نیاز دارند. با این حال، الگوریتم‌های کلاسیک مسیریابی نظیر دیکسترا و A^* صرفاً کوتاه‌ترین مسیر را با چرخش‌های تیز تولید می‌کنند که با سینماتیک این ربات‌ها ناسازگار است. در این پژوهش، روشی برای هموارسازی مسیر با جایگزینی پیچ‌های قائمه توسط کمان‌های دایره‌ای به شعاع متغیر ارائه و در محیط‌های شبکه‌ای با ۲۵۰ تا ۱۰۰۰ مانع تصادفی ارزیابی شده است. تحلیل حساسیت نشان می‌دهد افزایش تراکم موانع، درصد افزایش طول مسیر را به شدت تشدید می‌کند؛ برای نمونه، در سناریوی ۱۰۰۰ مانع، طول مسیر با شعاع چهار متر تا ۲۳٪ افزایش می‌یابد. نسبت بازده خمش از ۹۰٪ در شعاع نیم متر به ۲۰٪ در شعاع ۴ متر نزول می‌کند و نسبت کارایی برای شعاع‌های کوچک‌تر از یک متر در تمامی سناریوها مقادیر دو رقمی حفظ می‌شود. همچنین میانگین فاصله ایمن از موانع در بدترین حالت حدود ۱۷ متر باقی می‌ماند. از منظر محاسباتی، الگوریتم A^* ، به مراتب سریع‌تر از دیکسترا عمل می‌کند. یافته‌ها چارچوبی کمی برای انتخاب شعاع خمش متناسب با الزامات ربات‌های نرم پلیمری فراهم می‌آورد. این رویکرد می‌تواند مبنایی برای طراحی مسیر بلادرنگ ربات‌های نرم پلیمری در محیط‌های ایستا با تراکم بالای مانع قرار گیرد.

^{*}پست الکترونیکی مسئول مکاتبات:

mhkhalesi@semnan.ac.ir

۱ مقدمه

در عصر حاضر، ربات‌های متحرک با قابلیت جابه‌جایی قطعات، انتقال مواد میان ایستگاه‌های کاری، انجام مستقل عملیات و ساخت قطعات بزرگ و پیچیده، به یکی از ارکان اصلی تحول در صنعت بدل شده‌اند [۱]. با وجود این، ربات‌های صلب سنتی که از دیرباز به واسطه دقت و تکرارپذیری بالا مورد توجه بوده‌اند، به سبب ساختار خشک و مفاصل غیرقابل انعطاف، در محیط‌های پویا و پیش‌بینی‌ناپذیر و به‌ویژه در تعامل ایمن با انسان، با محدودیت‌های ذاتی روبه‌رو هستند. همین نارسایی‌ها، پژوهش‌های معاصر را به سمت توسعه ربات‌های نرم با پیکره‌ای سازگار و انعطاف‌پذیر رهنمون ساخته است که اساساً از این کاستی‌ها مبرا هستند [۲].

تفاوت بنیادین این دو رویکرد را می‌توان در مدیریت درجات آزادی جست‌وجو کرد؛ ربات‌های صلب با مفاصل گسسته از شمار محدودی درجه آزادی برخوردارند، درحالی‌که ربات‌های نرم به واسطه پیوستگی مواد سازنده، به‌طور نظری از درجات آزادی بی‌شماری بهره می‌برند که موجب گذر از فضاها تنگ و پرمناغ می‌شود [۳].

بنیان ربات‌های نرم پیشرفته، پیکره‌ای یکپارچه و انعطاف‌پذیر است که اغلب از پلیمرهای الاستومری، سیلیکون‌ها و مواد هایپرالاستیک ساخته می‌شود [۴]. الاستومرهای سیلیکونی که از جمله مصالح بنیادین در ساخت ربات‌های نرم به‌شمار می‌روند، تحت تغییرشکل‌های بزرگ از خود رفتاری هایپرالاستیک همراه با اثرات گرانش و کشسان بروز می‌دهند. برای توصیف این رفتار، لازم است برای پیش‌بینی پاسخ ماده، از توابع انرژی کرنشی غیرخطی بهره گرفته شود [۵]. در این زمینه، مدل‌های هایپرالاستیک نتوهوکی، اگدن، مونی-ریولین و یئو برای توصیف رفتار الاستومرهای متداول در رباتیک نرم به‌کار گرفته شده‌اند [۶].

تنوع مواد پلیمری، بستری برای توسعه طیف گسترده‌ای از روش‌های تحریک فراهم آورده است. عملگرهای پنوماتیک شبکه‌ای با بهره‌گیری از فشار سیال، کماکان رایج‌ترین سازوکار برای ایجاد خمش و انبساط در ربات‌های نرم به‌شمار می‌روند. در کنار آن، نسل نوینی از عملگرهای الکترواستاتیک مبتنی بر الاستومرهای دی‌الکتریک و سیال، با ترکیب وزن سبک، کرنش بالا، چگالی انرژی زیاد و پاسخ سریع، افق‌های تازه‌ای را در این عرصه گشوده‌اند [۷]. تکامل این سامانه‌ها با ادغام حسگری در ساختار عملگر، مسیر تحقق ربات‌های نرم هوشمندی را هموار ساخته است که قادر به درک و تعامل با محیط پیرامون خود هستند [۸]. در سطح طراحی، روش‌های ریخت‌شناسی محاسباتی

با بهینه‌سازی توأمان شکل و عملکرد، امکانات بی‌سابقه‌ای برای مهندسی پیکره ربات‌های نرم ارائه می‌دهند [۹]. با وجود این پیشرفت‌ها، هدایت تغییرشکل‌های پیوسته در طول بدنه کماکان چالشی اساسی به‌شمار می‌آید. در این راستا، ربات‌های پیوسته چندبخشی با قابلیت تنظیم سختی، از طریق طراحی ساختاری مبتنی بر بریدگی‌های بیضوی و قفل‌شوندگی اصطکاکی بادی، به زوایای خمشی تا ۱۲۰ درجه برای هر قطعه دست یافته‌اند [۱۰]. هم‌زمان، مدل‌سازی سینماتیک مبتنی بر فرض انحنا ثابت، به‌عنوان رهیافتی کارآمد برای توصیف حرکت این ربات‌ها و پیاده‌سازی سامانه‌های کنترل حلقه‌بسته به‌کار گرفته شده است [۱۱]. مجموع این قابلیت‌ها، ضرورت بازاندیشی در طراحی مسیرهای حرکتی متناسب با محدودیت‌های سینماتیکی ربات‌های نرم را برجسته می‌سازد.

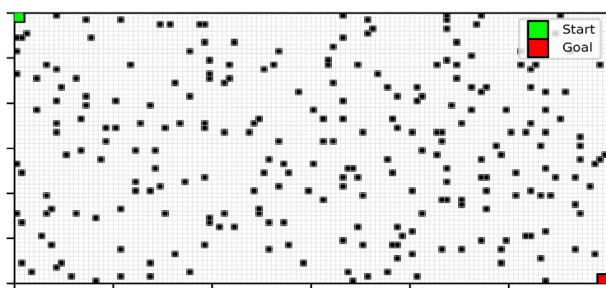
در کنار پیشرفت‌های صورت‌گرفته در طراحی و تحریک ربات‌های نرم، مسیریابی ایمن و بدون برخورد با موانع، به‌عنوان نیازی بنیادین در ناوبری خودمختار این سامانه‌ها مطرح است [۱۲]. الگوریتم‌های کلاسیک مسیریابی مبتنی بر گراف، به دلیل کارایی اثبات‌شده در یافتن سریع و قطعی کوتاه‌ترین مسیر، سنگ‌بنای ناوبری در محیط‌های ایستا به‌شمار می‌روند [۱۳]. با این حال، ماهیت ذاتاً صلب و چندضلعی مسیرهای حاصل از این الگوریتم‌ها، که با چرخش‌های ناگهانی نود درجه همراه است، با الزامات حرکتی پیوسته و نیاز به انحنا هموار در ربات‌های نرم ناسازگار است [۱۴]. از این‌رو، تبدیل این مسیرهای صلب به مسیرهایی هموار و با انحنا پیوسته، که با قیود سینماتیکی ربات نرم سازگار باشند، گامی در تکمیل زنجیره طراحی، ساخت و به‌کارگیری عملی این ربات‌ها به‌شمار می‌آید [۱۵]. مطالعه حاضر نیز، به مسئله نرم‌سازی مسیر ربات‌های نرم در محیط‌های پرمناغ می‌پردازد.

تانگ (Tang) و همکاران [۱۶] در یک بررسی جامع، الگوریتم‌های مسیریابی مرسوم را تحلیل کرده و دریافته‌اند که مسیرهای تولیدشده توسط روش‌های کلاسیک نظیر دیکسترا و A*، اگرچه کوتاه‌ترین مسیر را می‌یابند، اما از همواری کافی برخوردار نبوده و نیازمند پس‌پردازش با توابع هندسی مانند منحنی‌های بزیه، چندجمله‌ای و بی-اسپلاین هستند تا مسیرهایی پیوسته با کاهش زوایای تند حاصل شود.

احمد (Ahmad) و آب و هاب (Ab Wahab) [۱۷] چارچوبی تلفیقی با نام تخصیص پویای نقاط راه و منحنی‌های بزیه مکعبی قطعه‌ای (DWAPCBC) ارائه کرده‌اند. در این روش، ابتدا مسیر اولیه‌ای توسط الگوریتم دیکسترا تولید شده، سپس با تخصیص تطبیقی نقاط راه بر اساس پیچیدگی محیط، مسیر

را در آن قلمرو نیز به کار بندند، لیکن اعتبارسنجی نهایی این تعمیم، پژوهش‌های مستقل را طلب می‌کند که خارج از گستره تحقیق کنونی تعریف می‌شود. در این مدل‌سازی، به منظور فراهم آوردن بستری برای مقایسه علمی معتبر، تأکید صرفاً بر سنجش کارایی الگوریتم‌ها در کشف مسیر در محیط‌های ایستا معطوف شده است. بر این مبنا، برای کاهش پیچیدگی‌های زائد مدل، موانع به گونه‌ای ثابت تعریف و به کار گرفته شده‌اند. اتخاذ این رویکرد با این استدلال همراه است که در شرایط پایدار، حرکت و جابه‌جایی موانع تأثیری بر نتایج مقایسه عملکرد الگوریتم‌ها از منظر انتخاب مسیر بهینه نخواهد داشت. برای تضمین تکرارپذیری (Reproducibility) و اعتبارسنجی فنی نتایج، تمامی الگوریتم‌های مسیریابی مطالعه‌شده به صورت کامل در بستر برنامه‌نویسی پایتون پیاده‌سازی و اجرا شدند. عملیات شبیه‌سازی بر روی سامانه محاسباتی با مشخصات سخت‌افزاری معین شامل پردازنده Intel Core i3 با بسامد ۲/۴ گیگاهرتز و حافظه دسترسی تصادفی ۱۲ گیگابایت انجام پذیرفت. به منظور حصول اعتبار در مقایسه‌های زمانی، زمان اجرای ثبت شده صرفاً به هسته منطق جست‌وجوی الگوریتم منحصر شد؛ از این رو، هرگونه سربار محاسباتی ناشی از مصورسازی گرافیکی خروجی‌ها از فرایند زمان‌بندی نهایی حذف شد. افزون بر این، موقعیت شبکه و موانع در هر بار اجرای الگوریتم ثابت نگاه داشته شد. این تمهید فنی تضمین می‌کند که هر دو الگوریتم تحت بررسی، در هر تکرار، با چالش محیطی یکسان مواجه شده‌اند که خود تأمین‌کننده مقایسه منصفانه و علمی به شمار می‌آید.

در شکل ۱، محیط با ۲۵۰ مانع و محل قرارگیری نقطه شروع مسیر و محل مقصد نمایش داده شده است. برای ایجاد بستر گسسته و کارآمد در شبیه‌سازی مسیریابی، محیط مستطیلی به شبکه‌ای از سلول‌های مربعی با ابعاد دو متر در دو متر تقسیم شد. این تقسیم‌بندی به تولید ۱۲۰ ستون در طول و ۶۰ ردیف در عرض انجامید که مجموعاً ۷۲۰۰ سلول را



شکل ۱: محیط کلی شبیه‌سازی با ۲۵۰ مانع.

بازبینی و توسط منحنی‌های بزیه مکعبی هموار می‌شود. نتایج تجربی نشان می‌دهد که این رویکرد در مقایسه با روش‌های سنتی هموارسازی نظیر بی-اسپلاین، مسیریابی با ۷۹ درصد فاصله ایمن‌تر از موانع و ۳۲ درصد همواری بیشتر تولید می‌کند و برای ناوبری ایمن ربات‌های متحرک در محیط‌های ایستای شلوغ بسیار مناسب است.

شکل (Şelek) و سدر (Seder) [۱۸] روشی هموار برای برنامه‌ریزی حرکت ربات‌های متحرک غیرهولونومیک در محیط‌های پویا ارائه کرده‌اند که از دو بخش اصلی تشکیل شده است: یک برنامه‌ریز مسیر و یک برنامه‌ریز مسیر حرکتی. این روش مسیرهایی پیوسته، بدون برخورد و نزدیک به زمان بهینه تولید می‌کند و با بهره‌گیری از قاعده نسبت طلایی، هم‌راستایی جهت ربات را بدون نیاز به چرخش درجا انجام می‌دهد. نتایج پیاده‌سازی روی ربات Husky نشان‌دهنده کاهش طول مسیر، زمان سفر و زمان برنامه‌ریزی مسیر نسبت به روش‌های مشابه است.

روش شبیه‌سازی

در مطالعه‌ی حاضر، شبیه‌سازی فرایند تعیین مسیر ربات متحرک از طریق زبان برنامه‌نویسی پایتون انجام شده است. محیط شبیه‌سازی به شکل مستطیلی تعریف شده است که ابعاد آن در طول ۲۴۰ متر و در عرض ۱۲۰ متر است. درون این محیط، مجموعه‌ای از موانع به صورت تصادفی توزیع شده‌اند و به منظور مطالعه و بررسی بهتر اثرگذاری شرایط، تراکم آن‌ها در سناریوهای مختلف از ۲۵۰ تا ۱۰۰۰ مانع متغیر در نظر گرفته شده است. برای آن‌که الگوی توزیع موانع در اجراهای مکرر شبیه‌سازی دستخوش تغییر نشود، از یک دانه تصادفی ثابت (Random Seed) بهره گرفته شد. مبدأ حرکت ربات در گوشه فوقانی-چپ و به مختصات (۰، ۶۰) تعبیه شده است که با مربعی به رنگ سبز و نقطه هدف نیز در گوشه تحتانی-راست و مختصات (۱۲۰، ۰) قرار داده شده و با مربعی قرمز رنگ مشخص می‌شود. از آن‌رو که پردازش‌های فضایی در محیط‌های سه‌بعدی بار محاسباتی قابل‌توجهی را بر منابع سخت‌افزاری تحمیل کرده و مستلزم صرف زمان اجرایی چشمگیری است و با تلفات به هدف کانونی مطالعه حاضر که بر ارزیابی تطبیقی الگوریتم‌های مسیریابی متمرکز است، بستر دوبعدی برای مدل‌سازی برگزیده شد. این گزینش، امکان تمرکز کامل بر هسته اصلی پژوهش را فراهم می‌آورد. اگرچه بخش عمده الگوریتم‌های نوین ناوبری که در فضای دوبعدی و در مجاورت موانع عمل می‌کنند، قابلیت تعمیم به محیط سه‌بعدی را دارا بوده و می‌توانند مبانی خود

به تمامی گره‌های دیگر در گراف‌های وزن‌دار با اوزان نامنفی است. در این الگوریتم، اولویت بسط گره‌ها تنها بر اساس هزینه تجمعی واقعی طی شده از مبدأ تا آن گره تعیین می‌شود. هنگامی که الگوریتم از گره جاری u به همسایه v حرکت می‌کند، هزینه جدید برای گره v به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$g_{\text{new}}(v) = g(u) + w(u, v)$$

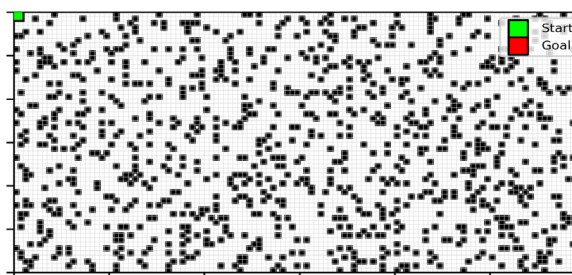
در این رابطه، $g(u)$ هزینه تجمعی از مبدأ تا گره u ، $w(u, v)$ وزن یال میان u و v و $g_{\text{new}}(v)$ هزینه پیشنهادی برای رسیدن به گره v است. چنانچه $g_{\text{new}}(v)$ از مقدار ذخیره شده پیشین $g(v)$ کمتر باشد، مسیر آن گره به روزرسانی می‌شود. در پیاده‌سازی حاضر، وزن تمامی یال‌ها برابر با اندازه هر سلول (۲ متر) منظور شده و الگوریتم فاقد هرگونه مؤلفه هیوریستیک است؛ بنابراین صف اولویت صرفاً بر اساس $g(n)$ مرتب می‌شود [۱۹].

الگوریتم A^* که توسط هارت، نیلسون و رافائل ارائه شد، توسعه یافته الگوریتم دیکسترا با افزودن یک تابع هیوریستیک برای هدایت جست‌وجو به سمت هدف است. در این الگوریتم، ترتیب بسط گره‌ها بر اساس تابع ارزیابی زیر تعیین می‌شود:

$$f(n) = g(n) + h(n)$$

در این عبارت، $f(n)$ اولویت کلی گره n را مشخص می‌سازد. مؤلفه $g(n)$ همان هزینه واقعی پیموده شده از مبدأ تا گره n و $h(n)$ برآوردی هیوریستیک از هزینه باقی‌مانده از گره n تا هدف است. تابع هیوریستیک در این پژوهش، بر مبنای فاصله منتهی انتخاب شده که برای حرکات محدود به چهار جهت اصلی در شبکه، برآوردی بهینه محسوب می‌شود [۲۰]. شرط $h(n) \leq h^*(n)$ تضمین کرده و در نتیجه الگوریتم A^* نیز کوتاه‌ترین مسیر را با تعداد گره‌های بسط یافته کمتر نسبت به دیکسترا می‌یابد.

در کاربردهای عملی رباتیک، کیفیت هر مسیر صرفاً به یافتن بودن آن محدود نمی‌شود؛ بلکه مشخصه‌هایی نظیر طول مسیر و هزینه صرف شده برای محاسبه آن، هر یک به نوبه خود بر کارایی کلی سامانه اثر می‌گذارند. طول مسیر مستقیماً با زمان پیمایش و میزان انرژی مصرفی ربات نسبت مستقیم دارد و افزایش آن، به‌ویژه در مأموریت‌های طولانی مدت یا منابع انرژی محدود، می‌تواند چالش‌آفرین باشد. از سوی دیگر، هزینه محاسباتی الگوریتم که در دو شاخص تعداد گره‌های کاوش شده



شکل ۲: محیط کلی شبیه‌سازی با ۱۰۰۰ مانع.

برای مدل‌سازی و جست‌وجوی مسیر فراهم آورد. در شکل ۲، با افزایش تعداد موانع به ۱۰۰۰ عدد در محیط، مسیرهای صاف و کم شکست تقریباً بسته شده‌اند و الگوریتم برای یافتن مسیر تا نقطه هدف مجبور به یافتن مسیرهای پر شکست است.

در طراحی سناریوهای شبیه‌سازی، شرط عدم همپوشانی موانع با موقعیت‌های مبدأ و مقصد به عنوان محدودیت بنیادین اعمال شد؛ به نحوی که هیچ مانعی اجازه نیافت در همسایگی بی‌واسطه سلول‌های شروع و هدف قرار گیرد. این شرط، مسدود نبودن مسیر در گام نخست جست‌وجو را تضمین کرده است.

به منظور انطباق با ابعاد فیزیکی ربات که سطحی معادل چهار سلول (دو سلول در طول و دو سلول در عرض) را پوشش می‌دهد، این تابع وضعیت هر گره را پیش از ورود به فرایند جست‌وجو اعتبارسنجی می‌کند. این تابع، چهار خانه شامل خود گره، همسایه چپ، همسایه زیرین و همسایه مورب پایین-چپ را بررسی می‌کند و در صورت وجود مانع در هر یک از این موقعیت‌ها، گره مورد نظر را ممنوعه اعلام می‌دارد. چنین سازوکاری، ضمن رعایت حریم ایمنی پیرامون موانع، از عبور بدنه ربات از مجاورت خطرناک جلوگیری به عمل می‌آورد.

مسیریابی

پس از مدل‌سازی محیط و تعریف موانع، گام بعدی یافتن مسیری پیوسته، ایمن و کوتاه‌ترین میان نقطه مبدأ و هدف در شبکه مفروض است. از آنجا که شبکه از یال‌هایی با وزن یکسان تشکیل شده، مسئله به جست‌وجوی کوتاه‌ترین مسیر در گرافی وزن‌دار تقلیل می‌یابد. بدین منظور، دو الگوریتم برجسته و کلاسیک، یعنی دیکسترا و A^* ، در محیط برنامه پیاده‌سازی و کارایی آن‌ها به صورت تطبیقی تحلیل شده است. در ادامه، سازوکار هر یک تشریح می‌شود.

الگوریتم دیکسترا که نخستین بار توسط ادسخر دیکسترا معرفی شد، روشی سیستماتیک برای یافتن کوتاه‌ترین مسیر از گره مبدأ

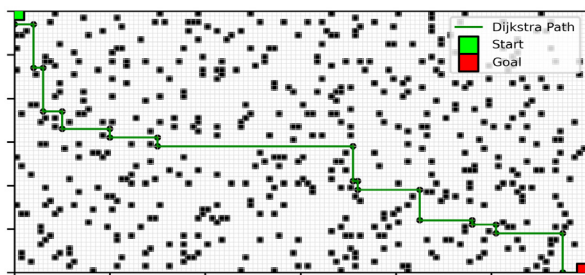
فرایند شناسایی بدین ترتیب صورت می‌پذیرد که تمام گره‌های میانی مسیر یعنی همه گره‌ها به جز مبدأ و مقصد یک به یک پیمایش می‌شوند. برای هر گره میانی، دو پاره‌خط جهتی تعریف می‌شود: یکی از گره پیشین به گره جاری و دیگری از گره جاری به گره پسین. چنانچه این دو پاره‌خط هم‌جهت باشند، به این معناست که ربات در آن نقطه تغییر راستا نداشته و مسیر کماکان مستقیم ادامه یافته است. در مقابل، اگر دو پاره‌خط مزبور زاویه‌ای غیرصفر با هم بسازند که در شبکه چهارجهته منحصراً نود درجه خواهد بود، آن گره به‌عنوان یک نقطه پیچ علامت‌گذاری می‌شود. بدیهی است که این ارزیابی نیازی به محاسبه زاویه نداشته و صرفاً با مقایسه مقادیر مؤلفه‌های بردارهای جابه‌جایی قابل انجام است؛ اگر مؤلفه‌های دو بردار یکسان نباشند، پیچ رخ داده است. این روش سبک‌بار، یک گذر و با مرتبه زمانی خطی نسبت به طول مسیر عمل می‌کند. شیوه شناسایی پیچ‌های نود درجه توصیف‌شده در این بخش، به‌دلیل سادگی، عدم وابستگی به مقیاس شبکه و قابلیت پیاده‌سازی سریع، می‌تواند به‌عنوان روش استاندارد در پژوهش‌های آتی نیز مورد استناد قرار گیرد. با افزایش تعداد موانع، احتمال به‌وجود آمدن نقاط شکست نیز افزایش می‌یابد، که در شکل ۴ نقاط شکست به‌صورت دایره‌ای شکل در مسیر پیشنهادی برای تعداد ۵۰۰ مانع نشان داده شده است.

با اتمام این فرایند پیمایش، شمار نهایی گره‌هایی که در آن‌ها تغییر جهت رخ داده است، به‌عنوان پارامتر تعداد کل پیچ‌ها مستخرج می‌شود. اهمیت این عدد صرفاً در گزارش یک کمیت آماری خلاصه نمی‌شود، بلکه ضرورت آن از دو منظر کاملاً متمایز و حیاتی ناشی می‌شود. نخست آن‌که این عدد، مبنای کمی و تنها ورودی لازم در این پژوهش برای محاسبه افزایش طول مسیر پس از فرایند هموارسازی است؛ بدون در دست داشتن این پارامتر، امکان تخمین هزینه هندسی هموارسازی به هیچ وجه میسر نخواهد بود. دوم آن‌که این عدد به‌خودی‌خود مقیاسی مستقیم از ناهمواری و گسستگی‌های مسیر صلب اولیه

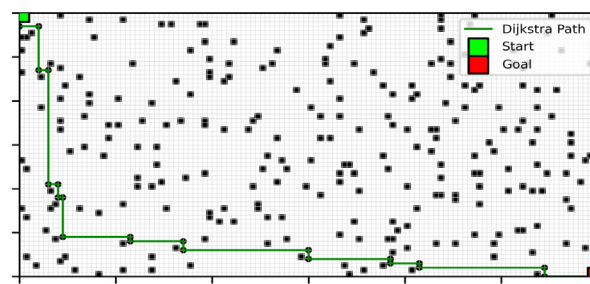
و زمان اجرا تبلور می‌یابد، تعیین‌کننده سرعت واکنش سامانه به تغییرات محیطی و امکان به‌کارگیری آن در شرایط بی‌درنگ است. الگوریتمی که گره‌های کمتری را بسط می‌دهد، حافظه کمتری مصرف نموده و در سخت‌افزارهای نه‌چندان قدرتمند نیز می‌تواند در بازه زمانی معقول به جواب برسد.

بر این مبنای دو الگوریتم دیکسترا و A^* از هر دو منظر مورد ارزیابی قرار گرفتند. از حیث طول مسیر، به‌دلیل ثابت بودن وزن یال‌ها و کامل بودن هر دو الگوریتم، راه‌حل نهایی در تمامی سناریوها یکسان به‌دست خواهد آمد. بنابراین، وجه افتراق اصلی به هزینه محاسباتی معطوف شد. برای زدودن اثر نوسانات آنی سامانه از داده‌های زمانی، هر سناریو ۲۰۰ مرتبه اجرا شد و با بهره‌گیری از معیار انحراف معیار، مقادیر پرت شناسایی و کنار گذاشته شدند. با حذف مشاهدات واقع در فاصله‌ای فراتر از انحراف معیار از میانگین، مقادیر برآمده از اغتشاشات لحظه‌ای سامانه از مجموعه داده‌های تحلیلی زدوده شده تا میانگین‌های نهایی، قابل اتکا از عملکرد ذاتی الگوریتم‌ها باشند. در شکل ۳، کوتاه‌ترین مسیر توسط الگوریتم دیکسترا برای حالت ۲۵۰ مانع در محیط مستطیلی نمایش داده شده است.

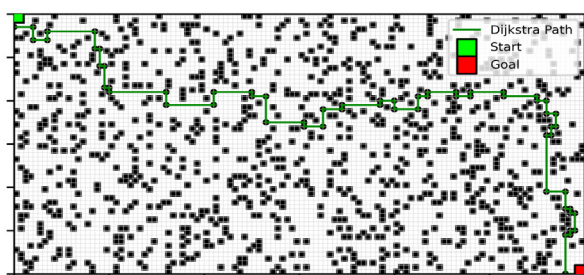
حرکت ربات در محیط شبکه‌ای، محدود به چهار جهت اصلی و گام‌هایی به طول ثابت یک سلول است. از این رو، مسیر صلب حاصل از الگوریتم، مجموعه‌ای از گره‌های متوالی است که هر سه گره پشت‌سرهم، یا بر روی یک خط راست قرار دارند یا زاویه قائمه می‌سازند. در حالت نخست، ربات مسیری مستقیم را می‌پیماید و در حالت دوم، ناگزیر از تغییر جهت ناگهانی به اندازه نود درجه خواهد بود. اگرچه چنین مسیری برای برخی ربات‌های ساده قابل اجراست، اما برای ربات‌های نرم که حرکت آن‌ها ذاتاً مستلزم انحنای پیوسته و بدون گسستگی است، عبور از این گوشه‌های تیز مستلزم توقف و چرخش درجا بوده که خود افزایش زمان پیمایش، مصرف انرژی بیشتر، استهلاک قطعات مکانیکی و ناپایداری ساختار شکل‌پذیر را در پی دارد. بنابراین، گام نخست در تبدیل این مسیر صلب به مسیری هموار، شناسایی دقیق همین نقاط چرخش است.



شکل ۴: نمایش مسیر و نقاط شکست برای حالت ۵۰۰ مانع در محیط شبیه‌سازی.



شکل ۳: مسیریابی الگوریتم دیکسترا در حالت ۲۵۰ مانع در محیط.



شکل ۵ نقاط شکست و مسیر اصلی در محیط شبیه‌سازی برای حالت ۱۰۰۰ مانع.

اشاره شد ربات‌های نرم که عموماً از جنس پلیمرهای الاستومری یا سیلیکون‌ها ساخته می‌شوند، فاقد مفاصل صلب و محورهای چرخش گسسته هستند و تغییر شکل آن‌ها به‌طور ذاتی به‌صورت خمش‌های تدریجی با انحنای پیوسته رخ می‌دهد. اعمال تغییر جهت ناگهانی نود درجه بر پیکره چنین رباتی، مستلزم تمرکز موضعی تنش، ناپایداری ساختاری و حتی گسیختگی ماده نرم خواهد بود. بر همین اساس، ضرورت می‌یابد که هر یک از گوشه‌های تیز مسیر با یک خم پیوسته جایگزین شود تا سازگاری کامل با دینامیک سازه‌ای ربات‌های نرم برقرار شود. در این پژوهش، برای تحقق این مقصود، از قوس‌های دایره‌ای به‌عنوان جایگزین پیچ‌های نود درجه و از منحنی‌های بزیه برای مصورسازی بصری مسیر نرم‌شده استفاده شده است. فرایند نرم‌سازی با این منطق پایه‌ای صورت می‌پذیرد که در هر نقطه‌ای که مسیر صلب دچار تغییر جهت نود درجه شده، کمان دایره‌ای به شعاع R جانشین دو پاره‌خط متعامد می‌شود. هندسه این جایگزینی به این ترتیب است که گویی ربات به‌جای آن‌که تا گوشه تیز پیش برود، از فاصله معینی پیش از آن شروع به چرخش کرده و پس از طی یک ربع دایره، بر روی مسیر بعدی خروج می‌یابد. شعاع R در این سازوکار، نماینده قابلیت خم‌شوندگی ربات نرم پلیمری تلقی می‌شود: هر چه شعاع کمتر باشد، ربات توانایی انجام خم‌های تندتر را داراست که این ویژگی مستقیماً با جنس ماده سازنده و ساختار مورفولوژیک بدنه نرم مرتبط است. پلیمرهای حافظه‌دار، الاستومرهای ناهمسانگرد، هریک حداقل شعاع خمش متفاوتی را مجاز می‌شمارند.

یکی از پیامدهای این جایگزینی، افزایش طول مسیر نسبت به مسیر صلب اولیه است. طول کمان دایره‌ای با زاویه نود درجه برابر با نصف حاصل ضرب عدد پی در شعاع R است. در مقابل، مسیر صلب در همان ناحیه، دو قطعه مستقیم را شامل می‌شود که مجموع طول آن‌ها عددی ثابت و معادل دو برابر پهنای سلول است. اختلاف میان این دو مقدار، افزایش خالص طول در هر پیچ را رقم می‌زند. بر اساس محاسبات تحلیلی، این افزایش

به دست می‌دهد و هرچه بزرگ‌تر باشد، نشان‌دهنده مسیری با چرخش‌های بیشتر و در نتیجه نامطلوب‌تر برای ربات‌های با قید سینماتیکی است.

با این وصف، تکیه صرف بر تعداد مطلق پیچ‌ها نمی‌تواند برای مقایسه ساختاری میان مسیرهایی با طول‌های متفاوت کافی باشد. چه‌بسا مسیری بلند با پیچ‌های پراکنده، تعداد پیچی برابر با مسیری کوتاه اما متراکم از چرخش داشته باشد، حال آن‌که ماهیت این دو مسیر کاملاً متمایز است. برای پر کردن این خلأ تحلیلی و ایجاد بستری برای مقایسه عادلانه میان سناریوهای گوناگون، دو شاخص ثانویه از ویژگی تعداد پیچ استخراج شده است.

نخستین شاخص تحت عنوان پیچیدگی مسیر (Path Complexity) تعریف می‌شود که حاصل تقسیم تعداد پیچ‌ها بر شمار کل سلول‌های پیموده شده است. این شاخص، تراکم چرخش‌ها را در کسری از طول مسیر نمایان ساخته و مفهوم پیچیدگی را مستقل از مقیاس طولی مسیر بیان می‌دارد. هرچه این نسبت بزرگ‌تر باشد، به معنای آن است که مسیر در ازای هر واحد پیمایش، دستخوش چرخش‌های بیشتری شده است.

دومین شاخص، همواری مسیر (Path Smoothness) نام گرفته است. تعریف این شاخص، با مفهوم متداول نرمی در ادبیات برنامه‌ریزی مسیر هم‌سو است؛ مفهومی که در آن، معیار کمی نرمی مسیر عموماً از طریق وارون تعداد تغییر جهات یا میزان انحنای مسیر حاصل می‌شود [۲۱]. برای محاسبه آن، یک واحد به تعداد کل پیچ‌ها افزوده و سپس عدد یک بر این مجموع تقسیم می‌شود. این ساختار سبب می‌شود که مسیر کاملاً مستقیم و فاقد هرگونه پیچ، به بیشینه مقدار یعنی یک دست یابد و با افزایش تدریجی چرخش‌های نود درجه، این شاخص به سمت صفر نزول کند. مزیت این شاخص در آن است که سطح همواری مسیر را در بازه‌ای بسته و قابل مقایسه میان سناریوهایی با پیچیدگی‌های متفاوت کمی‌سازی می‌کند. همان‌گونه که در شکل ۵ نمایان است، در سناریوی با ۱۰۰۰ مانع، مسیر به‌دلیلی وجود موانع زیاد مجبور به عبور از مسیرهای باریک‌تر و شکست بیشتر مسیر اصلی شود.

در ربات‌های نرم پلیمری، حرکت پیوسته و انعطاف‌پذیر، مستلزم مسیرهایی با انحنای ملایم و بدون تغییر شکل‌های ناگهانی است؛ از این رو، گوشه‌های تند مسیر صلب می‌بایست با کمان‌هایی هموار جایگزین شوند تا سازگاری کامل با دینامیک پیوسته و ساختار شکل‌پذیر این ربات‌ها حاصل شود.

مسیر صلب حاصله از الگوریتم‌های جست‌وجو، باوجود برخورداری از کوتاه‌ترین طول ممکن، برای ربات‌های نرم با بدنه انعطاف‌پذیر و حرکت پیوسته مناسب نیست. همان‌طور که

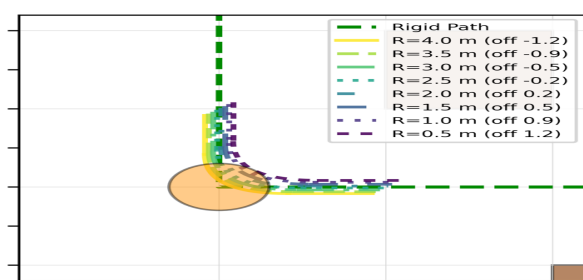
از منحنی‌ها به اندازه اندکی در جهت عمود بر نیمساز زاویه پیچ جابه‌جا شده‌اند. این جابه‌جایی که با محاسبه بردار نیمساز و استخراج راستای عمود بر آن صورت می‌پذیرد، صرفاً یک تدبیر نمایشی است و تأثیری بر محاسبات طول، ارزیابی فاصله از مانع یا دیگر سنج‌های کمی ندارد. بدین‌سان، تمامی مسیرهای نرم‌شده به صورت دسته‌ای از کمان‌های رنگی متمایز و بدون هم‌پوشانی در کنار مسیر صلب اصلی قابل رویت می‌شوند و بیننده می‌تواند اثر کاهش شعاع خمش را در کوتاه‌تر شدن کمان‌ها و نزدیک‌تر شدن مسیر به مسیر صلب مستقیماً مشاهده کند که در شکل ۶ نمایش یافته است.

برای آن‌که اثر شعاع خمش R بر کیفیت مسیر نرم‌شده به شکل نظام‌مند ارزیابی شود، سه سنج مستقل تعریف و در تمامی سناریوها محاسبه شده است. انتخاب این سه معیار با التفات به ماهیت ربات‌های نرم صورت پذیرفته است.

نخستین سنج به عنوان نسبت بازده خمش (BER) معرفی می‌شود. ضرورت تعریف این شاخص از آن‌جا ناشی می‌شود که هر ربات نرم با بدنه پلیمری، بسته به جنس پلیمر سازنده و ساختار مورفولوژیک خود، آستانه‌ای برای حداقل شعاع خمش قابل تحمل دارد و نمی‌توان از آن انتظار چرخش‌های بی‌نهایت تند را داشت. شاخص نشان می‌دهد که شعاع خمش مشخص، چه کسری از توانایی خمشی بالقوه ربات را به کار می‌گیرد.

$$BER = 1$$

دومین سنج به عنوان نسبت کارایی (ER) تعریف شده است. در فرایند نرم‌سازی، همواره مصالح‌های میان دو هدف متعارض برقرار می‌شود: از یک سو میل به افزایش شعاع خمش برای کاهش تنش و هموارسازی مسیر وجود دارد و از سوی دیگر، افزایش طول ناشی از بزرگ‌شدن R می‌تواند زمان مأموریت و مصرف انرژی را بالا ببرد. این نسبت از تقسیم BER بر افزایش طول نسبی مسیر حاصل می‌شود. تعیین مقدار ۵ متر برای بیشینه شعاع خمش، برخاسته از ابعاد 4×4 متری ربات



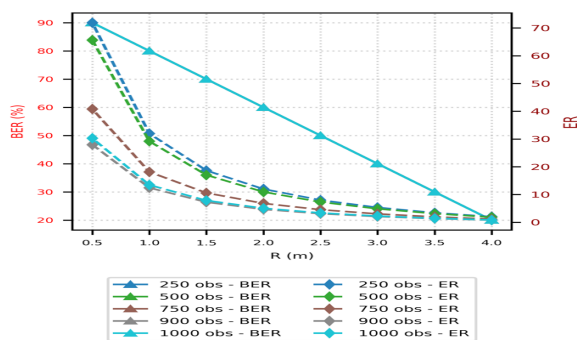
شکل ۶ نمایش انواع شعاع خمش مسیر در یکی از نقاط شکست.

برای هر پیچ منفرد نود درجه دقیقاً برابر با حاصل R در ضریب ثابتی بالغ بر 0.429 به دست آمده است. این ضریب از کسر نصف عدد پی از عدد دو حاصل می‌شود و بازتاب‌دهنده آن است که چه میزان مسافت اضافی به علت پیروی از انحنا به مسیر تحمیل می‌شود. بدین ترتیب، طول کلی مسیر نرم‌شده از رابطه ساده مجموع طول صلب اولیه با حاصل ضرب تعداد پیچ‌ها در R در ضریب 0.429 قابل محاسبه خواهد بود. اهمیت این رابطه خطی در آن است که بدون نیاز به شبیه‌سازی مجدد و صرفاً با دانستن تعداد پیچ‌های مسیر، می‌توان طول نهایی را برای هر شعاع خمش دلخواه پیش‌بینی کرد.

دامنه مقادیر برگزیده برای شعاع خمش در این مطالعه، بازه 0.5 تا 4 متر را در بر می‌گیرد. کران پایین این بازه، تقریباً معادل یک‌چهارم اندازه هر مانع انتخاب شده است و کمینه شعاعی را بازنمایی می‌کند که در آن ربات پلیمری نرم همچنان قادر به گردش ایمن بدون برخورد با لبه‌های مانع است. کران بالای 4 متر نیز دقیقاً برابر با بزرگ‌ترین بعد ربات در نظر گرفته شده است. در دینامیک ربات‌های نرم، چرخش با شعاعی معادل طول مشخصه بدنه، مانور سازگار و کم‌تنش تلقی می‌شود که از تمرکز موضعی کرنش جلوگیری کرده و ایمنی سازه‌ای را تأمین می‌کند. همچنین این شعاع به گونه‌ای انتخاب شده که حتی در عریض‌ترین دالان‌های عبوری (حدود 8 متر) کمان‌های نرم‌شده از محدوده فضای آزاد خارج نشوند. بدین ترتیب، این بازه طیفی پیوسته از چابک‌ترین تا ایمن‌ترین رفتار حرکتی ربات نرم با بدنه پلیمری را پیش روی تحلیل قرار می‌دهد.

شایان ذکر است که محاسبه تحلیلی افزایش طول در این مطالعه، کاملاً مستقل از بازنمایی بصری مسیرها صورت پذیرفته است. برای مصورسازی، از رویکردی مجزا بهره گرفته شده که در آن، هر گوشه با یک منحنی درجه دوم بزیه جایگزین می‌شود. در این شیوه، سه نقطه کنترل برای هر منحنی تعریف می‌شود: نقطه آغازین بر روی میانه پاره‌خط ورودی به پیچ قرار می‌گیرد، نقطه پایانی بر روی میانه پاره‌خط خروجی از پیچ واقع می‌شود، و نقطه کنترل میانی نیز همان گره گوشه صلب انتخاب می‌شود. این ساختار سه نقطه‌ای، منحنی را وامی‌دارد که از گوشه عبور کرده و دو قطعه مستقیم مجاور را با یک کمان نرم به هم پیوند دهد. اگرچه شکل حاصله لزوماً بر یک دایره به شعاع R منطبق نیست، اما پیوستگی بصری مطلوب و مماس بودن بر امتداد قطعات مستقیم در نقاط اتصال را تأمین می‌کند که برای نمایش کیفی اثر نرم‌سازی کفایت می‌کند.

افزون بر این، برای آن‌که امکان مقایسه بصری مسیرهای متناظر با شعاع‌های گوناگون در یک نمودار واحد فراهم آید، هریک



شکل ۸ نسبت بازده خمس و نسبت کارایی بر حسب تغییرات شعاع برای انواع موانع.

افزایش طول نسبت به مسیر صلب، بر حسب شعاع خمس برای سناریوهای ۲۵۰ تا ۱۰۰۰ مانع در قالب دو محور عمودی مجزا رسم شده است.

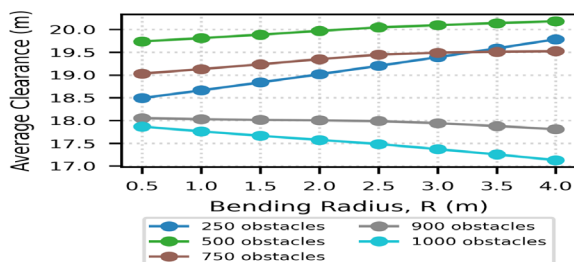
در شکل ۸، نسبت بازده خمس BER و نسبت کارایی ER بر حسب R نمایش داده شده‌اند که در آن منحنی BER برای همه سناریوها یکسان و منحنی‌های ER به‌ازای پنج تراکم مختلف و در شکل ۹، میانگین فاصله نقاط قوس‌های نرم‌شده از نزدیک‌ترین مانع برای سناریوهای ۲۵۰ تا ۱۰۰۰ مانع بر حسب شعاع به تصویر کشیده شده است.

در شکل ۱۰، میانگین زمان اجرا و انحراف معیار هر دو الگوریتم بر حسب تعداد موانع در دو محور عمودی جداگانه مقایسه شده و چهار منحنی مجزا برای هر یک از این کمیت‌ها رسم شده است.

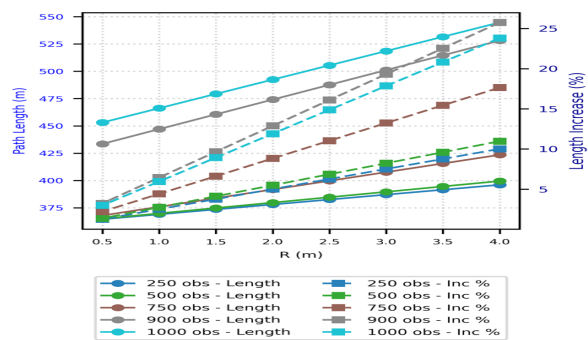
در شکل ۱۱، شاخص همواری مسیر (PS) و شاخص پیچیدگی مسیر (PC) بر حسب تعداد موانع ارائه شده است.

نتیجه‌گیری

این مطالعه با مدل‌سازی محیط شبکه‌ای تصادفی و جایگزینی هر پیچ نود درجه با کمان دایره‌ای به شعاع R، تأثیر این شعاع را



شکل ۹ میانگین فاصله قوس‌های نرم‌شده از نزدیک‌ترین مانع بر حسب تغییرات شعاع برای انواع موانع.



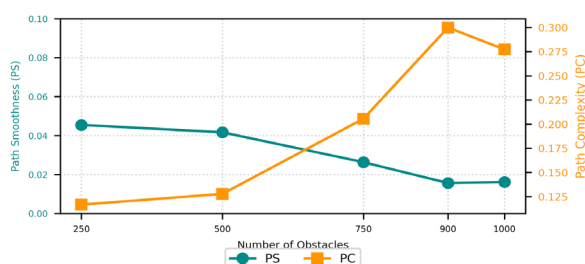
شکل ۷ طول مسیر نرم‌شده و درصد افزایش طول برای انواع شعاع در تعداد موانع مختلف.

پلیمری نرم است؛ شعاعی بزرگ‌تر از این کرانه، خمس را به حرکتی شبه‌خطی بدل کرده و مفهوم نرم‌سازی را منتفی می‌سازد. افزون‌بر آن، این مقدار با عرض دالان‌های عبوری (۴ تا ۸ متر) نیز سازگار بوده و تضمین می‌کند کمان‌های نرم‌شده در تمامی سناریوها از محدوده فضای آزاد خارج نشوند. بدین ترتیب، ۵ متر مرز بالایی معقولی است که هم‌زمان با مشخصه‌های هندسی ربات و توپولوژی محیط هم‌خوانی دارد.

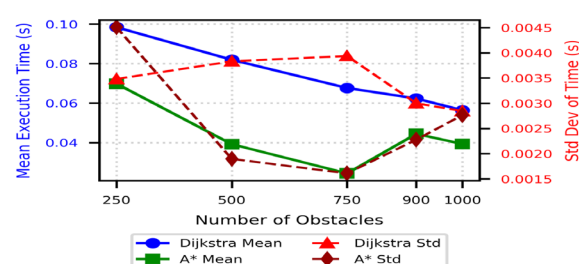
وجود سازوکاری برای ارزیابی ریسک و تضمین فاصله ایمن از موانع، از الزامات در ناوبری ربات‌های متحرک است. در رویکردهای اولیه نیز ریسک، به‌طور معمول، تابعی از حداقل فاصله تا مانع تعریف می‌شد [۲۲]. بنابراین، برگزیدن شاخص ایمنی از موانع (Clearance) به منزله معیار سوم، انتخابی است که با چارچوب‌های تثبیت‌شده ارزیابی ریسک انطباق کامل دارد. ربات‌های نرم به‌دلیل بدنه انعطاف‌پذیر، بیش از ربات‌های صلب در معرض خطر برخورد با موانع قرار دارند؛ از این رو، تضمین حفظ حاشیه امن در طول مسیر اهمیتی مضاعف می‌یابد. برای محاسبه این سنجه، در هر پیچ مسیر صلب، کماتی دایره‌ای به شعاع R مفروض و هجده نقطه با توزیع یکنواخت روی آن نمونه‌برداری می‌شود. سپس برای هر یک از این نقاط، فاصله اقلیدسی تا مرکز نزدیک‌ترین سلول مانع اندازه‌گیری و میانگین این فواصل به‌عنوان نماینده فاصله ایمن آن کمان ثبت می‌شود. با میانگین‌گیری از تمامی پیچ‌های مسیر، مقدار واحد برای هر R به‌دست می‌آید که نشان می‌دهد مسیر نرم‌شده به‌طور میانگین چه اندازه از موانع فاصله دارد.

نتایج

پس از اجرای کامل الگوریتم‌ها، یافتن مسیرهای مناسب و محاسبه کامل شاخص‌ها امکان مقایسه بهتر ویژگی‌های مختلف ربات فراهم می‌شود. در شکل ۷، طول مسیر نرم‌شده و درصد



شکل ۱۱ شاخص همواری مسیر و شاخص پیچیدگی مسیر بر حسب تعداد موانع.



شکل ۱۰ میانگین زمان اجرا و انحراف از معیار الگوریتم‌ها بر حسب تعداد موانع.

شلوغ، انتخاب شعاع بزرگ‌تر از دو متر توجیه اقتصادی (هزینه طولی) ندارد مگر آن‌که الزام سینماتیکی ربات نرم پلیمری چنین حکمی کند.

در شکل ۹، داده‌های Clearance نشان می‌دهند که این سنجه ایمنی با کاهش شعاع خمش در هر سناریو به‌طور ملایمی کم می‌شود؛ برای مثال در سناریوی ۱۰۰۰ مانع، از ۱۷/۸۷ متر در شعاع نیم متر به ۱۷/۱۳ متر در شعاع چهار متر می‌رسد که کاهشی حدود ۰/۷۴ متر را نشان می‌دهد. با این حال، عامل اصلی تعیین‌کننده حاشیه ایمنی، تراکم موانع است، نه شعاع خمش. گواه این مدعا آن‌که از ۱۹/۷۹ متر در سناریوی ۲۵۰ مانع در شعاع ۴ متر به ۱۷/۱۳ متر در سناریوی ۱۰۰۰ مانع در شعاع ۴ متر افت پیدا می‌کند؛ یعنی ۲/۶۶ متر کاهش که ۱۳ درصد از مقدار اولیه را شامل می‌شود. در مجموع، این یافته اطمینان‌بخش است که حتی در بدترین ترکیب، میانگین فاصله نقاط کمان از موانع حدود ۱۷ متر بوده که برای یک ربات پلیمری نرم ۴×۴ متری فضای مانور بسیار امنی فراهم می‌کند. این نتیجه دلالت بر آن دارد که محدودیت اصلی در انتخاب شعاع، نه خطر برخورد، بلکه هزینه طولی و قابلیت خمشی ربات است.

در شکل ۱۰، برخلاف انتظار اولیه زمان اجرای هر دو الگوریتم با افزایش موانع کاهش یافته است؛ میانگین زمان دیکسترا از ۰/۰۹۸۳۷۳ ثانیه در ۲۵۰ مانع به ۰/۰۵۶۳۷۷ ثانیه در ۱۰۰۰ مانع و برای A* از ۰/۰۶۹۸۲۴ به ۰/۰۳۹۳۱۹ ثانیه رسیده است. این رفتار را می‌توان به کاهش فضای جست‌وجوی مؤثر نسبت داد: موانع بیشتر، گره‌های آزاد کمتری برای پیمایش باقی می‌گذارند و الگوریتم زودتر به نتیجه می‌رسد. با وجود این روند مشابه، A* در تمامی سناریوها برتری محسوسی از خود نشان داده است. برای مثال در سناریوی ۷۵۰ مانع A*، تنها ۳۶ درصد زمان دیکسترا را مصرف کرده است. همچنین انحراف معیار A* عموماً پایین‌تر از دیکسترا بوده که حاکی از پایداری بیشتر آن در برابر تغییرات تصادفی موقعیت موانع است. در سناریوی ۹۰۰ مانع، به‌رغم طول یکسان ۴۴۰ متر، تعداد پیچ‌های دو مسیر

بر طول، ایمنی و بازده خمشی مسیر در تراکم‌های مختلف موانع ارزیابی کند. در شکل ۷، پاسخ طول مسیر نرم‌شده به تغییرات شعاع خمش برای پنج سناریو با تراکم‌های مختلف موانع ترسیم شده است. چنان‌که از مقادیر برمی‌آید، در سناریوی ۲۵۰ مانع (با تنها ۲۱ پیچ) درصد افزایش طول از ۱/۲۵٪ در شعاع نیم متر تا ۱۰/۰۱٪ در شعاع ۴،۰ متر نوسان دارد. این دامنه در سناریوی ۱۰۰۰ مانع (با ۶۱ پیچ) به شدت گسترده‌تر شده و از حدود ۳٪ تا حدود ۲۳٪ می‌رسد. علت این شکاف فزاینده، نه تنها افزایش تعداد پیچ‌ها (از ۲۱ به ۶۱) بلکه افزایش طول صلب از ۳۶۰،۰۰ متر به ۴۴۰،۰۰ متر است؛ چه آن‌که هزینه نسبی نرم‌سازی به ازای هر پیچ ثابت بوده و انباشت آن در مسیرهای بلندتر، درصد افزایش طول را تشدید می‌کند. نگاه دقیق‌تر به مقادیر میانی مثلاً در سناریوی ۷۵۰ مانع نشان می‌دهد که گذار از شعاع ۲ متر به ۲/۵ متر، ۲/۲ واحد درصد به افزایش طول می‌افزاید، درحالی‌که همین گام در سناریوی ۲۵۰ مانع تنها ۱/۲۵ واحد درصد رشد دارد. این حساسیت مضاعف، تأکیدی است بر آن‌که تعیین شعاع خمش در محیط‌های پرمانع باید با وسواس بیشتری انجام پذیرد. در شکل ۸، نسبت بازده خمش از ۹۰٪ در شعاع نیم متر تا ۲۰٪ در شعاع ۴ متر کاهش یافته و کاملاً مستقل از تعداد موانع است. در مقابل، نسبت کارایی که به‌نوعی بهره‌وری خمش را نمایندگی می‌کند، الگویی به‌شدت غیرخطی و وابسته به تراکم موانع از خود نشان می‌دهد. برای نمونه، ER در سناریوی ۲۵۰ مانع از ۷۱/۸۹ در شعاع نیم متر به ۲ در شعاع چهار متر سقوط می‌کند، حال آن‌که در سناریوی ۱۰۰۰ مانع همین بازه از ۳۰/۲۵ به ۰/۸۴ محدود می‌شود. این اعداد آشکار می‌سازند که شعاع‌های کوچک (نیم تا یک متر) در همه سناریوها ER دو رقمی را حفظ کرده و مصالحه‌ای عالی میان نرم‌شدگی و هزینه طولی ارائه می‌دهند، اما با عبور از شعاع دو متر، ER به زیر ۱۰ افت کرده و عملاً افزایش طول بر منفعت خمشی غلبه می‌کند. نکته قابل تأمل آن‌که در سناریوی ۱۰۰۰ مانع، حتی در شعاع دو متر نیز ER تنها ۵/۰۴ است، بدین معنا که در محیط‌های بسیار

ایستاست. تحلیل کمی سناریوهای ۲۵۰ تا ۱۰۰۰ مانع آشکار ساخت که افزایش تراکم موانع، نه تنها بر تعداد پیچ‌های مسیر صلب می‌افزاید، بلکه حساسیت تمامی معیارهای عملکردی به‌ویژه طول و ER را به شعاع خمش تشدید می‌کند. بر پایه داده‌ها، شعاع‌های میانی موازنه پذیرفتنی‌ای میان BER حدود ۵۰ تا ۷۰ درصد، ER (بین ۷ تا ۱۸) و Clearance (بیش از ۱۷ متر) برقرار می‌سازند و می‌توان آن‌ها را به‌عنوان انتخاب‌های پیش‌فرض برای کاربردهای عمومی توصیه کرد. با این حال، انتخاب نهایی شعاع خمش باید بر اساس اولویت‌های مأموریت (حداقل‌سازی زمان پیمایش، بیشینه‌سازی ایمنی، یا مصرف بهینه انرژی) صورت گیرد. همچنین، الگوریتم A* به دلیل زمان اجرای به‌مراتب کمتر و پایداری بالاتر، گزینه‌ای ایده‌آل برای سامانه‌های بی‌درنگ و پلتفرم‌هایی با منابع محاسباتی محدود شناخته شد. در امتداد این پژوهش، جایگزینی کمان‌های دایره‌ای با منحنی‌های واجد پیوستگی مرتبه دوم نظیر اسپلاین‌های مکعبی یا کلوئیدها، بسط مدل به محیط‌های پویا با بازمحاسبه بی‌درنگ مسیر و توسعه یک چارچوب بهینه‌سازی تطبیقی برای تعیین محلی شعاع خمش متناسب با چگالی موانع پیشنهاد می‌شود. اعتبارسنجی تجربی بر روی سکوی رباتیک نرم نیز گام ضروری آتی به‌شمار می‌آید.

۶۱ و ۶۳ گزارش شده است که نشان‌دهنده وجود چندین مسیر بهینه با طول یکسان در گراف است. این پدیده تأکید می‌کند که ارزیابی صرفاً بر مبنای طول مسیر کافی نیست و معیارهایی چون تعداد پیچ و به تبع آن PS و PC برای قضاوت درباره کیفیت مسیر ضروری‌اند.

در شکل ۱۱، با افزایش موانع از ۲۵۰ به ۱۰۰۰، شاخص همواری PS کاهش حدود ۶۵ درصدی و شاخص پیچیدگی PC افزایش حدود ۱۳۸ درصدی به‌همراه دارد. جهش اصلی نه میان ۵۰۰ و ۷۵۰، بلکه در گذار از ۷۵۰ به ۹۰۰ رخ می‌دهد، جایی که شمار پیچ‌ها از ۳۷ به ۶۳ و PC از ۰/۲۰۵۶ به ۰/۳ جهش می‌کند بزرگ‌ترین پرش در همه‌ی سناریوها و نشان‌دهنده‌ی آستانه‌ای است که مسیر ناچار به زیگزاگ‌های متراکم می‌شود. با این حال، در سناریوی ۱۰۰۰ مانع، PC اندکی کاهش و PS افزایش می‌یابد؛ این بازگشت جزئی ناشی از افزایش طول صلب از ۴۲۰ به ۴۴۰ متر و کاهش پیچ‌ها از ۶۳ به ۶۱ است که در تراکم‌های بسیار بالا، مسیرهای جایگزین کم‌پیچ‌تر با طول بیشتر مجال بروز می‌یابند. شناسایی این آستانه‌ها برای طراحی راهبردهای ناوبری تطبیقی با شعاع خمش محلی راهگشاست.

به‌طور کلی این پژوهش به‌طور نظام‌مند نشان داد که شعاع خمش، پارامتری کانونی در تنظیم هم‌زمان طول، ایمنی و انعطاف‌پذیری مسیر ربات نرم با بدنه پلیمری در محیط‌های شبکه‌ای با موانع

مراجع

- Núñez-Calvo N., Sorrosal G., Cabanes I., Mancisidor A., Rodríguez-Guerra J., Enhancing Accuracy in Mobile Manipulators: Challenges, Current Solutions and Future Needs, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 96, 103041, **2025**.
- Eyvazian A., Song Y., Hovhannes C., Savari A., Sawaran Singh N.S., State-of-the-Art Soft Robotic Systems for Unstructured and Real-world Environments: A Systematic Review, *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 73, 102264, **2026**.
- Wang J., Zhou Z., Kahak A., Li S., Embodying Physical Computing Into Soft Robots, *Nature Communications*, 17, 3384, **2026**.
- Willemstein N., Imanian M.E., van der Kooij H., Sadeghi A., Pellet-Based 3D Printing of Soft Thermoplastic Elastomeric Membranes for Soft Robotic Applications, *Materials & Design*, 258, 114589, **2025**.
- Kulkarni S.S., Bayre N.M., Khan K.A., Modelling Visco-Hyperelastic Response of Silicone Based Elastomers for Soft Robotics and Foldable Structure Applications, *International Journal of Engineering Science*, 211, 104253, **2025**.
- Esmalipour S., Ajri M., Modeling and Analysis of the Bending Behavior of Soft Pneumatic Network Actuator with Hyperelastic Models, *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, 55, 1021-1042, **2023**.
- Molla M.H.O.R., Chen J., Xu C., Advancing Soft Robotics: Recent Progress in Dielectric Elastomer and Fluid Actuators, *npj Robotics*, 4, 17, **2026**.
- Zhou S., Li Y., Wang Q., Lyu Z. Integrated Actuation and Sensing: Toward Intelligent Soft Robots. *Cyborg and Bionic Systems*, 5, 0105, **2024**.
- Zhang B., et al. Morphological Design Methodologies of Soft Robots. *The Innovation*, 6, 100578, **2025**.
- Weng Z., Sun L., Li L., et al. Design and Implementation of a Three-Segment Tendon-Driven Soft Robot with Variable Stiffness. *Biomimetics*, 11, **2026**.
- Wang B., Sun H., Du J., et al. Kinematic Modelling and Closed-Loop Control of a Novel Soft Continuum Robot. *Knowledge-Based Systems*, 316, 113367 **2025**.
- Liu L., Wang P., et al., Path Planning Techniques for Mobile Robots: Review and Prospect, *Expert Systems with Applications*, 227, 120264, **2023**.
- Lee S., Joo H., Kim K., Kim H., Rolling-Horizon Genetic Algorithm for Adaptive Path Planning in Hazardous Environments, *Computers and Electrical Engineering*, 129, 110820, **2026**.
- Sabelhaus D., Röben F., Meyer zu Helliggen L.P., Schulze Lammers P., Using Continuous-Curvature Paths to Generate Feasible Headland Turn Manoeuvres, *Biosystems Engineering*, 116, 399–409, **2013**.
- Du S., Du M., Gao Y., Yang M., Hu F., Weng Y., Optimized Motion Planning for Mobile Robots in Dynamic Construction Environments with Low-Feature Mapping and Pose-Based Positioning, *Automation in Construction*, 177, 106334, **2025**.
- Tang Y., Zakaria M.A., Younas M., A Review on Path Planning Algorithms for Autonomous Mobile Robots, *Sensors*, 25, 1206, **2025**.
- Ahmad, J., & Ab Wahab, M. N. Enhancing the Safety and Smoothness of Path Planning Through an Integration of Dijkstra's Algorithm and Piecewise Cubic Bezier Optimization. *Expert Systems with Applications*, 289, Article 128315. **2025**.
- Šelek, A., & Seder, M. Smooth Motion Planning Method for Mobile Robots in Dynamic Environments. *Robotics and Autonomous Systems*, 195, 105220. **2026**.
- Liu L., Wang S., Zhang S., Du H., Wang P., Path Planning Techniques for Mobile Robots: Review and Prospect, *Expert Systems with Applications*, 229, 120466, **2023**.
- Venu S., Gurusamy M., A comprehensive Review of Path Planning Algorithms for Autonomous Navigation, *Results in Engineering*, 28, 107750, **2025**.
- Yang L., Qi H., Ma E., Qiu S., Li P., Huang Y., Mao J., Li M., Path Planning Technique for Mobile Robots: A Review, *Machines*, 11, 980, **2023**.
- Benrabah M., Orou Mousse C., Randriamariantsoa E., Chapuis R., Aufrère R., A Review on Traversability Risk Assessments for Autonomous Ground Vehicles: Methods and Metrics, *Sensors*, 24, 1909, **2024**.



فصلنامه علمی
سال یازدهم، شماره ۱، شماره پیاپی ۴۱، بهار ۱۴۰۵
Vol. 11, No. 1 Issue No. 41
Autumn 2025, Quarterly
صفحه ۱۷-۲۵

Iran Polymer Technology;
Research and Development

واژه‌های کلیدی:

نانوکامپوزیت پلیمری،
جذب انتخابی،
دی‌اکسید کربن،
گازهای گلخانه‌ای،
عاملیت آمینی.

نانوکامپوزیت‌های پلیمری پیشرفته برای جذب انتخابی CO₂: از طراحی تا کاربرد در کاهش گازهای گلخانه‌ای

محمد خلیلی ماهانی*

کرمان، دانشگاه شهید باهنر کرمان، بخش مهندسی شیمی

چکیده ...

افزایش غلظت دی‌اکسید کربن در اتمسفر به‌عنوان اصلی‌ترین گاز گلخانه‌ای، نیاز به فناوری‌های کارآمد و جدید جذب را ضروری ساخته است. روش‌های سنتی مانند جذب با آمین‌های مایع دارای معایبی مانند مصرف انرژی بالا، خوردگی تجهیزات و تخریب حلال هستند. در این میان، جاذب‌های جامد به‌ویژه نانوکامپوزیت‌های پلیمری به‌دلیل سطح ویژه بالا، قابلیت عاملیت‌دهی و سهولت بازیافت اهمیت گسترده‌ای یافته‌اند. در این مقاله مروری، اصول طراحی، سازوکارهای جذب (فیزیکی، شیمیایی و ترکیبی)، انواع ماتریس‌های پلیمری (پلی‌ایمید، پلی‌سولفون، پلی‌اتیلن‌ایمین) و نانوپرکننده‌های مؤثر (چارچوب‌های آل‌فلزی، اکسید گرافن، نانولوله‌های کربنی، نانوسیلیکای متخلخل) بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد که با عاملیت‌دهی آمینی، انتخاب بهینه نانوپرکننده و همچنین، ترکیب هم‌زمان جذب فیزیکی و شیمیایی، می‌توان بهبود قابل توجهی در عملکرد مشاهده کرد. روش‌های ساخت شامل اختلاط محلولی، قالب‌گیری مذاب و پلیمری‌شدن درجا هستند. چالش‌های اصلی شامل پایداری در برابر رطوبت، هزینه بالای نانوپرکننده‌ها و مقیاس‌پذیری فرایند است. کاربردهای مهم این فناوری عبارتند از جداسازی دی‌اکسید کربن از دودکش نیروگاه‌ها، شیرین‌سازی گاز طبیعی و جذب مستقیم از هوا. با پیشرفت سنتز سبز و توسعه غشاهای ماتریس ترکیبی، نانوکامپوزیت‌های پلیمری چشم‌اندازی امیدبخش برای داشتن آینده‌ای کم‌کربن ارائه می‌دهند. بهینه‌سازی هم‌زمان اجزا و شرایط عملیاتی، کلید دستیابی به عملکرد صنعتی مطلوب خواهد بود.

*پست الکترونیکی مسئول مکاتبات:

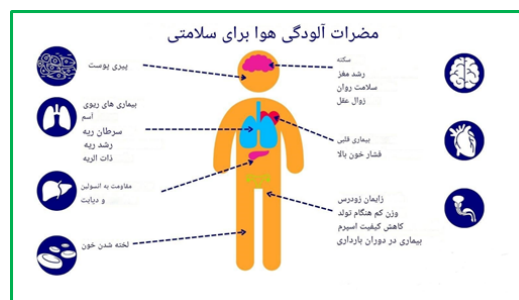
khalilimahani80@gmail.com

۱ مقدمه

افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای، به‌ویژه دی‌اکسیدکربن، مهم‌ترین عامل گرمایش جهانی و تغییرات اقلیمی در دهه‌های اخیر شناخته می‌شود. بر اساس گزارش‌های گوناگون، غلظت CO_2 اتمسفری به بیش از ۴۱۹ ppm رسیده است و میانگین دمای جهانی نسبت به دوران پیشاصنعتی حدود ۱/۲ درجه سانتی‌گراد افزایش یافته است. این افزایش عمدتاً ناشی از سوزاندن سوخت‌های فسیلی در نیروگاه‌ها، صنایع سیمان، پتروشیمی و حمل و نقل است. پیامدهای این پدیده شامل بالا آمدن سطح آب دریاها، افزایش رخدادهای اقلیمی شدید (سیل، خشکسالی، توفان) و کاهش تنوع زیستی است. در شکل ۱ تعدادی از معایب آلودگی هوا ناشی از وجود کربن دی‌اکسید در هوا برای بدن آورده شده است. نرخ انتشار سالانه CO_2 همچنان روند صعودی دارد و رسیدن به اهداف توافق پاریس را با چالش مواجه ساخته است. در این شرایط، توسعه فناوری‌های کارآمد برای کاهش انتشار CO_2 به یکی از اولویت‌های تحقیقاتی جهانی تبدیل شده است [۱، ۲].

روش‌های سنتی جذب CO_2 به دو دسته کلی جذب با حلال‌های مایع (مانند آمین‌ها) و جذب با جاذب‌های جامد تقسیم می‌شوند. فرایند جذب با آمین‌های مایع (به‌ویژه مونواتانول آمین) اگرچه در مقیاس صنعتی متداول است، اما معایب قابل توجهی از جمله مصرف انرژی بالا برای بازتولید حلال، خوردگی تجهیزات، اکسایش و تخریب آمین و ایجاد پسماند مایع سمی دارد. از طرفی، جذب سطحی با جاذب‌های جامد متخلخل مانند زئولیت‌ها، کربن فعال و سیلیکاژل به دلیل مصرف انرژی کمتر و عدم تولید پسماند مایع مزیت دارد، اما این مواد اغلب ظرفیت جذب محدود (معمولاً کمتر از ۲ میلی‌مول بر گرم)، گزینش‌پذیری پایین نسبت به دی‌اکسیدکربن در حضور سایر گازها (مانند نیتروژن، اکسیژن و متان) و حساسیت به رطوبت از خود نشان می‌دهند [۳-۵].

در سال‌های اخیر، پلیمرها به دلیل وزن کم، سهولت فرآوری،



شکل ۱ معایب آلودگی هوا برای بدن.

تنوع ساختاری و هزینه نسبتاً پایین به‌عنوان گزینه‌های جذاب برای ساخت جاذب‌های CO_2 مطرح شده‌اند. پلیمرهایی مانند پلی‌اتیلن‌ایمین (PEI) و پلی‌آمیدها قابلیت عاملیت‌دهی با گروه‌های آمینی را دارند که از طریق واکنش شیمیایی با دی‌اکسیدکربن می‌توانند جذب بالایی ایجاد کنند. با این حال، پلیمرهای خالص معمولاً سطح ویژه بسیار پایینی دارند (کمتر از ۱۰ مترمربع بر گرم) که دسترسی گروه‌های عاملی به مولکول‌های گاز را محدود می‌کند. همچنین، بسیاری از پلیمرهای آمینی در دماهای بالا دچار نشت آمین و افت ظرفیت می‌شوند. به عبارت دیگر، پلیمرها به‌تنهایی نمی‌توانند هم‌زمان الزامات سطح بالا، پایداری حرارتی و گزینش‌پذیری را برآورده سازند [۶-۸].

راهبرد مؤثر برای رفع محدودیت‌های فوق، ساخت نانوکامپوزیت‌های پلیمری است. در این مواد، مقادیر اندکی از نانوپرکننده‌های معدنی یا آلی-فلزی با سطح ویژه بسیار بالا (چندصد تا چند هزار مترمربع بر گرم) درون ماتریس پلیمری پخش می‌شوند [۹]. نانوپرکننده‌هایی مانند چارچوب‌های آلی-فلزی (MOFها)، اکسیدگرافن (GO)، نانولوله‌های کربنی (CNT) و نانوسیلیکای مزو متخلخل می‌توانند به‌طور چشمگیری سطح تماس و تعداد جایگاه‌های فعال را افزایش دهند. افزون بر این، خود نانوپرکننده‌ها را می‌توان با آمین‌های پلیمری عاملیت‌دهی کرد تا هم جذب شیمیایی و هم جذب فیزیکی را به‌طور هم‌زمان به کار گیرند. نتیجه این هم‌افزایی، دستیابی به ظرفیت جذب بالا، گزینش‌پذیری عالی و پایداری مناسب در چرخه‌های متعدد جذب و واجذب است [۱۰ و ۱۱]. از همه مهم‌تر، نانوکامپوزیت‌ها را می‌توان به شکل غشاهای ماتریس ترکیبی درآورد که برای جداسازی پیوسته گازها در فرایندهای صنعتی بسیار کاربردی هستند [۱۲].

هدف از نگارش این مقاله مروری، ارائه نمای جامع و به‌روز از طراحی، سنتز، خواص و کاربردهای نانوکامپوزیت‌های پلیمری در جذب انتخابی CO_2 است. ابتدا سازوکارهای فیزیکی و شیمیایی جذب تشریح می‌شوند و سپس انواع ماتریس‌های پلیمری و نانوپرکننده‌های مؤثر به همراه نقش هر یک در افزایش گزینش‌پذیری و ظرفیت جذب معرفی می‌شوند. در ادامه، روش‌های ساخت و عوامل کلیدی مؤثر بر عملکرد (درصد نانوپرکننده، دما، فشار، رطوبت) بررسی می‌شوند. همچنین چالش‌های پیش رو مانند پایداری طولانی مدت، هزینه و مقیاس‌پذیری مورد بحث قرار گرفته و در پایان، چشم‌انداز کاربردهای صنعتی به‌ویژه در جداسازی از دودکش نیروگاه‌ها، شیرین‌سازی گاز طبیعی و جذب مستقیم از هوا ارائه می‌شود. سازوکارهای جذب انتخابی CO_2 در نانوکامپوزیت‌های پلیمری

جدول ۱ مقایسه سازوکار فیزیکی و شیمیایی.

جذب شیمیایی	جذب فیزیکی	ویژگی
۶۰-۱۰۰	۲۰-۴۰	گرمای جذب
بسیار بالا	متوسط	گزینش پذیری
متوسط تا زیاد	کم	انرژی بازتولید
می‌تواند افزایش یا کاهش	معمولاً کاهش	تأثیر رطوبت
نانوسیلیکا آمین‌دار شده	کربن فعال، زئولیت و MOFها	نمونه مواد

نظر اکسایش-کاهش (مانند $(\text{Cu}_3(\text{HHTP}))_2$)، فرایند جذب و دفع CO_2 بدون نیاز به گرمایش مستقیم صورت می‌گیرد که مصرف انرژی را به شدت کاهش می‌دهد [۱۷].

مواد تشکیل دهنده نانوکامپوزیت‌های پلیمری جاذب CO_2

نانوکامپوزیت پلیمری معمولاً از سه جزء تشکیل می‌شود: ماتریس پلیمری، نانوپرکننده و عاملیت‌دهنده سطحی (در صورت نیاز).

الف) ماتریس‌های پلیمری

انتخاب پلیمر مناسب باید بر اساس پایداری حرارتی، نفوذپذیری گازی، قابلیت فرآوری و هزینه باشد. پلیمرهای پرکاربرد عبارتند از: پلی‌ایمید، پلی‌سولفون، پلی‌اتیلن‌ایمین (PEI)، سلولز استات و پلی‌استرهای آروماتیک [۱۸].

پلیمرهای دارای ریزحفره ذاتی (Polymers of Intrinsic Microporosity - PIMs)

پلیمرهای با ریزحفره ذاتی (PIMs) نسل جدیدی از پلیمرها هستند که ساختار سفت و پیچ‌خورده آن‌ها به دلیل عدم توانایی در بسته‌بندی محکم زنجیره‌ها، حفراتی در ابعاد نانومتر ایجاد می‌کنند. این پلیمرها سطح ویژه بسیار بالا (تا ۱۰۰۰ مترمربع بر گرم) و نفوذپذیری فوق‌العاده‌ای از خود نشان می‌دهند. PIM-1 به‌عنوان شناخته‌شده‌ترین عضو این خانواده، توجه گسترده‌ای پیدا کرده است. در سال ۲۰۲۵، نشان داده شده است که تقویت پلازما با هلیوم روی غشاهای PIM-1 می‌تواند گزینش‌پذیری CO_2/CH_4 را تا ۱/۶۵ برابر افزایش دهد در حالی که نفوذپذیری بالای ۴۰۰۰ Barrer حفظ می‌شود [۱۹]. همچنین نسخه آمین‌دار شده (PIM-1-AM) گزینش‌پذیری CO_2 را در شرایط

جذب CO_2 توسط نانوکامپوزیت‌های پلیمری عمدتاً از دو مسیر فیزیکی و شیمیایی صورت می‌گیرد:

الف) جذب فیزیکی

در این سازوکار، مولکول‌های CO_2 به واسطه نیروهای واندروالسی و برهم‌کنش‌های $\pi-\pi$ بر روی سطوح حفرات ریز (کمتر از ۲ نانومتر) و مزو (۲-۵۰ نانومتر) جذب می‌شوند. این نوع جذب برگشت‌پذیر بوده و با کاهش فشار یا افزایش دما به راحتی واجذب صورت می‌گیرد. نانوپرکننده‌هایی با سطح بالا و ساختار متخلخل مانند MOFها و زئولیت‌ها عمدتاً از این مسیر عمل می‌کنند. هرچند گزینش‌پذیری جذب فیزیکی نسبی است، اما ترکیب اندازه حفره مناسب می‌تواند به گزینش‌پذیری کمک کند [۱۳].

ب) جذب شیمیایی

این سازوکار مبتنی بر تشکیل پیوند کووالانسی یا یونی بین مولکول CO_2 و گروه‌های عاملی بازی (عمدتاً آمین‌های اولیه و ثانویه) بر روی سطح جاذب است. این واکنش منجر به تشکیل کربامات می‌شود. جذب شیمیایی دارای گرمای جذب بالاتر (۶۰-۱۰۰ کیلوژول بر مول) و گزینش‌پذیری بسیار بالایی نسبت به CO_2 در حضور سایر گازها مانند نیتروژن، اکسیژن و متان است. با این حال، بازتولید جاذب به انرژی حرارتی بیشتری نیاز دارد. در نانوکامپوزیت‌ها، نانوپرکننده‌ها یا خود پلیمر میزبان با گروه‌های آمین (مانند پلی‌اتیلن‌ایمین و تترائیلن‌پنتاآمین) عاملیت‌دهی می‌شوند [۱۴ و ۱۵].

جدول ۱ ویژگی‌های دو سازوکار فیزیکی و شیمیایی را مقایسه می‌کند.

ج) سازوکارهای ترکیبی

در بسیاری از نانوکامپوزیت‌های پیشرفته، ترکیبی از جذب فیزیکی و شیمیایی رخ می‌دهد. برای مثال، MOFهایی با حفره‌های منظم پس از عاملیت‌دهی با آمین، ابتدا CO_2 را به‌صورت فیزیکی درون حفرات جذب کرده و سپس واکنش شیمیایی با گروه‌های آمین انجام می‌شود. این هم‌افزایی منجر به افزایش ظرفیت و سرعت جذب می‌شود [۱۶].

د) جذب الکتروشیمیایی

در سال‌های اخیر، سازوکار نوینی تحت عنوان جذب الکتروشیمیایی معرفی شده است. در این روش، با اعمال جریان الکتریکی به جاذب‌هایی مانند چارچوب‌های آلی-فلزی فعال از

می دهد، بلکه امکان تبدیل الکتروشیمیایی مستقیم آن به محصولات باارزش مانند کربنات های حلقوی را نیز فراهم می کند.

• پلیمرهای آلی متخلخل (POPs) و پلیمرهای فوق هسته ای (HCPS): پلیمرهای آلی متخلخل به عنوان دسته جدیدی از مواد جاذب با سطح ویژه بالا، تخلخل قابل تنظیم، پایداری شیمیایی عالی و قابلیت عاملیت دهی آسان، توجه گسترده ای پیدا کرده اند. در میان زیرمجموعه های مختلف، پلیمرهای فوق هسته ای به دلیل هزینه تولید پایین و روش های سنتز ساده، قابلیت بالایی برای کاربردهای صنعتی دارند. در مطالعه پیشگامانه در سال ۲۰۲۵، سه نوع پلیمر آلی متخلخل مزدوج با نام های C-POP1 تا C-POP3 با سطح ویژه تا ۵۶۰ مترمربع بر گرم و جذب CO_2 حدود ۸۳ میلی گرم بر گرم در دمای ۲۷۳ کلوین گزارش شده است [۲۴]. HCP ها به دلیل پایداری حرارتی و شیمیایی بالاتر نسبت به MOF ها (به ویژه در برابر رطوبت) گزینه های مناسبی برای کاربردهای صنعتی در مقیاس بزرگ هستند.

• نانومواد دوبعدی (2DNMs) در غشاهای ماتریس ترکیبی: نانومواد دوبعدی مانند MXene و $\text{g-C}_3\text{N}_4$ به دلیل ضخامت اتمی، فاصله لایه ای قابل تنظیم و سطح ویژه بالا، انقلابی در طراحی غشاهای ماتریس ترکیبی ایجاد کرده اند. در سال ۲۰۲۵، نشان داده شده است که با لایه گذاری یونی، فاصله لایه های $\text{g-C}_3\text{N}_4$ از ۰/۳۳ نانومتر به ۰/۷۲ نانومتر افزایش می یابد و گزینش پذیری CO_2/CH_4 تا ۳۰۰ درصد بهبود می یابد. همچنین غشاهای MXene با پیوند کووالانسی پلی اتیلن گلیکول، نمره ترکیبی ۴/۲ برابر غشاهای سنتی دارند و پس از ۱۰۰۰ ساعت آزمایش، افت عملکرد کمتر از ۵ درصد است [۲۵].

روش های ساخت نانوکامپوزیت های پلیمری

برای دستیابی به پراکندگی همگن نانوذرات در ماتریس پلیمری و جلوگیری از کلوخه شدن، روش های مختلفی به کار می رود:

الف) اختلاط محلولی

نانوذرات در حلال مناسب (مانند DMF، THF، یا آب) پخش شده و سپس پلیمر حل می شود. پس از هم زدن و اعمال فراصوت، حلال تبخیر می شود. این روش ساده و مناسب مقیاس آزمایشگاهی است. همگن بودن نهایی به عواملی مانند زمان هم زدن، قدرت فراصوت و سازگاری سطحی بستگی دارد [۲۶].

ب) قالب گیری مذاب

مناسب برای پلیمرهای گرمانرم (مانند PE، PS، PP) نانوذرات

مخلوط گازی به طور قابل توجهی افزایش می دهد. کاربردهای نوین PIM ها شامل تثبیت آنزیم کربنیک انیدراز برای دستگاه های اکسیژن رسانی غشای خارج بدنی (ECMO) نیز می شود. در نانوکامپوزیت ها، معمولاً پلیمر خواص مکانیکی و یکپارچگی ساختاری را تأمین می کند در حالی که نانوپرکننده نقش اصلی را در جذب ایفا می کند [۱۸].

ب) نانو پرکننده ها

• چارچوب های آلی-فلزی (MOF): MOF ها بلورهای متخلخلی هستند که از یون های فلزی و لیگاندهای آلی ساخته شده اند. سطح ویژه آن ها به ۷۰۰۰ مترمربع بر گرم نیز می رسد. MOF های معروف مانند HKUST-1، ZIF-8، iO-66 و MIL-101 جذب فیزیکی بالایی دارند. با عاملیت دهی آمینی (NH_2 -MIL-101) ظرفیت جذب تا ۴/۵ میلی مول بر گرم در فشار ۱ بار افزایش می یابد [۲۰]. چالش اصلی پایداری رطوبتی MOF هاست که با استفاده از پلیمرهای آب گریز در کامپوزیت تا حدودی حل می شود. پژوهش های بسیار جدید در سال ۲۰۲۵ نشان داده اند که با وارد کردن اسیدهای آمینه دوکاره به درون حفرات MOF، ظرفیت جذب به بیش از ۶ میلی مول بر گرم در فشار محیط می رسد. همچنین MOF های مغناطیسی با ساختار هسته-پوسته (مانند $\text{Fe}_3\text{O}_4@ \text{MOF}$) قابلیت بازیافت آسان با میدان مغناطیسی را فراهم کرده اند [۲۱].

• گرافن و اکسیدگرافن (GO): GO دارای صفحات دوبعدی با گروه های عاملی اکسیژن دار (کربوکسیل، هیدروکسیل، اپوکسی) است که به راحتی با آمین ها واکنش می دهد. نانوکامپوزیت های PEI/GO ظرفیت جذب تا ۲/۳ میلی مول بر گرم و گزینش پذیری CO_2/N_2 حدود ۷۰ گزارش شده است [۲۲]. گرافن احیاء شده (rGO) به دلیل رسانایی بالا برای ساخت حسگرهای CO_2 نیز استفاده می شود. جدیدترین پیشرفت در این زمینه، استفاده از آئروژل های rGO-PEI برای جذب مستقیم از هوا (DAC) با قابلیت بازتولید نوری (Photo-Swing) است. با تابش نور، CO_2 جذب شده آزاد می شود و نیاز به انرژی حرارتی حذف می شود. • نانولوله های کربنی (CNT): CNT ها دارای سطح ویژه بالا (۵۰۰-۲۰۰ مترمربع بر گرم) و استحکام مکانیکی فوق العاده هستند. با اکسایش اسیدی و سپس عاملیت دهی با PEI، جاذب هایی با ظرفیت جذب حدود ۲/۵ میلی مول بر گرم (در دمای ۲۵ درجه) و گزینش پذیری بسیار خوب حاصل می شود [۲۳]. قیمت بالای CNT خلص محدودیت اصلی است. راهبرد نوین دیگر، پوشش دهی نانولوله های کربنی با پلیمرهای یونی (نظیر پلی یونیک مایع) است که نه تنها جذب CO_2 را افزایش

دوکاره با استفاده از الکتروریسی دوطرفه است. در این روش، دو محلول پلیمری مجزا به طور همزمان الکتروریسی می شوند تا الیافی با دو نیمه مجزا و عملکردهای مستقل تولید شود. در سال ۲۰۲۵، محققان نانوالیافی متشکل از پلی اتیلن اکسید (PEO) اصلاح شده با PEI برای جذب CO_2 در یک نیمه و PEO حاوی نانوذرات مس (CuNP) برای کاتالیز CO_2 در نیمه دیگر ساخته اند. این نانوالیاف با استفاده از آب به عنوان حلال سبز تولید شده اند و گروه های امین، CO_2 را جذب کرده و سپس توسط نانوذرات مس در دمای پایین ۱۵۰ درجه سانتی گراد و با هیدروژن دار شدن، مستقیماً به متانول تبدیل می کنند [۳۱]. این نوآوری گامی مهم به سمت سامانه های یکپارچه «جذب و تبدیل» است.

ز) غشاهای نازک نانوکامپوزیت (TFN) و غشاهای بسیار نازک نانوکامپوزیت (NFN) مبتنی بر MOF
در سال های اخیر، پیشرفت های چشمگیری در طراحی غشاهای TFN و NFN حاصل شده است. چالش اصلی در این غشاهای تمایل MOF ها به تجمع و ایجاد حفرات غیرانتخابی در فصل مشترک است. راهکارهای نوین شامل مهندسی سطح نانوذرات MOF، مهندسی نقص در ساختار MOF، بی شکل سازی (Amorphization) و تشکیل کامپوزیت با پلیمرها است. مطالعات اخیر نشان داده اند که MOF های آمورف (بی شکل) به دلیل انعطاف پذیری ساختاری، پراکندگی یکنواخت تری دارند و گزینش پذیری CO_2/N_2 را تا ۴۰ درصد افزایش می دهند [۱۸].

عوامل موثر بر عملکرد جذب انتخابی CO_2
عملکرد نانوکامپوزیت بستگی به چندین عامل دارد که در ادامه بررسی می شوند:

الف) درصد وزنی نانوپرکننده
به طور معمول با افزایش درصد نانوذرات، ظرفیت جذب ابتدا افزایش و سپس به دلیل کلوخه شدن و کاهش سطح فعال، کاهش می یابد. محدوده بهینه معمولاً ۱۰-۳۰ درصد است. در مورد PEI متصل به GO، غلظت ۲۰ درصد PEI بالاترین کارایی را نشان داده است [۲۲].

ب) دما و فشار
جذب فیزیکی با کاهش دما افزایش می یابد (فرایند گرماده)، در حالی که جذب شیمیایی در دماهای متوسط (۶۰-۸۰ درجه سانتی گراد) به دلیل افزایش نفوذ مولکول ها به حفرات، بهینه

با پلیمر مذاب در داخل اکسترودر مخلوط می شوند. این روش بدون استفاده از حلال است، اما دماهای بالا ممکن است به آمین های عاملیت دهنده آسیب بزند. بنابراین بیشتر برای نانوپرکننده های غیرعاملی استفاده می شود [۲۷].

ج) پلیمری شدن درجا
در این روش، مونومر به همراه نانوذرات و آغازگر پلیمری می شود. این راهکار امکان کنترل بهتر بر روی مورفولوژی و اتصال شیمیایی بین نانوذره و پلیمر را فراهم می کند. برای مثال، پلی آمیدها یا پلی ایمیدها را می توان در حضور نانوسیلیکا سنتز کرد [۲۸].

د) تشکیل غشاهای ماتریس ترکیبی
در کاربردهای جداسازی گازی، نانوکامپوزیت به شکل غشای نازک (ضخامت ۲۰-۱۰۰ میکرومتر) تهیه می شود. روش ریخته گری محلول روی زیرلایه متخلخل رایج است. غشاهای ماتریس ترکیبی متشکل از MOF یا نانوسیلیکا درون پلی ایمید، عملکرد جداسازی CO_2 از CH_4 و N_2 را به شدت بهبود بخشیده اند [۱۲].

ه) الکتروریسی (Electrospinning)
الکتروریسی به عنوان روشی نوین و قدرتمند برای تولید نانوالیاف با نسبت سطح به حجم بسیار بالا، تخلخل زیاد و قابلیت عاملیت دهی آسان، در سال های اخیر توجه گسترده ای پیدا کرده است. در این روش، با اعمال ولتاژ بالا به محلول پلیمری حاوی نانوپرکننده، الیافی با قطر ۵۰ تا ۱۰۰۰ نانومتر تولید می شود که ساختاری سه بعدی و متخلخل ایجاد می کنند. در مطالعه ای در سال ۲۰۲۵، محققان غشاهای نانوکامپوزیتی پلی آکریلونیتریل (PAN) را با استفاده از نانولوله های کربنی چنددیواره (MWCNT) و نانوسیلیکا (SiO_2) به روش الکتروریسی تقویت کردند. نتایج نشان داد که غشای نانوکامپوزیت حاوی ۴ درصد وزنی MWCNT بهترین عملکرد جداسازی CO_2/N_2 را با نفوذپذیری CO_2 برابر $289/4$ Barrer و گزینش پذیری $6/3$ ارائه می دهد [۲۹]. همچنین نانوالیاف گرماسخت آمین-اپوکسی با قطر ۷۰۰-۵۰۰ نانومتر برای جذب مستقیم از هوا (DAC) ساخته شده اند که قابلیت دفع در دمای پایین و مقاومت حرارتی عالی دارند [۳۰].

و) الکتروریسی دوطرفه (Side-by-Side Electrospinning)
جدیدترین پیشرفت در این زمینه، توسعه نانوالیاف هیبریدی

می‌شود. فشار بالا (تا ۱۰ بار) جذب فیزیکی را تشدید می‌کند [۱۳و۱۴].

شهری توسعه یافته‌اند [۳۷].

جذب مستقیم از هوا (DAC) پیشرفته

در سال‌های اخیر، جذب مستقیم از هوا با استفاده از MOF‌های آمین‌دار به‌عنوان یکی از امیدوارکننده‌ترین فناوری‌های کربن منفی (Negative Carbon Emission) مطرح شده است. در سال ۲۰۲۵، محققان با سنتز خانواده MOF‌های پورفیرینی با تخلخل سلسله‌مراتبی (HP-PMOF) حاوی چگالی بالایی از نقص‌های ساختاری و ترکیبی از ریزحفرات، مزوحفرات و ماکروحفرات، موفق به رفع محدودیت بارگذاری آمین شدند. این MOF‌ها پس از عاملیت‌دهی با آمین‌های زنجیره کوتاه (DETA و TEPA)، ظرفیت جذب CO_2 را تا ۱۴۰ برابر نسبت به MOF اصلاح‌نشده افزایش دادند. HP-PMOF-DETA با ظرفیت جذب ۱/۴۰ میلی‌مول بر گرم در شرایط ۴۰۰ ppm (مشابه غلظت اتمسفر) و حفظ ۸۴ درصد بازده بازتولید پس از ۱۰ چرخه، یکی از بهترین عملکردهای گزارش‌شده برای DAC است [۲۱]. همچنین آئروژل‌های سیلیکا و rGO-PEI نیز با قابلیت بازتولید نوری یا الکتریکی در حال توسعه هستند.

سامانه‌های یکپارچه جذب و تبدیل (Capture-to-Con-) (version)

رویکرد نوظهور «جذب و تبدیل» که CO_2 جذب‌شده را به سوخت یا مواد شیمیایی با ارزش در محل تبدیل می‌کند، می‌تواند مرکز هزینه را به منبع درآمد تبدیل کند. نانوالیاف دوکاره ساخته‌شده با الکتروریسی دوطرفه، نمونه‌ای از این فناوری است که CO_2 را جذب و مستقیماً به متانول تبدیل می‌کند [۳۱]. همچنین HCP و POP‌ها نیز در کاربردهای کاتالیزوری نوری و الکتروشیمیایی برای تبدیل CO_2 به محصولات با ارزش مانند کربنات‌های حلقوی مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۲۴].

تحلیل هزینه و چشم‌انداز صنعتی‌سازی

یکی از مهم‌ترین سوالات در مسیر توسعه، هزینه اقتصادی و قابلیت صنعتی‌سازی است. بر اساس تحلیل‌های فنی-اقتصادی (TEA) و ارزیابی چرخه حیات (LCA) انجام شده در سال ۲۰۲۶، هزینه کاهش انتشار CO_2 با استفاده از فناوری‌های مبتنی بر نانومواد می‌تواند در شرایط مطلوب به ۸۰-۴۰ دلار به ازای هر تن CO_2 کاهش یابد که با بازارهای نوظهور کربن رقابتی است [۳۸]. نقشه راه پیشنهادی برای سال‌های ۲۰۳۵-۲۰۳۰ شامل سه محور اصلی است: صدور گواهینامه دوام و پایداری جاذب‌ها، استقرار راهکارهای ماژولار بازسازی برای واحدهای

ج) رطوبت

وجود بخار آب تأثیر دوگانه دارد: از یک طرف، رطوبت، رقابت بر سر جایگاه‌های جذب را افزایش داده و جذب CO_2 را کاهش می‌دهد. از طرف دیگر، در جذب شیمیایی آمینی، آب می‌تواند به‌عنوان کاتالیزور واکنش کربامات عمل کرده و حتی از طریق تشکیل بی‌کربنات ظرفیت را افزایش دهد. اخیراً نانوکامپوزیت‌هایی طراحی شده‌اند که با حفظ ساختار آب‌گریز در عین حال که عاملیت آمینی دارند، در رطوبت نسبی ۵۰ درصد عملکرد بهتری نشان می‌دهند [۳۲]. رویکرد جدیدتر، طراحی جاذب‌های به اصطلاح بی‌آب (Water-Lean) است که در آن‌ها از حلال‌های آمینی بدون حضور آب استفاده می‌شود. این جاذب‌ها ضمن حفظ ظرفیت جذب بالا، انرژی بازتولید را تا ۴۰ درصد کاهش می‌دهند. همچنین نانوذرات توخالی با عامل آمینی (مانند نانوسیلیکای توخالی) پایداری فوق‌العاده‌ای در رطوبت ۸۰ درصد نشان داده‌اند. چارچوب‌های آلی کووالانسی آمونیه‌شده (Ammoniated COFs) نیز نمونه دیگری از این فناوری هستند.

د) گزینش‌پذیری نسبت به سایر گازها

در کاربردهای واقعی CO_2 با CH_4 ، N_2 و H_2 مخلوط است. نانوکامپوزیت‌های پلیمری/آمین‌دارشده، گزینش‌پذیری بالایی نسبت به CO_2 نشان می‌دهند [۳۳-۳۵].

کاربردهای نانوکامپوزیت‌های پلیمری در جذب CO_2

نانوکامپوزیت‌های پلیمری کاربردهای متنوع و حیاتی در جداسازی انتخابی دی‌اکسیدکربن دارند. مهم‌ترین کاربرد آن‌ها، حذف CO_2 از دودکش نیروگاه‌های زغال سنگ و گاز طبیعی قبل از انتشار در اتمسفر است [۳۳]. دومین کاربرد، شیرین‌سازی گاز طبیعی است که طی آن CO_2 از جریان متان جدا می‌شود تا ارزش حرارتی افزایش یابد [۳۴]. سومین کاربرد، جذب مستقیم دی‌اکسیدکربن از هوای آزاد برای کاهش غلظت گلخانه‌ای است [۳۵]. همچنین این فناوری در سامانه‌های تهویه مطبوع ساختمان‌ها و فضاهای بسته مانند ایستگاه‌های فضایی به کار می‌رود. در صنایع غذایی، از این نانوکامپوزیت‌ها برای تولید بسته‌بندی‌های فعال استفاده می‌شود که گاز CO_2 را کنترل می‌کنند [۳۶]. در نهایت، حسگرهای CO_2 پلیمری بر پایه این مواد برای پایش لحظه‌ای غلظت CO_2 در محیط‌های صنعتی و

جایگاه‌های فعال را افزایش می‌دهد. عاملیت‌دهی آمینی روی نانوپرکننده‌ها، جذب شیمیایی را ممکن ساخته و گزینش‌پذیری را تا بیش از پنجاه برابر بهبود می‌بخشد. روش‌های ساخت مانند اختلاط محلولی و پلیمری‌شدن درجا، امکان تولید غشاهای ماتریس ترکیبی با پراکندگی همگن را فراهم می‌کنند. این غشاها در کاربردهایی مانند جداسازی CO_2 از دودکش نیروگاه‌ها و شیرین‌سازی گاز طبیعی عملکرد عالی نشان داده‌اند. همچنین فناوری جذب مستقیم از هوا با استفاده از این مواد، راهکاری موثر برای کاهش گازهای گلخانه‌ای است. با این حال، چالش‌هایی مانند پایداری در رطوبت و هزینه بالای نانوپرکننده‌ها همچنان باقی است. تحقیقات آینده باید بر سنتز سبز و مقیاس‌پذیری فرایند متمرکز شوند. توسعه غشاهای هیبریدی با استفاده از منابع بومی می‌تواند ایران را در این فناوری راهبردی توانمند سازد. بهینه‌سازی هم‌زمان شرایط عملیاتی و ترکیب مواد، کلید دستیابی به عملکرد صنعتی مطلوب خواهد بود. در مجموع، نانوکامپوزیت‌های پلیمری چشم‌اندازی روشن برای آینده‌ای کم کربن هستند.

صنعتی موجود، و اعتبارسنجی در مقیاس پایلوت. موفقیت این فناوری نه تنها به پیشرفت‌های علمی در سطح مولکولی بستگی دارد، بلکه به اثبات توانایی آن در عملکرد پایدار برای یک دهه در شرایط واقعی یک نیروگاه نیز وابسته است.

پیشرفت‌های کلیدی اخیر

با پیشرفت سنتز سبز، توسعه غشاهای ماتریس ترکیبی و سامانه‌های جذب و تبدیل، نانوکامپوزیت‌های پلیمری چشم‌اندازی امیدبخش برای داشتن آینده‌ای کم‌کربن ارائه می‌دهند. بهینه‌سازی هم‌زمان اجزا و شرایط عملیاتی، کلید دستیابی به عملکرد صنعتی مطلوب خواهد بود.

نتیجه‌گیری

نانوکامپوزیت‌های پلیمری به عنوان نسل جدید جاذب‌های جامد، توانایی بالایی برای جذب انتخابی دی‌اکسیدکربن دارند. ترکیب ماتریس پلیمری با نانوپرکننده‌هایی مانند چارچوب‌های آلی فلزی، اکسیدگرافن و نانوسیلیکای متخلخل، سطح ویژه و تعداد

مراجع

- Forster P.M., Smith C., Walsh T., Lamb W.F., Lamboll R., Hall B., Hauser M., Ribes A., Rosen D., Gillett N.P., Palmer M.D., Rogelj J., von Schuckmann K., Trewin B., Allen M., Andrew R., Betts R.A., Borger A., Boyer T., Zhai P., Indicators of Global Climate Change 2023: Annual Update of Key Indicators of the State of the Climate System and Human Influence. *Earth System Science Data*, 16, 6, 2625–2658, **2024**.
- Lee H., Romero J. (Eds.): Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, *IPCC*, 35-115, **2023**.
- Dutcher B., Fan M., Russell A. G., Amine-Based CO₂ Capture Technology Development from the Beginning of 2013—A Review, *ACS Applied Materials & Interfaces*, 7, 2137-2148, **2015**.
- Wang Q., Luo J., Zhong Z., Borgna A., CO₂ Capture by Solid Adsorbents and Their Applications: Current Status and New Trends, *Energy & Environmental Science*, 4, 42-55, **2011**.
- Samanta A., Zhao A., Shimizu G.K., Sarkar P., Gupta R., Post-combustion CO₂ Capture Using Solid Sorbents: A Review, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 51, 1438-1463, **2012**.
- Xu X., Song C., Andresen J. M., Miller B. G., Scaroni A. W., Novel Polyethylenimine-Modified Mesoporous Molecular Sieve of MCM-41 Type as High-capacity Adsorbent for CO₂ Capture, *Energy & Fuels*, 16, 1463-1469, **2002**.
- Lin Y.S., Polymer Nanocomposite Membranes for CO₂ Capture, *Journal of Membrane Science*, 639, 119763, **2021**.
- Hoffman J., Proaño L., Jones C.W., Role of Polymer Architecture in CO₂ Capture from Air Using Supported Poly(alkylenimine)s: Linear vs Branched Polymers. *ACS Applied Polymer Materials*, 7, 22, 15671–15681, **2025**.
- Furukawa H., Cordova K.E., O’Keeffe M., Yaghi O.M., The Chemistry and Applications of Metal-Organic Frameworks, *Science*, 341, 1230444, **2013**.
- Zhao D.L., Zhao Y.G., Graphene Oxide–Polyethylenimine Composite for CO₂ Capture: Effect of Loading and Crosslinking, *Journal of CO₂ Utilization*, 39, 101166, **2020**.
- Bai L., Jiang X., Deng Y., Wang S., Liu H., Amine-functionalized CNTs@mSiO₂ with Short Radical Mesochannels for Fast and Efficient CO₂ Capture, *Journal of Materials Chemistry A*, 13, 30065-30072, **2025**.
- Chung T.S., Jiang L.Y., Li Y., Kulprathipanja S., Mixed Matrix Membranes (MMMs) Comprising Organic Polymers with Dispersed Inorganic Fillers for Gas Separation, *Progress in Polymer Science*, 32, 483-507, **2007**.
- Samanta A., Zhao A., Shimizu G.K.H., Sarkar P., Gupta R., Post-Combustion CO₂ Capture Using Solid Sorbents: A Review, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 51, 1438-1463, **2012**.
- Kishor R., Ghoshal A.K., Amine-Impregnated Mesoporous Silica for CO₂ Capture: A Review, *Chemical Engineering Journal*, 413, 127757, **2021**.
- Xu X., Song C., Andresen J.M., Miller B.G., Novel Polyethylenimine-Modified Mesoporous Molecular Sieve of MCM-41 Type as High-Capacity Adsorbent for CO₂ Capture, *Energy & Fuels*, 16, 1463-1469, **2002**.
- Zhang Z., Yao Z.Z., Xiang S., Chen B., Perspective of Microporous Metal-Organic Frameworks for CO₂ Capture and Separation, *Energy & Environmental Science*, 7, 2868-2899, **2014**.
- Pazanianjareghi, F., Singh S., Attia F., Munnangi V.S.R., Nsengiyumva E.M., Jiao Y., Lin H., Engineering MOFs for Thin-Film and Nanofilm Nanocomposite Membranes for CO₂ Separation. *Journal of Materials Chemistry A*, 14, 8, 4323–4343, **2026**.
- Robeson L.M., The Upper Bound Revisited, *Journal of Membrane Science*, 320, 390-400, **2008**.
- Huang, T., Wu Q., Dong Q., Yang F., Xie Y., Zhang G., Liu X., Liu G., Zhu H., Plasma-Treated Polymer of Intrinsic Microporosity Membranes for Enhanced CO₂/CH₄ Separation. *Separation and Purification Technology*, 376, 2, 134025, **2025**.
- Furukawa H., Cordova K.E., O’Keeffe M., Yaghi O.M., The Chemistry and Applications of Metal-Organic Frameworks, *Science*, 341, 1230444, **2013**.
- Chen, X., Leng J., Ma F., Wu J., Jin Y., He F., Yang C., Huang H., Liu X., Duan C., Shang S., Ye D., Constructing Amine-Functionalized Hierarchically Porous Porphyrin-Based Metal–Organic Frameworks for Highly Enhanced Direct Air Capture of CO₂, *ACS Applied Materials & Interfaces*, 17, 12, 17783-17793, **2025**.
- Zhao D.L., Zhao Y.G., Zhang Y.H., Graphene Oxide Polyethylenimine Composite for CO₂ Capture: Effect of Loading and Crosslinking, *Journal of CO₂ Utilization*, 39, 101166, **2020**.
- Su F., Lu C., Polyethylenimine Functionalized Multi-walled Carbon Nanotubes for CO₂ Capture, *Chemical Engineering Journal*, 215-216, 749-755, **2013**.
- Baig N., Shetty S., Wahed S.A., Hassan A., Das N., Alameddine, B., Promising CO₂ Capture and Effective Iodine Adsorption of Hyper-Cross-Linked Conjugated Porous Organic

- Polymers Prepared from a Cyclopentannulation Reaction. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 17, 12, 17783–17793, **2025**.
25. Salehi Maleh M., Bahrami A., Sepehri Sadeghian M.S., Asadimanesh H., Sadrzadeh M., A Comprehensive Review on Two-Dimensional Nanomaterials Mixed Matrix Membranes for Sustainable CO₂ Separation: from Molecular Engineering Design to Efficient Modification Strategies. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 173, 110-146, **2025**.
 26. Ma P.C., Siddiqui N.A., Marom G., Kim J.K., Dispersion and Functionalization of Carbon Nanotubes for Polymer-Based Nanocomposites: A Review, *Composites Part A*, 41, 1345-1367, **2010**.
 27. Pavlidou S., Papaspyrides C.D., A Review on Polymer-Layered Silicate Nanocomposites, *Progress in Polymer Science*, 33, 1119-1198, **2008**.
 28. Liu Y., Wang J., Zhang Y., Wu H., In Situ Polymerization of Polyamide 6/Functionalized MWCNT Nanocomposites for CO₂ Separation, *Journal of Applied Polymer Science*, 137, 48956, **2020**.
 29. Aletan D., Muthu J., Characterization of Electrospun PAN Polymer Nanocomposite Membranes for CO₂/N₂ Separation. *Journal of Composites Science*, 9(1), 21, **2025**.
 30. Okada C., Hou Z., Imoto H., Naka K., Kikutani T., Takasaki M., Utilizing B-Stage Amine-Epoxy in Electrospinning of Amine-Epoxy/Poly(vinyl alcohol) Nanofiber Webs for Direct CO₂ Capture from the Air. *Journal of Fiber Science and Technology*, 81, 8, 118-129, **2025**.
 31. Hengsbach R., Bychko I., Schwarz S., Strizhak P., Fahmi A., Sustainable Bifunctional Electrospun Hybrid Nanofibers for CO₂ Capture and Conversion. *Macromolecular Rapid Communications*, 46, 14, 1-8, **2025**.
 32. Pang S.H., Lively R.P., Water-Enhanced CO₂ Capture by Solid Amine Sorbents, *ChemSusChem*, 12, 2121-2125, **2019**.
 33. Jana A., Modi A., Recent Progress on Functional Polymeric Membranes for CO₂ Separation from Flue Gases: A Review, *Carbon Capture Science & Technology*, 11, 100204, **2024**.
 34. Sun L., Li Q., Li K., Chu J., Li Y., Wang M., Chen Z., Ma X., Yi S., State of the Art Polymeric Membranes and Polymer Derived Membranes for Simultaneous CO₂ and H₂S Removal from Sour Natural Gas, *Frontiers of Chemical Science and Engineering*, 19, 5, 40, **2025**.
 35. Robertson M., Qian J., Qiang Z., Polymer Sorbent Design for the Direct Air Capture of CO₂, *ACS Applied Polymer Materials*, 6, 23, 14169-14189, **2024**.
 36. Sharma S., Panda J., Mishra A.K., Nath P.C., Nayak P.K., Mahapatra U., Sharma M., Chopra H., Mohanta Y.K., Sridhar K., Recent Advances in Sustainable Biopolymer-Based Nanocomposites for Smart Food Packaging: A Review, *International Journal of Biological Macromolecules*, 279, 135583, **2024**.
 37. Rahman M.M., Salimian F., Hemmati A., Ghaemi A., A Review of Nanostructured Carbon Dioxide Sensors Based on Electrical and Thermal Conductivity, *Results in Engineering*, 25, 102-118, **2025**.
 38. Selvam D.C., Devarajan Y., Manjunath H.R., GM S., Acharya S.K., Tiwari A., Srivastava P., Mehar K., Review of Emerging Nanomaterials for CO₂ Capture and Capture to Conversion: Materials, Devices, and System-Level Perspectives. *Chemical Engineering Journal Advances*, 101127, **2026**.



فصلنامه علمی
سال یازدهم، شماره ۱، شماره پیاپی ۱۴، بهار ۱۴۰۵
Vol. 11, No. 1 Issue No. 41
Autumn 2025, Quarterly
صفحه ۳۸-۲۷

Iran Polymer Technology;
Research and Development

واژه‌های کلیدی:

گیاهان کائوچویی،
کائوچوی طبیعی،
درخت هوا،
گونه‌های مناسب ایران

مهم‌ترین گیاهان کائوچویی در دنیا و گونه‌های کائوچوی مناسب برای ایران

مهری ندیری نیری

اردبیل، شهرک صنعتی شماره ۲، شرکت طنین پیک سیلان (تولیدکننده توپ‌های بتا)، واحد آزمایشگاه،

چکیده ...

هدف از این پژوهش، معرفی مهم‌ترین گیاهان کائوچویی دنیا، اعم از درختی، درختچه‌ای، بوته‌ای یا علفی است. همچنین به شرایط مناسب کشت، داشت و برداشت و گونه‌های مناسب ایران نیز پرداخته شده است. در این پژوهش، اطلاعات مقدماتی در رابطه با مهم‌ترین گیاهان حاوی کائوچو ارائه شده است و از آوردن اطلاعات تفصیلی درباره گیاهان معرفی شده خودداری شده است. در پژوهش حاضر نام کائوچوی طبیعی فقط به کائوچوی حاصل از شیرابه درخت هوا اطلاق نمی‌شود، بلکه کائوچوی طبیعی در معنی وسیع آن به‌کار گرفته شده و گاه به سایر انواع آن با فرمول‌ها و درصد مختلف محتوای کائوچویی آن‌ها نیز اطلاق شده است. بررسی‌های به عمل آمده حاکی از این است که امکان تولید برخی از گونه‌های کائوچوی طبیعی در ایران کاملاً میسر بوده و تولید این ماده در ایران در اندازه‌های اقتصادی و بازرگانی عملی است. بدیهی است با بررسی و مطالعه روشمند و کافی و انتخاب صحیح گیاه کائوچوی مناسب هر منطقه و رفع مشکلات آگروتکنیک و آگرونومیک آن‌ها، رسیدن به مرزهای واردات فعلی کائوچوی طبیعی دور از دسترس نخواهد بود. بعد از اینکه نوع گیاه مناسب برای کشور انتخاب شد، باید برای تبدیل شیرابه به کائوچوهای جامد، فناوری مناسبی اخذ یا در داخل کشور طراحی شود تا اینکه بتوان از طریق آن، گونه‌های مختلف کائوچوی طبیعی جامد را در مقیاس انبوه تولید کرد.

*پست الکترونیکی مسئول مکاتبات:

mnadiriniri@yahoo.com

۱ مقدمه

نخستین بار کریستف کلمب در سفرنامه خویش طی سفر دومش به دنیای جدید در سال ۱۴۹۶، درباره بومیان سرزمین هائیتی و توپی که از صمغ نوعی درخت ساخته بودند داستانی بازگو می‌کند. بومیان آن مناطق، این توپ‌ها را که از جهندگی بالائی نیز برخوردار بودند، از خشک کردن شیر حاصل از تیغ‌زنی درختان ویژه‌ای به دست می‌آوردند. سرخپوستان آمریکای جنوبی این درختان را «Heve» یا «Cauchuc» که به معنی «اشک درخت یا اشک چوب» است، می‌نامیدند. امروزه از این دو اسم، نام‌های «هوا» (Hevea) و «کائوچو» (Caoutchouc) مشتق شده است که اولی نام «جنس» (Genus, Genre) معروفی از درختان حاوی شیرابه و دومی نامی فرانسوی برای واژه «لاستیک» (Rubber) است. علاوه بر توپ، بومیان از شیر این درختان برای ساخت کفش، بطری و نیز ضد آب کردن پارچه‌ها نیز استفاده می‌کردند. اسپانیایی‌ها و پرتغالی‌ها اولین کسانی بودند که نمونه‌ای از این ماده عجیب را به اروپا آوردند، اما کشف آن، تأثیری روی تمدن آن زمان اروپا نگذاشت و قرن‌ها گذشت تا استفاده از این ماده در این قاره معمول شد [۱].

در سال ۱۸۷۶ «هنری ویک هام» دانه‌های درخت هوا را از سواحل رودخانه «Tapajos» برزیل جمع‌آوری و به «باغ‌های کیو» (Kew Gardens) انگلستان آورد و سپس نهال‌های آن‌ها را از انگلستان به مالزی و سیلان فرستاد. از ۲۰۰۰ نهال فرستاده شده، حدود ۵۰ نهال به ثمر رسید که ۲۲ عدد از آن‌ها در مالزی بود. از همین چند درخت، امروزه میلیون‌ها هکتار از زمین‌های زراعتی جهان زیر کشت درخت کائوچوی هوا قرار دارد. واقعیت این است که گیاهان گوناگونی در سطح جهان وجود دارند که حاوی کائوچوی طبیعی هستند و استفاده از بهترین و مناسب‌ترین آن‌ها برای تولید کائوچو به میزان کافی، کاملاً امکان‌پذیر است [۱].

طبق مطالعات به عمل آمده، تعداد گیاهان حاوی کائوچوی طبیعی در جهان، چه آن‌ها که به علت دارا بودن مقادیر قابل ملاحظه کائوچو به عنوان منابع بالقوه تولید این ماده شناخته شده‌اند و چه آن‌ها که میزان کائوچویشان فقط در حد اندازه‌گیری است، تا سال ۱۹۶۱ میلادی بالغ بر ۱۱۱۷ گونه-متعلق به ۳۹۳ جنس و ۹۷ خانواده بوده است. باید توجه داشت که تعداد واقعی گیاهان کائوچویی جهان، بسیار بیشتر از این مقدار است، زیرا قسمت اعظم این آمار مربوط به قاره آمریکا به ویژه آمریکای شمالی و نیز قسمت‌هایی از روسیه است که بررسی گیاهان از نظر دربرداشتن کائوچو در این دو کشور گسترده‌تر بوده است و گیاهان کائوچویی سایر نقاط جهان هنوز به طور کامل مورد

بررسی قرار نگرفته و بنابراین جزو ارقام فوق منظور نشده‌اند [۱]. در ادامه پژوهش حاضر به معرفی تعدادی از مهم‌ترین گیاهان کائوچویی دنیا به ترتیب الفبای لاتین پرداخته شده است. سپس گیاهان قابل توصیه برای کشور مورد بحث قرار گرفته و امکانات کشت آن‌ها در ایران بررسی شده است.

۲ مهم‌ترین گیاهان کائوچویی در دنیا

۲-۱ آسکله پیاس (Asclepias)

این جنس با نام انگلیسی میلک ویدز «Milkweeds» متعلق به خانواده آسکله پیاداسه (Asclepiadaceae) است و مبدأ اصلی گونه‌های آن آمریکا و آفریقا است. اما امروزه تقریباً در سراسر نواحی معتدل جهان پراکنده است و اغلب در دشت‌ها، مرغزارها، مراتع و نیز در شرایط نیمه‌صحرائی خشک و گرم می‌روید. گیاهان این جنس به دلیل وجود مقدار چشمگیری شیرابه در اعضایشان، مدت‌ها به عنوان منابع احتمالی تهیه کائوچوی طبیعی مورد توجه بوده‌اند. در طول قرون هیجده و نوزده میلادی، اشخاصی در روسیه و آمریکا سعی فراوان کردند که از این گیاهان، کائوچوی طبیعی در حد تجارتي و اقتصادی به دست آورند. متأسفانه مشکلات فراوان در کشت وسیع این گیاهان و نازل بودن کیفیت و کمیت کائوچوی استحصالی ثابت کرده است که این گیاهان نمی‌توانند منبع بازرگانی مناسبی برای تهیه کائوچوی طبیعی باشند. از گیاهان این جنس همچنین می‌توان الیاف سلولز برای تهیه کاغذ و روغن به دست آورد. از بین گونه‌های متعدد این جنس دو گونه آسکله پیاس اروزا (A. erosa Torr) و آسکله پیاس سوب لوتا (A. subluta De-caisne) دارای اهمیت هستند. هر دو گونه اشاره شده از نظر تولید کائوچو، فاقد اهمیت بازرگانی و اقتصادی هستند. میزان کائوچوی موجود در آن‌ها کم و کیفیت آن نامطلوب است و علاوه بر آن، پرورش و کشت هر دو گونه فوق در سطح وسیع با مشکلات بسیار همراه است و استحصال کائوچوی آن دشوار بوده و نیازمند عملیات پرهزینه است [۱].

۲-۲ بلیک رود آتونکی نی سیس (Bleekrodea tonkinensis Dub. & Eber)

درختی از خانواده توت (Moraceae) است که اولین بار در سال ۱۹۰۷ در تونکین (Tonkin) و شمال ویتنام کشف شد و در این نواحی به نام Teo-nong خوانده می‌شود. درختی سریع‌الرشد به بلندی ۱۲ تا ۲۰ متر با انشعاب‌ها و شاخه‌های فراوان، پوست تقریباً سفید و چوب سفید است. ریشه‌های آن دارای گره‌های غده‌ای است که در آن‌ها آب ذخیره می‌شود. وجود این

و تعدادی از ریشه‌های جانبی افقی نیز بسیار نزدیک به سطح زمین قرار دارند و گاه از روی خاک به طول ۲۰ تا ۳۰ متر قابل رؤیت هستند. شکل تنه درخت در گونه‌های مختلف این جنس متنوع است و بسته به گونه درخت، میزان نور و وضعیت اقلیمی تفاوت می‌کند. ارتفاع درخت تا ۵۰ متر و قطر تنه به ۱/۷۲ متر می‌رسد. شاخه‌های بزرگ روی تنه اصلی گاه تا ۱۵ متر درازا دارند و برگ‌های همه گونه‌های این جنس در زمستان می‌ریزند. شکل برگ کاملاً رشد یافته، از تخم‌مرغی تا بیضی کشیده و نیزه‌ای شکل متغیر است. درختان جنس کاستیلا یک پایه هستند، به‌طوری که گل‌های نر و ماده روی یک خوشه گل یک درخت وجود دارند. ازدیاد درخت در درجه اول با کشت دانه آن و در درجه دوم با قلمه صورت می‌گیرد. از بین ۱۰ گونه مختلف این جنس، مهم‌ترین آن‌ها نوع کاستیلا الاستیکا (*Castilla Elastica Cervantes*) است. استحصال شیرابه از این گونه با ایجاد شکاف در پوست آن یا تیغ زدن انجام می‌شود و معمولاً اولین بهره‌برداری زمانی که درخت ۸ تا ۱۰ ساله است انجام می‌گیرد. درختان کاملاً رشد یافته و کامل از این گونه تا ۲۳ کیلوگرم شیرابه تولید می‌کنند. این درخت در هر بار شیرابه‌گیری، شیرابه بیشتری نسبت به هوآ تولید می‌کند ولی شیرابه آن به غلظت شیرابه هوآ نیست و از طرفی نمی‌توان این گونه را در سال‌های اولیه شیرابه‌گیری کرد، در حالی که درخت هوآ خیلی زودتر مورد شیرابه‌گیری قرار می‌گیرد. شیرابه درخت کاستیلا از شیرابه هوآ پیچیدگی شیمیایی بیشتری دارد و میزان رزین آن زیاد است؛ به‌ویژه در درختان دو ساله تا ۴۲ درصد رزین در شیرابه آن‌ها یافت می‌شود که با بالا رفتن سن درخت، این مقدار تنزل می‌یابد. میزان مواد پروتئینی شیرابه این درخت بسیار بیشتر از شیرابه هوآ است و همین موضوع موجب بروز مشکلاتی در انعقاد شیرابه آن می‌شود. رنگ شیرابه این درخت بر خلاف درخت هوآ یکدست سفید است و تغییرات رنگ در آن دیده نمی‌شود، اما رنگ سفید شیرابه در مجاورت هوا تیره می‌شود. شیرابه کاستیلا از جهاتی بر شیرابه هوآ برتری دارد که از آن جمله می‌توان قابلیت حمل و نگهداری آن برای مدت نسبتاً طولانی را بدون نیاز به عملیات منعقدسازی نام برد. در حالی که شیرابه هوآ را باید قبل از نگهداری برای مدت طولانی یا حمل به نقاط دوردست حتماً منعقد کرد. عقیده عمومی بر این است که شیرابه کاستیلا تا یک ماه بدون هیچ تغییر اساسی قابل نگهداری است. درختان جنس کاستیلا پس از هوآ مهم‌ترین درخت تولیدکننده کائوچوی طبیعی است و همانند هوآ گیاهی کاملاً گرمسیری بوده و فقط در نواحی مرطوب، پر باران و گرم مناطق استوایی می‌روید [۲].

گره‌ها به درخت امکان می‌دهد که دوره‌های طولانی خشکی و کم آبی را به‌خوبی تحمل کند. این درخت در شمال ویتنام و لائوس در اجتماع نسبتاً انبوه طبیعی به‌ویژه در شیب زیاد دامنه کوه‌ها که آب باران نمی‌تواند ذخیره شود، دیده می‌شود و بهترین رشد و نمو درخت در همین شیب‌ها صورت می‌پذیرد. این درخت مقاوم به شرایط نامساعد محیطی بوده و معمولاً خاک‌های آهکی را ترجیح می‌دهد. هر درخت شیرابه فراوانی تولید می‌کند و رنگ شیرابه آن زرد مایل به قهوه‌ای و در اصطلاح به رنگ شیر قهوه است. میزان کائوچوی شیرابه تا ۴۲ درصد می‌رسد. شیرابه تازه سریعاً منعقد شده و کائوچویی به رنگ قهوه‌ای مایل به خاکستری به دست می‌دهد. هر چند شیرابه خودبه‌خود و سریعاً منعقد می‌شود، اما افزودن محلول یک درصد اسیدسولفوریک به آن برای انعقاد و تشکیل دلمه (*Coagulum*) موجب می‌شود که کائوچویی با کیفیت بسیار عالی به دست آید. هر واحد اسیدسولفوریک می‌تواند حدود شش واحد شیرابه را منعقد کند و باید در موقع افزودن اسید به شیرابه، عمل هم زدن انجام شود تا کائوچوی حاصله همگن و یکدست باشد. انعقاد شیرابه با اسیداستیک مطلوب نیست و کائوچوی حاصل فاقد کیفیت مناسب است. انعقاد با اسیدهیدروکلریک، کائوچویی با کشسانی کمتر از محصول به‌دست‌آمده از انعقاد خودبه‌خود یا انعقاد با اسیدسولفوریک تولید می‌کند. گزارش شده است که کائوچوی این درخت از بهترین کائوچوی حاصل از هوآ غیرقابل تشخیص است [۲].

۲-۳ کاستیلا (*Castilla*)

جنس کاستیلا متعلق به خانواده توت بوده و تاکنون ۱۰ گونه از آن شناسایی شده است که همگی در آمریکای مرکزی و جنوبی در نواحی گرمسیری (حاره) از جنوب مکزیک تا بولیوی و برزیل (دره آمازون) می‌رویند. درختان این جنس در حالت رشد کامل تنومند و بلند بوده و همگی حاوی شیرابه هستند. تنوع بسیاری در کمیت و کیفیت کائوچو و صمغ حاصل از شیرابه آن‌ها در بین گونه‌ها دیده می‌شود. گونه‌های این جنس به ندرت تشکیل جنگل به معنای واقعی آن را می‌دهند، اما هیچگاه در دشت‌های پوشیده از علف و فاقد درخت دیده نمی‌شوند. رویشگاه طبیعی آن‌ها در بخش‌های باز و نقاط کم درخت جنگل‌های بکر و دست‌نخورده است. در این نقاط معمولاً با درختان جنس سرکوپیا (*Cercopia*) مخلوط هستند یا در زمین‌های آبرفتی مسطح کم درخت و حاصلخیز اعماق دره‌ها وجود دارند. سامانه ریشه درختان این جنس مرکب از ریشه‌ی اصلی و قطوری است که مستقیماً در زمین فرو می‌رود

دنیا وجود دارند. علت انتشار وسیع و سریع این گیاهان در نقاط مختلف جهان، وجود کائوچوی با کیفیت عالی در آن‌ها و نیز استفاده از آن‌ها به عنوان گیاه زینتی بوده است [۳].

۲-۷ استبرق: کالوتریس پرسرا (Ai-) *Calotropis procera* (ton) R. Br. 1811

استبرق یکی از گیاهان کائوچویی ایران است و متعلق به خانواده آسکله پیاداسه است. اسامی رایج گیاه در نواحی مختلف جنوب ایران عبارتند از: استبرق در فارس، غلبلب در شوشتر و دزفول، عوشر و عوشر در اهواز و غیره. این گیاه در نواحی گرمسیری کشور از خوزستان تا بلوچستان گسترش دارد و در مناطقی که ارتفاع آن‌ها از سطح دریا تا ۱۱۰۰ متر است، یافت می‌شود. استبرق درختچه‌ای است به بلندی ۲ تا ۴ متر، با تنه پوشیده از پوسته چوب پنبه‌ای چاکدار، شاخه‌های آن قطور و شاخ و برگش گوشتی و حاوی شیرابه سفید رنگ است. استبرق در مناطق گرم و خشک آسیا به ویژه هندوستان، پاکستان، ایران تا سواحل شرقی دریای مدیترانه و در مناطق گرمسیری و نیز شمال آفریقا انتشار دارد. همچنین آن را به استرالیا و شمال شرق برزیل برده و کشت کرده‌اند. اطلاعات اکولوژیک در مورد استبرق ناچیز و اندک است، ولی با توجه به شرایط رویش آن در نواحی جنوبی ایران، می‌توان گفت که استبرق مخصوص نواحی گرم و خشک بوده و در هر خاکی از جمله خاک‌های فرسایش یافته و نیز روی تپه‌های شنی و در ریگزارها می‌روید و رشد کافی دارد. به‌طور کلی در شرایط خشکی زیاد، خیلی مقاوم است. معمولاً در مناطقی که سالانه بین ۱۰۰ تا ۴۰۰ میلیمتر باران دارند، رویش مناسبی دارد. ظاهراً تکثیر استبرق هم توسط بذر و هم پاجوش صورت می‌گیرد. استبرق در مناطق مختلف موارد استفاده گوناگونی دارد و از شیرابه آن نوعی کائوچوی غیرکشسان مانند گاتا پرچا (Gut-ta Percha) به دست می‌آید. در هر حال به دلیل سمی بودن این شیرابه و واکنش‌های حساسیتی که در پوست بدن ایجاد می‌کند، مثل سایر گیاهان کائوچویی رواج چندانی نیافته است [۴].

۲-۸ افوریا (Euphorbia)

نام فارسی این گیاه فرفیون است. این گیاه دارای بیش از ۲۰۰ گونه شناخته شده است که عده‌ای از آن‌ها یکساله و علفی و بعضی‌ها چند ساله و به صورت درختچه یا درخت هستند. برخی از گونه‌های مهم فرفیون عبارتند از: افوریا آبی سی نیکا، افوریا آنتی کوئوروم، افوریا بالسامی فرا، افوریا کاندل باروم، افوریا کالی کولاتا، افوریا این تی زی و افوریا لاریکا. در بین این گونه‌ها حتی گونه‌های گوشتی دیده می‌شود که

۲-۴ کن دریل لا (Chondrilla)

این جنس متعلق به خانواده کمپوزیته (Compositae) است و دو گونه آن حاوی کائوچو است. این دو گونه عبارتند از: کن دریل لا پاوسی فلورا (*C. pauciflora* Lbd) و کن دریل لا آمبی گوآ (*C. ambigua* Fisch). این دو گیاه دارای مقدار قابل ملاحظه‌ای کائوچو در پوست ساقه‌ها و شاخه‌ها و به همان اندازه در ریشه‌هاست. ویژگی این گیاهان که در گیاهان دیگر دیده نمی‌شود، تراوش زیرزمینی شیرابه از ریشه‌های آن‌ها در اثر حمله نوعی حشره است که در اثر این تراوش مقداری کائوچو در خاک اطراف ریشه‌ها جمع می‌شود. میزان کائوچوی موجود در شاخه‌های این گیاهان ۱ تا ۱/۵ درصد و رزین آن‌ها ۹/۵ تا ۱۰ درصد است. استخراج کائوچو از گیاه با جدا کردن پوست از چوب صورت می‌گیرد. تولید کائوچو در این دو گیاه از جهات مختلف اصولاً قابل توجه نیست [۳].

۲-۵ کلی تاندرا (Clitandra)

چندین گونه از این جنس متعلق به خانواده آپوسی ناسه (Apocynaceae) بوده و در کشورهای آفریقایی مانند کنگو، سیرالئون، آنگولا، ساحل عاج، لیبیا، نیجریه، اوگاندا و جنوب زامبیا برای تهیه کائوچو مورد بهره‌برداری محلی قرار می‌گیرند. از جمله گونه‌های این جنس می‌توان کلی تاندرا الاستیکا (*C. elastica* A. Chev) را نام برد که گیاهی علفی و بالا رونده است. با وجود کیفیت خوب کائوچوی گونه‌های این جنس، هیچکدام قابل کشت نیستند [۳].

۲-۶ کریپتواستگیا (Cryptostegia)

این جنس در خانواده آسکله پیاداسه (Asclepiadaceae) جای دارد و دارای دو گونه مهم است که کائوچویی با کیفیت بسیار عالی تولید می‌کنند. برخی از گونه‌های مهم این جنس عبارتند از: کریپتواستگیا گراندی فلورا *Cryptostegia grandiflora* R.Br. ((Roxb.) و کریپتواستگیا ماداگاسکارنسیس (*Cryptostegia madagascarensis* Boj) هر دو گونه نامبرده شده احتمالاً بومی ماداگاسکار بوده و از آن جا به نقاط دیگر جهان راه یافته‌اند. پخش و انتشار این دو گونه در نقاط دیگر دنیا در قرون نوزدهم و بیستم به سرعت انجام گرفت و هم اکنون در نقاط و کشورهای زیادی از جمله مصر، موزامبیک، زامبیا، ماداگاسکار، هند، سریلانکا، مالزی، ویتنام، کامبوج، تایلند، بنگلادش، اندونزی، مکزیک، ایالات متحده آمریکا، پاناما، ونزوئلا، برزیل، کلمبیا، هائیتی، کوبا و غیره وجود دارند. این گیاهان تقریباً در سراسر قسمت‌های گرمسیری و نیمه گرمسیری

۲-۱۰ فون تومی یا (Funtumia)

این جنس شامل تعدادی گونه‌های درختی افریقایی متعلق به جنس آپوسی ناسه است. مهم‌ترین گونه کائوچویی آن، فون تومی یا الاستیکا است که در گذشته به‌عنوان مولد کائوچو مورد بهره‌برداری قرار می‌گرفته است. در مقام مقایسه با هوا، این درخت در نواحی بسیار خشک‌تر از آنچه هوا نیاز دارد، می‌تواند زنده بماند و رشد کند و کمتر از هوا مورد هجوم حشرات قرار می‌گیرد. علاوه بر آن، به یک تا دو بار تیغ زدن در سال بیشتر نیاز ندارد و شیرابه آن به آسانی در اثر جوشاندن منعقد می‌شود. اما حدود بیست سال زمان لازم دارد تا به حداکثر رشد خود از نظر تولید برسد و حتی در این موقع نیز میزان شیرابه حاصله در مقایسه با هوا به صورت چشمگیری پایین‌تر است. از این نظر این درخت نمی‌تواند اقتصادی تلقی شود؛ مگر آنکه قیمت کائوچوی طبیعی گران‌تر از قیمت آن در حال حاضر بشود. این گیاه در حال حاضر برای ایران قابل توصیه نیست، اما کشت آزمایشی آن در نواحی جنوبی که قابل کاشت هوا نیست، می‌تواند مد نظر قرار گیرد [۴].

۲-۱۱ هوا (Hevea)

گونه‌های جنس هوا (از خانواده افوربیاسه) درختانی بومی جنگل‌های استوایی آمریکای جنوبی و مرکزی هستند. مهم‌ترین گونه این درخت که منبع اصلی برای تولید بازرگانی کائوچوی طبیعی است، هوا برزیلین سیس (Hevea Brasiliensis) نام دارد و بومی جنگل‌های بارانی آمریکای جنوبی و آمازون است. این درخت در حالت خودرو و وحشی تا ۳۶ متر بلندی دارد ولی بلندی درختان کاشته‌شده و اهلی از ۲۴ متر تجاوز نمی‌کند. درخت هوا شیرابه فراوانی تولید می‌کند و کیفیت کائوچوی آن که پارا رابر (Para Rubber) نام دارد، عالی است. همچنین شیرابه‌گیری از این درخت آسان است. همه این عوامل موجب شده است که کوشش‌های گیاه‌شناسان و متخصصان اصلاح نباتات و آگرونومیست‌ها و دیگر دانشمندان، عمدتاً به این درخت صرف شود. درخت هوا برزیلین سیس گیاه ویژه نواحی گرمسیری تروپیکال است. این درخت در انواع خاک‌ها می‌روید و مناسب‌ترین نواحی کشت آن، مناطق واقع بین خط استوا و عرض ده درجه شمالی و جنوبی است. برای کشت موفق هوا، وجود بهارهای مرطوب و به ویژه بارندگی منظم سالانه به میزان ۲۵۰۰ میلی‌متر، ضرورت اساسی و حیاتی دارد. این درخت در برابر سرما بسیار حساس است، به‌طوری‌که کشت آن در نواحی نیمه گرمسیر نیز معمولاً ناموفق است. در ایران نیز به‌علت محدودیت‌های این درخت امکان کشت آن مطلقاً وجود ندارد [۵].

شباهت به کاکتوس‌ها دارند. همگی آن‌ها در برابر خشکی مقاوم بوده و در نواحی خشک و نیمه‌خشک یافت می‌شوند. کلیه گونه‌های فریون دارای شیرابه سفید رنگ هستند که در موقع قطع برگ‌ها یا ساقه‌ها بیرون می‌ریزند و شامل موادی از نوع استرهای چهار حلقه‌ای دی ترپن نظیر فوربول (Phorbol)، اینگنول (Ingenol) و ترکیب‌های وابسته به آن‌ها هستند که تحریک‌کننده‌های شدید پوستی و مخاطی بوده و التهاب‌های شدید به‌ویژه در چشم و تاول روی پوست ایجاد می‌کنند. وجود این مواد و خواص نامطلوب آن‌ها عامل بزرگی در محدود کردن کاربرد این گونه‌ها به‌عنوان گیاهان مولد کائوچو، صمغ و غیره است [۴].

۲-۹ فیکوس (Ficus)

این جنس بزرگ متعلق به خانواده توت است و دارای گونه‌های بسیار بوده و در سطح وسیعی از مناطق گرمسیری و نیمه گرمسیری دنیا انتشار دارد. فقط گونه مهم حاوی کائوچوی طبیعی آن به نام فیکوس الاستیکا در گذشته در سطوح وسیع کشت می‌شده است که در رقابت با هوا به تدریج از میزان کشت آن کاسته شده و در حال حاضر جای خود را به‌طور کامل به گیاه اخیر داده است. این گونه یکی از قدیمی‌ترین گیاهان کائوچویی شناخته شده است و احتمالاً اولین گیاه بومی شرق است که ارزش بازرگانی از جهت تولید کائوچو داشته است. این درخت بزرگ از جهات مختلف از جمله قابلیت تولید کائوچو و روش‌های بهره‌برداری به کاستیلا شباهت دارد. شیرابه آن بسیار پایدار بوده و به‌مدت طولانی به‌صورت مایع باقی می‌ماند و منعقد نمی‌شود و برعکس شیرابه هوا، نیاز به ماده محافظ جهت جلوگیری از فساد ندارد. این درخت، مخصوص نواحی گرمسیری پر باران و جنگل‌های مناطق حاره است. معمولاً امروزه از آن به‌عنوان گیاه زینتی در منازل و گلخانه‌ها استفاده می‌شود. از جنس فیکوس دو گونه دیگر در ایران یافت می‌شود که حاوی شیرابه کائوچویی هستند، یکی درخت لول یا لور یا مکرزن است که تک درختانی از آن در نواحی جنوبی کشور از آبادان تا چابهار (باغ طیس) دیده می‌شود. شرایط آب و هوایی جنوب برای کشت وسیع آن مساعد نیست و میزان شیرابه به دست آمده و کیفیت آن در حد اقتصادی نیست؛ از این رو برای ازدیاد و توسعه کشت توصیه نمی‌شود. گونه دیگر، انجیر معابد است که آن هم چون درخت مکرزن فاقد مشخصات گیاه کائوچویی اقتصادی است و توسعه کشت آن نیز به‌خاطر محدودیت‌های اقلیمی در جنوب کشور میسر نیست [۴].

۲-۱۲ لان دولفیا (Landolphia)

اکثریت قریب به اتفاق گیاهان این جنس متعلق به خانواده آپوسی ناسه هستند و به صورت درختچه‌های پیچنده و بالارونده بوده و از منابع مهم تولید کائوچوی طبیعی در همه نقاط گرمسیری افریقا به شمار می‌روند. تعداد گونه‌های حاوی کائوچوی این جنس در افریقا پنجاه و یک گونه برآورد شده که از این تعداد متجاوز از بیست گونه در روزگار رونق بازار کائوچوی طبیعی حاصل از گیاهان وحشی و خودرو، مورد بهره‌برداری قرار گرفته‌اند. مهم‌ترین گونه تولیدکننده کائوچوی این جنس در افریقا که گسترده‌ترین سطح انتشار را در این قاره دارد، لاندولفیا اووارین سیس (L. owariensis Beauv.) است و بیشترین میزان کائوچوی طبیعی از گیاهان وحشی را در افریقا تولید می‌کند. این درختچه در آنگولا، کنگو (زئیر)، داهومی، غنا، ساحل عاج، لیبیا، نیجریه، زامبیا، سیرالئون و توگو انتشار دارد و در سراسر این کشورها، گونه غالب را در بین گیاهان این جنس تشکیل می‌دهد، هر چند در نقاط دیگر افریقا گونه‌های دیگر لاندولفیا غلبه دارند. طبق بررسی‌های به عمل آمده در اوایل قرن بیستم، شیرابه این گیاهان دارای مقادیر متفاوتی کائوچو، از ۴ تا ۲۵ درصد وزن شیرابه تازه هستند. روش‌های استحصال و انعقاد شیرابه، بسیار متنوع است و از این رو کائوچوی به دست آمده نیز دارای کیفیت گوناگونی است. در هوای مرطوب و در فصل باران معمولاً جمع‌آوری شیرابه با تیغ‌زدن یا ایجاد شکاف در تنه این درختچه‌ها انجام می‌گیرد و شیرابه که در این حالت روان است در ظروف جمع‌آوری تعبیه شده در پایین هر شکاف می‌ریزد. ولی در فصل خشک، شیرابه مدت زمان کمی پس از جریان، منعقد و خشک می‌شود در این حالت استفاده از ظروف جمع‌آوری زاید است و تنها کافی است که شیرابه خشک شده از سطح تنه، کنده شده و جمع‌آوری شود. کیفیت کائوچوی این گیاهان خوب و میزان رزین شیرابه نسبتاً کم است [۵].

۲-۱۳ مانی هوت (Manihot)

جنس کوچکی از درختان آمریکای جنوبی از خانواده افوربیاسه است. درختان این جنس اغلب بومی نواحی خشک برزیل هستند و کشت آن‌ها در مناطقی که برای پرورش هوا خیلی خشک است، انجام می‌شود. تعدادی از گونه‌های این جنس، تولیدکننده نشاسته محسوب شده و بعضی از آن‌ها نیز شیرابه حاوی کائوچو دارند. مهم‌ترین گونه‌های مولد کائوچوی این جنس عبارتند از: مانی هوت گلازیوی ئی (Manihot glazioi) و مانی هوت دیکوتوما (Manihot dichotoma) (vii Mull-Arg Ule) [۵].

۲-۱۴ پارتینیوم آرژنتاتوم (Parthenium Argentatum)

نام رایج انگلیسی این گیاه گویول (Guayule) بوده و از خانواده آستراسه است. گویول درختچه کوچک بوته ماندنی است به بلندی ۰/۶ تا ۱/۵ متر، با ریشه‌ای قوی و گسترده و برگ‌های کوچک سبز مایل به نقره‌ای و گل‌های زرد تا زرد تیره. ریشه گویول گاه تا عمق ۶ متر در زمین نفوذ می‌کند و گسترش آن به اطراف قابل توجه و چشمگیر است. این گیاه عمری طولانی دارد و معمولاً بیش از ۳۰ سال و گاه تا ۵۰ سال زندگی می‌کند. گویول، بومی نواحی نیمه‌خشک و کویری مکزیک و تگزاس و به‌ویژه صحرای چی هوآهوان واقع در شمال کشور مکزیک و جنوب غربی ایالت تگزاس ایالت متحده آمریکا است. در صد سال گذشته به علت اهمیت گیاه از نظر تهیه کائوچوی طبیعی، گویول به خارج از ناحیه رویشگاه طبیعی‌اش برده شده و امروزه در بعضی کشورها مانند ایالت متحده آمریکا، استرالیا، اسرائیل، افریقای جنوبی، هندوستان، آرژانتین، ایتالیا و شوروی در قطعات کوچک آزمایشی زیر کشت است و امکان زراعت وسیع آن برای تولید کائوچو، صمغ و محصولات دیگر، مورد بررسی است. گویول در رویشگاه طبیعی‌اش در مکزیک و تگزاس در ارتفاع ۶۰۰ تا ۲۱۰۰ متری سطح دریا می‌روید. خاک محل رویش آن آهکی است، هر چند برای کشت گویول وجود مقادیر زیاد آهک در خاک ضرورت ندارد. این گیاه نمی‌تواند در خاک‌های اسیدی رشد کند، از این رو کشت گویول به خاک‌های غیر اسیدی با قابلیت نفوذ خوب منحصر می‌شود. گویول به ۲۵۰ تا ۳۸۰ میلیمتر باران سالانه نیاز دارد تا محصول رضایت‌بخش تولید کند. اگر بارندگی کمتر از ۲۵۰ میلی‌متر باشد، برای حصول عملکرد کافی، آبیاری ضرورت می‌یابد و در شرایط بارندگی بیش از ۶۴۰ سانتی‌متر، رشد رویشی ناخواسته موجب نقصان شدید محصول می‌شود. گویول به یخبندان مقاوم است، در رویشگاه طبیعی آن در تگزاس، سرمای تا ۲۱ درجه سانتی‌گراد زیر صفر را تحمل کرده و خشک نمی‌شود، اما سرمای ده درجه زیر صفر حداقل قابل تحمل برای گیاهان رشد یافته در شرایط زراعی است و دمای کمتر از این حد، صدمه شدید به زراعت گویول وارد می‌کند.

ازدیاد گویول با بذر صورت می‌گیرد، بذر گیاه قبل از کشت باید در محلول هیپوکلریت کلسیم قرار گیرد تا اثر عوامل بازدارنده جوانه‌زدن زدوده شود. بذر را می‌توان مستقیماً در مزرعه کاشت یا ابتدا در خزانه عمل آورد و سپس نهال‌های جوان را در مزرعه نشاء کرد. طریق اول اقتصادی‌تر و روش دوم مطمئن‌تر است. زراعت گویول به وجین نیاز دارد تا علف‌های هرز موجود در مزرعه که به آسانی زراعت را پوشانده و گویول را خفه می‌کند، از بین بروند.

۲-۱۵ اسکورزونرا (Scorzonera)

گونه‌هایی از این جنس در آسیای مرکزی می‌رویند و در این گونه‌های آسیایی، تنوع گسترده‌ای در شکل برگ‌ها، روش و طرز رشد و نمو و میزان رویش سالانه دیده می‌شود. مهم‌ترین گونه‌های مولد کائوچوی این جنس در درجه اول، تائو سقز (Tau-Saghyz) با نام علمی اسکورزونرا تائو-سقز و در درجه دوم، تکه سقز (Teke-Saghyz) با نام علمی اسکورزونرا آکاتوکلادا هستند. گونه‌های این جنس در کوهستان‌ها و دشت‌های مرتفع آسیای مرکزی تا شمال شرقی ایران، می‌رویند. کائوچوی موجود در این گیاهان، دارای کیفیت بسیار خوبی است و از طرفی هیچ گروه گیاهی نمی‌تواند به اندازه گونه‌های این جنس، کائوچو در خود ذخیره کند؛ به‌طوری که گونه‌های این جنس همگی دارای مقادیر زیادی کائوچوی طبیعی در اندام‌های خود و به‌ویژه در ریشه‌ها هستند. کلمه سقز در گونه‌های نامبرده شده به معنی همان ماده جویدنی شبیه آدامس است [۶].

۲-۱۶ تاراکساکوم (Taraxacum)

نام فارسی گیاهان این جنس گل قاصدک یا قاصدک است و در انگلیسی به آن‌ها داندلیون (Dandelion) گفته می‌شود. گیاهان جنس گل قاصد در سراسر اروپا، آسیا و آمریکای شمالی یافت می‌شوند. در بین گونه‌های این جنس از لحاظ تولید کائوچو، دو گونه مهم وجود دارد که به‌علت استفاده روس‌ها از آن‌ها برای تولید کائوچو، به نام قاصدک‌های روسی معروفند. این دو گونه شباهت بسیار به یکدیگر و همچنین به سایر انواع گل قاصد دارند، اما از نظر تکثیر و ازدیاد، مکان رویش طبیعی و همچنین نیازهای زراعی و پرورشی کاملاً متفاوت هستند. گونه کوک سقز گل قاصد تند رشد است و در طبیعت، در نواحی کوهستانی مرتفع که دارای سرمای سخت زمستانی و برف سنگین و نیز دارای تابستانی کوتاه است، یافت می‌شود. در حالی که گونه دیگر به نام کریم (Krim) سقز، گیاهی کندرشد با قابلیت انطباق خیلی زیادتر از گونه قبلی به زمستان‌های گرم‌تر (و حتی بیش از گل قاصد معمولی) است.

نام‌های روسی این دو گونه، مرکب از دو واژه است. کوک (Kok) که در زبان ازبکی به معنای ریشه است و سقز که یک کلمه فارسی (شاید از اصل ترکی) است و "کوک سقز" به معنای سقز حاصل از ریشه است. نام روسی گونه دیگر یعنی کریم سقز، به معنای سقز کریمه است و واژه کریم مصغر نام ناحیه کریمه، شبه‌جزیره معروف شمال دریای سیاه است [۷].

گواپول دارای شیرابه‌ای کائوچویی است که در باخته‌های پاران‌شیم ریشه و ساقه به‌صورت ذرات ریز (به اندازه ذرات شیرابه هوا) پراکنده است. این گیاه بر عکس هوا که با عمل تیغ‌زدن، شیرابه آن جمع‌آوری می‌شود، باید کل گیاه جمع‌آوری شده و طی مراحل کائوچوی آن استخراج شود. میزان کائوچوی تولیدی گواپول به‌طور معمول تقریباً ۱۰ درصد وزن خشک گیاه است، اما در رقم‌های اصلاح‌شده، عملکرد تا ۲۵ درصد نیز دیده می‌شود و اگر از مواد محرک شیمیایی ویژه‌ای استفاده شود، میزان کائوچوی استحصالی در مراحل اولیه رشد گیاه تا ۳۰ درصد وزن خشک گواپول، افزایش می‌یابد. کائوچوی گواپول، با اعمال روش‌های جدید تصفیه و حذف صمغ، کیفیتی عالی دارد و برای مصارف گوناگون از کائوچوی مصنوعی بهتر است و با کائوچوی طبیعی حاصل از هوا نیز رقابت می‌کند. میزان برداشت و استحصال کائوچو از هر هکتار ۱/۳ تا ۱/۷ تن در سال ثبت و رکوردگیری شده است. این میزان محصول کائوچو از مزارعی به دست آمده که آبیاری نیز در آن انجام شده است. گواپول زراعتی چندساله است و معمولاً بهترین زمان برداشت گواپول را ۳ تا ۵ سال پس از کاشت می‌دانند، اما بعضی منابع، برداشت را پس از ۷ سال توصیه می‌کنند. به نظر می‌رسد که از جهات مختلف به‌ویژه از نظر اقتصادی، برداشت محصول پس از ۳ و حداکثر ۵ سال، بهترین زمان است. نکته جالب این است که کائوچو به تدریج و با آهنگی کند در گیاه ذخیره می‌شود و نقصان و افت در کمیت و کیفیت آن حتی اگر بوته‌ها چندین سال در زمین بمانند و برداشت نشوند، ایجاد نمی‌شود. عملیات استخراج کائوچو از گواپول ساده و آسان است. ابتدا گیاهان برداشت‌شده را در آب داغ غوطه‌ور می‌کنند تا کائوچوی موجود در آن‌ها منعقد شود و نیز برگ‌ها و خاک‌های چسبیده به ریشه جدا شوند. سپس آن‌ها را آسیاب کرده و به‌صورت تفاله در می‌آورند و با کمک محلول سود سوزآور که تفاله یا گیاه آسیاب‌شده در آن غوطه‌ور است، کائوچو شروع به جدا شدن کرده و به سطح محلول می‌آید. پس از جمع‌آوری و شستشو به‌علت وجود صمغ زیاد (۲۰ تا ۲۵ درصد کائوچوی حاصل) محصول کائوچوی استحصالی را از ستون گرم عبور می‌دهند تا صمغ آن جدا شود. سپس آن را از پرس مارپیچی و متعاقباً از خشک‌کن (هوای داغ) عبور می‌دهند تا محصول مطلوب و خالص به‌دست آید. کائوچویی که به این ترتیب به دست می‌آید کیفیتی عالی دارد و از جهات گوناگون با بهترین کائوچوی حاصله از درخت هوا برابری می‌کند [۶].

۲-۱۶-۱ تاراکساکوم کوک ساقیز (Taraxacum Kok (saghyz Rodin

در اثنای جنگ جهانی دوم که بحران کائوچو به علت تصرف نهالستان‌های هوآی جنوب شرقی آسیا توسط نیروهای ژاپن به وجود آمد، ایالات متحده و شوروی کوشیدند با کشت گیاهان جانشین، به استحصال کائوچو پردازند و نیازهای خود را تأمین کنند. در آمریکا، آزمایش‌هایی بر روی گویول و کوک سقز آغاز شد و شوروی با کشت کوک سقز به مقابله با کمبود کائوچوی طبیعی برخاست. پس از پایان جنگ و ارزانی و فراوانی مجدد کائوچوی طبیعی، کشت این گیاهان متوقف شد و بیشتر اطلاعات موجود درباره این گیاهان از آن زمان باقی مانده است. در شوروی و آمریکا و سایر کشورهای جهان، مجدداً آزمایش‌هایی روی کشت این جنس آغاز شده است. کوک سقز گیاهی است چند ساله، ریشه آن عمودی و غالباً پیچ خورده و در شرایط کاشته شده بسیار منشعب است (در این حالت انشعاب‌های اصلی ریشه باز هم عمودی است). ریشه اصلی آن ۷۰ تا ۷۵ سانتی‌متر درازا دارد. هر گیاه معمولاً دارای ۳ تا ۸ ساقه گل‌دهنده است. حداکثر کائوچوی تولیدی گیاه در ریشه‌های آن متمرکز است و حد متوسط کائوچوی ریشه‌ها ۶ درصد است که با مطالعات انجام‌شده و انتخاب گونه‌های بهتر زراعی، این مقدار قابل افزایش بوده و رسیدن به مقادیر ۱۵ تا ۲۵ درصد محتمل دانسته شده است. در آزمایش‌های انجام‌شده در سوئد و اسپانیا روی انواع پرمحصول، ۱۵۰ کیلوگرم کائوچو در هر هکتار به دست آمده است. کوک سقز را به‌عنوان زراعت زمستانی در مناطق مساعد می‌توان کشت کرد. بدین ترتیب علاوه بر کشت بهاره، در مناطقی امکان کشت پاییزه گیاه نیز وجود دارد. زراعت کوک سقز زراعتی یک ساله است، یعنی کاشت تا برداشت در طول سال اول صورت می‌پذیرد. کشاندن زراعت به سال دوم معمولاً برای تهیه بذر و یا برداشت میزان بیشتری کائوچو در واحد سطح انجام می‌شود که معمولاً با مشکلات فراوانی همراه است. کوک سقز در خاک‌های غنی از هوموس محصول عالی تولید می‌کند. معمولاً خاک مناسب این گیاه، باید از جهت مواد آلی، ازت و اسیدفسفریک غنی باشد. بهترین pH خاک برای کوک سقز، معمولاً بین ۸ تا ۸/۵ است ولی گیاه در pH حدود ۵/۵ تا ۸/۵ رشد رضایت‌بخشی نشان می‌دهد. افزودن میزان معینی آهک به خاک و قلیایی کردن آن حتی تا pH معادل ۹/۳ نیز توصیه شده است. میزان مواد آلی (خاک برگ تا کود پوسیده دامی) در موفقیت کشت مهم است. هر چند این گیاه در محدوده گسترده‌ای از مواد آلی از ۲ تا ۹۰ درصد، می‌تواند رشد کند ولی معمولاً حد معقولی از مواد آلی (حداقل ۸ درصد) برای موفقیت

کشت لازم است.

آماده‌سازی زمین برای کشت بذر و رشد رضایتبخش ریشه‌ها، اهمیت بسیار دارد. شخم پاییزه برای کشت گیاه در بهار، توصیه شده است. از آن جا که بذر این گیاه خیلی ریز است و در هر کیلو از آن حدود سه میلیون بذر وجود دارد، برای کشت آن در مزرعه باید آماده‌سازی زمین و نرم کردن خاک، به نحو احسن صورت پذیرد. معمولاً بذر این گیاه، یک دوره استراحت و خواب دارد و قبل از کشت باید این دوره شکسته شود. یکی از روش‌های آماده‌سازی بذر برای کشت و شکستن خواب زمستانی آن، قرار دادن بذر در سرما، به مدت ۱۰ تا ۱۵ روز است.

از نظر تعداد بوته در هکتار و فاصله کاشت (فاصله ردیف‌ها و فاصله بوته‌ها با یکدیگر روی هر ردیف) دو روش وجود دارد: بوته زیاد در واحد سطح به‌میزان ۱۰۰ تا ۱۴۰ گیاه در متر مربع و تعداد بوته کم به‌میزان ۱۰ تا ۱۴ بوته در متر مربع. در حالت دوم ریشه‌ها بزرگ‌تر و حجیم‌تر می‌شوند، ولی آزمایش‌ها نشان داده است که تراکم زیاد بوته در واحد سطح در مقام مقایسه، مقدار بیشتری ریشه از نظر وزنی تولید می‌کند. کوک سقز در نقاطی که متوسط حرارت روزانه خیلی زیاد نباشد و گرمای شدید روزها برای مدت طولانی ادامه نداشته باشد و شب‌هایی نسبتاً خنک داشته باشد، نتیجه بسیار خوبی می‌دهد [۷].

۳ گونه‌های کائوچوی مناسب برای ایران

از بین گیاهانی که در بخش مهم‌ترین گیاهان کائوچویی دنیا مورد بحث قرار گرفت و معرفی شدند، چند گیاه برای کشت وسیع و استحصال انبوه کائوچو در ایران مناسب هستند و عده‌ای نیاز به بررسی‌های دقیق و برنامه‌ریزی شده دارند تا تناسب آن‌ها با شرایط کشور مشخص شود. عده‌ای از گیاهان معرفی شده نیز به علل مختلف قابل کشت و بهره‌برداری نیستند. برای سهولت بحث درباره گیاهان کائوچویی مناسب یا بالقوه مناسب برای ایران، آن‌ها را به دو گروه درختچه‌ای (مناسب برای نواحی نیمه گرمسیری جنوب کشور) و بوته‌ای یا علفی (مناسب کشت در اکثر نقاط ایران) تقسیم می‌کنیم [۸].

۳-۱ گیاهان مناسب برای نواحی جنوب ایران

گیاهانی که در خلال این پژوهش برای مناطق نیمه گرمسیری و معتدل جنوب و جنوب شرقی ایران مناسب تشخیص داده شده‌اند، همگی درختانی بزرگ یا حداقل به‌صورت درختچه بوده، به غیر از چند گونه که در همین نواحی به‌طور طبیعی می‌رویند یا از زمان‌های قدیم وارد شده و سازش یافته‌اند، بقیه بومی مناطق مختلف گرمسیر و نیمه‌گرمسیر جهان هستند [۸].

۳-۱-۱ بلیک رودا تونکی نن سیس

با وجود کم بودن اطلاعات درباره جوانب گوناگون این درخت بومی ویتنام و لائوس، مزایای چشمگیر آن، به‌ویژه کیفیت عالی کائوچو، مقاومت عالی درخت در برابر خشکی و کم‌آبی (به‌دلیل وجود گره‌های متورم روی ریشه‌ها به‌منظور ذخیره آب)، توانایی رویش مطلوب در خاک‌های آهکی و نیز در دامنه‌های با شیب زیاد، آن را برای کشت در بسیاری از نواحی جنوب مناسب و واجد ارزش معرفی می‌کند. به نظر می‌رسد این درخت می‌تواند در مناطقی نظیر نواحی کوهستانی بلوچستان (تنگ‌سرحه، بزمان، جنوب جازموریان، بشاگرد، دامنه‌های گوهرکوه و غیره)، جیرفت، اسفندقه، رودان، شیب‌های جنوبی جبال بارز و نظایر آن‌ها در هرمزگان، کرمان، جنوب فارس، کهکیلویه و بویر احمد و شمای خوزستان به‌عنوان درختی با ارزش از جهت تولید کائوچو، تثبیت خاک، ایجاد پوشش سبز و ممانعت از فرسایش و تولید چوب، به‌صورت جنگل‌های دست‌کاشت مورد توجه قرار گیرد، به شرطی که قبل از اقدام به کشت وسیع، اطلاعات کافی در مورد میزان تحمل درخت در برابر سرما، شیوه ازدیاد، میزان سازش با محیط، بهترین روش شیرابه‌گیری و غیره به‌دست آید [۹].

۳-۱-۲ مانی هوت

مانی هوت گلازیووی و مانی هوت ماداگاسکارنسیس، هر دو گونه این جنس به‌دلیل مقاومت خوب در برابر خشکی طولانی محیط و کیفیت خوب کائوچوی تولیدی و نیز خوراکی بودن ریشه‌های متورم آن‌ها که حاوی نشاسته هستند و همچنین امکان تولید مقادیر کافی روغن «سکاتیف» از دانه‌های این درختان، برای کشت در استان‌های جنوبی کشور، مناسب به نظر می‌آیند [۹].

۳-۱-۳ کریپتواستگیا

دو گونه این جنس یعنی کریپتواستگیاگراندی فلورا و کریپتواستگیا ماداگاسکارنسیس، هم‌اکنون در بسیاری از نقاط گرمسیر، نیمه‌گرمسیر و معتدل جهان به‌عنوان گیاه زینتی و گاهی به‌عنوان گیاه روغنی کشت می‌شوند. از مهم‌ترین مزایای این درختان، توان مطلوب رویش آن‌ها در شرایط گوناگون اقلیمی از صحرای خشک تا نواحی گرم و پر باران است. با توجه به حصول بیشترین رشد در نواحی واجد شرایط ۱۷۰۰ تا ۲۰۰۰ میلی‌متر باران سالانه و امکان آبیاری گیاه در نواحی خشک‌تر، مقاومت نسبی در برابر سرما (در ۸ درجه زیر صفر ریشه‌ها سالم می‌مانند اما بخش‌های هوایی گیاه می‌میرند) و تحمل فراوان در حرارت زیاد، برای کشت در مناطقی از جنوب کشور که

آب کافی دارند، قابل توصیه می‌کند. از جمله میناب، نواحی اطراف رودخانه باهو کلات، اطراف رودخانه‌های موند (قره‌آج) در جنوب فارس، کهکیلویه و بویر احمد و به‌ویژه نواحی مختلف خوزستان (به‌علت وجود آب فراوان) تا حدود دالکی و شبانکاره و دیلم و گناوه و مناطقی نظیر آن‌ها و نیز از غرب مازندران تا گیلان [۱۰].

۳-۱-۴ لاندولفیا

از بین گونه‌های این جنس، تنها گونه *Landolphia Heudelotia* می‌تواند در شرایط خشکی و کمی آب، رشدی رضایت‌بخش داشته باشد. میزان شیرابه آن زیاد است و برای نواحی خشک بلوچستان، بم و نرماشیر، جیرفت، جازموریان، جنوب فارس و خوزستان می‌توان این گیاه را توصیه کرد و به توسعه و تعمیم آن در مناطق یادشده امیدوار بود [۱۰].

۳-۱-۵ افوریا

مهم‌ترین مشکل گونه‌های این جنس، وجود شیرابه سوزان و تاول‌زای آن‌هاست که به‌صورت عاملی بازدارنده مانع از توسعه کشت آن شده است. بهترین گونه مولد کائوچوی این جنس، *E.intisy* است که کیفیت کائوچوی به‌دست‌آمده از آن عالی و میزان تولید شیرابه آن نیز چشمگیر است. ازدیاد این درخت با بذر به سهولت انجام می‌شود که این نیز از مزایای گیاه است. این گیاه به احتمال زیاد با شرایط جنوب کشور سازگاری خواهد داشت [۱۱].

۳-۱-۶ سایبوم

از این جنس تنها دو گونه ممکن است با شرایط ایران سازگار باشد. گونه *S. verum* به‌علت تولید شیرابه زیاد و رویش در ارتفاعات، می‌تواند برای نواحی کوهستانی جنوب که دارای آب کافی هستند، نظیر شمال میناب، رودان، جیرفت، ارتفاعات و دامنه‌های راسک، سرباز و غیره توصیه می‌شود. گونه دیگر این جنس، *S. stylare* نیز می‌تواند همراه با گونه قبلی وارد شده، مورد آزمایش قرار گیرد. علاوه بر گیاهان اشاره شده، تعدادی درخت و درختچه در جنوب کشور می‌رویند که مورد بررسی قرار گرفته‌اند و از بین آنان برای مناطق گرمسیر جنوب (مناطق خرماخیز) گونه‌های زیر به‌ترتیب اهمیت توصیه شده‌اند [۱۱]: *Pergularia tomento*، لباشیر (-)، *Euphorbia larica*، بیدار (*Euphorbia tirucalli*)، استبرق یا کرک (*Calotropis*)، *sa*، *(procera)*.

۳-۲ گیاهان مناسب برای نواحی معتدل و سردسیر ایران

گیاهان مناسب این نواحی، همگی علفی و یک ساله یا چند ساله هستند و به صورت زراعت‌های یک تا پنج ساله کشت می‌شوند. در بین این گیاهان دو گونه گویول و کوک سقز قابلیت کشت در بسیاری از استان‌های کشور را دارند و توان بالقوه تولید کائوچوی آن‌ها، می‌تواند نیازهای کائوچوی کشور را با رعایت شرایطی، مرتفع سازد. این گیاهان می‌توانند به مقدار فراوان، کائوچوی با کیفیت عالی در اندام‌های خود ذخیره کنند، اما استخراج کائوچوی آن‌ها بر خلاف هوأ با تیغ‌زدن امکان پذیر نیست؛ بلکه باید کلیه اندام‌های گیاه را درو و برداشت کرد و با انجام سلسله عملیاتی، کائوچوی آن‌ها را استخراج کرد. متخصصان کشاورزی کشور بر این باورند که با کشت دو گیاه گویول و کوک سقز در سطوح وسیع، تولید کائوچو در اندازه‌های خودکفایی به شرط رعایت اصول علمی و عملی زراعی کاملاً ممکن و میسر است [۱۲].

۳-۲-۱ پارتینوم آرژنتاتوم یا گویول

در سال‌های قبل از جنگ جهانی دوم، مقداری بذر گویول توسط وزارت کشاورزی از مکزیک تهیه شد و در نواحی شمال و جنوب کشور به صورت آزمایشی کشت شد و نتایج حاصل رضایت‌بخش اعلام شد. با شروع جنگ و اشغال ایران، این مزارع آزمایشی نیز معدوم شدند. گویول گیاه بسیار با ارزشی است و کشت آن از جهات مختلف در ایران می‌تواند موفقیت‌آمیز باشد. کشت گویول تقریباً در تمام نقاط شمال، شمال شرق، شمال غرب، غرب، جنوب غربی، مرکزی، کرمان، شمال فارس و خلاصه هر کجا که آب کافی برای آبیاری و خاک مناسب وجود داشته باشد امکان‌پذیر است. کشت گویول از نظر اقتصادی نیز کاملاً توجیه‌پذیر است [۱۲].

۳-۲-۲ تاراکساکوم کوک ساقیز

کوک سقز یا قاصدک روسی مانند گویول در زمان جنگ جهانی دوم در سطح ۸۰۰۰۰۰ هکتار در شوروی و در سطحی بسیار کمتر در آمریکا زیر کشت رفت و مقادیر قابل‌ملاحظه‌ای کائوچو از آن به دست آمد. کوک سقز گیاه با ارزشی از نظر تولید کائوچوی با کیفیت عالی و نیز بازده اقتصادی است. این گونه از نواحی کوهستانی و دشت‌های مرتفع خراسان تا آذربایجان، کردستان، کرمانشاه، همدان، لرستان، بختیاری، کرمان و شمال فارس قابل کشت و بهره‌برداری است. این گیاه نیز در ایران سابقه کشت آزمایشی دارد و در سال‌های قبل از جنگ در کرج، لاهیجان، کلاردشت و گرگان به صورت آزمایشی کشت شده و

طبق گزارش‌ها نتیجه مطلوب داده است ولی بر اثر اشغال ایران توسط نیروهای بیگانه، دنباله کار رها شده است. کوک سقز زراعتی کم هزینه است و علاوه بر آن کشت دیم آن در بسیاری مناطق مانند دشت کالپوش، امکان‌پذیر است. کوک سقز نیز مانند گویول، محصولات جنبی با ارزشی می‌تواند تولید کند و در مجموع، کشت این گیاه در ایران در سطوح وسیع امکان‌پذیر است، به ویژه در نقاطی که گویول به علت شرایط نامساعد، نمی‌تواند چندان موفق باشد. از این رو به نظر کارشناسان، مطالعه جدی و وسیع درباره این گیاه و گونه دیگر این جنس (کوک سقز) و ایجاد مزارع آزمایشی از آن‌ها ضرورت دارد. درباره این گیاهان و نحوه کشت و زرع و استحصال کائوچو از آن‌ها اطلاعات بسیاری در اختیار کارشناسان کشاورزی قرار دارد [۱۲].

۳-۲-۳ اسکورزونرا تائو ساقیز

گیاه تائو سقز بیش از هر گیاهی در جهان، کائوچوی طبیعی در خود ذخیره می‌کند، به طوری که تا ۴۱/۶ درصد کائوچو نسبت به وزن خشک گیاه، گزارش شده است. این گیاه بسیار با ارزش است؛ اما هنوز اطلاعات کافی در مورد آن وجود ندارد. این گیاه در مناطقی که کوک سقز امکان رشد دارد، می‌تواند کشت شود. گزارش شده که تثبیت آن به عنوان گیاه زراعی از کوک سقز مشکل‌تر است و به علاوه برای ذخیره‌سازی حداکثر کائوچو در ریشه‌ها، به پنج سال زمان نیاز دارد. این گیاه به شرط بررسی کافی و رفع عیوب و محدودیت‌های آن، می‌تواند مهم‌ترین و بهترین گیاه کائوچویی برای مناطق مساعد در ایران باشد. نکته‌ای که در پایان باید مطرح شود، موضوع کشت هوأ و کاستیلا در ایران است. هر چند هوأ بهترین منبع تهیه کائوچو در دنیاست ولی به علت عدم وجود شرایط ویژه، رشد مطلوب آن که منحصراً در کمربند باریکی از خط استوا تا ۱۰ درجه و حداکثر ۱۵ درجه عرض جغرافیایی موجود است، در ایران وجود ندارد. همچنین امکان کشت کاستیلا نیز در ایران وجود ندارد و به طور قاطع، می‌توان گفت که هر گونه کوششی در این راه بی‌حاصل است. کارشناسان کشاورزی بعید نمی‌دانند که درخت هوأ یا کاستیلا بتواند در ایران کاشته شود و زنده بماند، اما کشت وسیع این درختان و استحصال کائوچو به میزان قابل توجه از آن‌ها مسلماً ممکن نخواهد بود. با توجه به عدم امکان کشت هوأ و کاستیلا و حتی فیکوس الاستیکا در کشور، باید تمام تلاش‌ها در راه تثبیت سایر درختان و درختچه‌های مناسب برای ایران از جمله کشت وسیع گویول و در درجه بعدی کوک سقز و تائو سقز به کار برده شود، که اگر موفقیتی

باشد از همین راه خواهد بود [۱۲].

نتیجه‌گیری

با توجه به امکان تولید انواعی از کائوچوی طبیعی در ایران از بین گیاهان معرفی شده، چند گیاه برای کشت وسیع و استحصال انبوه کائوچو در ایران مناسب بوده و برخی نیز به بررسی‌های دقیق‌تر و برنامه‌ریزی شده‌تری نیاز دارند تا تناسب آن‌ها با شرایط آب‌وهوایی کشور بیشتر مشخص شود. این گیاهان به دو گروه درختی و درختچه‌ای (مناسب برای نواحی نیمه‌گرمسیری جنوب کشور) و بوته‌ای یا علفی (مناسب کشت در اکثر نقاط ایران به‌ویژه نواحی شمالی کشور) تقسیم‌بندی شده‌اند. گیاهان مناسب نواحی جنوب ایران عبارتند از: بلیک رود آتونکی نن سیس، مانی هوت، کریپ تواستگیا، لاندولفیا هوی دلوتی، افوریا، فنتومیا الاستیکا و سایپوم. همچنین گیاهان مناسب نواحی

معتدل و سردسیر عبارتند از: گویول، تاراکساکوم کوک سقز یا قاصدک روسی و اسکورزونه راتائو سقز. بنابراین با توجه به تحقیقات انجام‌شده توسط گروه‌های تحقیقاتی و نیز توضیحات ارائه شده در این پژوهش، کشت و استحصال درخت هوآ که مرغوب‌ترین شیرابه و بالطبع مرغوب‌ترین کائوچوی طبیعی را به‌دست می‌دهد، در ایران امکان‌پذیر نبوده ولی گونه‌های دیگری که بی‌تردید می‌توانند بخشی از نیاز کشور را جابگو باشند در کشور قابل استحصال هستند.

قدردانی

این پژوهش با حمایت مالی شرکت طنین پیک سبلان (تولیدکننده توپ‌های بتا) اردبیل به اجرا در آمده است. بدین وسیله از شرکت طنین پیک سبلان در راستای به ثمر رسیدن این پژوهش سپاسگزاری می‌شود.

مراجع

1. Venkatachalam P., Geetha N., Sangeetha P., Thulaseedharan A., Natural Rubber Producing Plants: An Overview, *African Journal of Biotechnology*, 12, 1297-1310, **2013**.
2. Hurley P. E., History of Natural Rubber, *Journal of Macromolecular Science: Part A – Chemistry :Pure and Applied Chemistry*, 15, 1279- 1287, **1981**.
3. Hayashi Y., Production of Natural Rubber from Para Rubber Tree, *Plant Biotechnology*, 26, 67–70 **2009**.
4. Mooibroek H., Cornish K., Alternative Sources of Natural Rubber, *Applied Microbiology and Biotechnology*, 53, 355-365, **2000**.
5. Bhattacharjee A., Bhowmik M., Paul C., Chowdhury B. D., Debnath B., Rubber Tree Seed Utilization for Green Energy, Revenue Generation and Sustainable Development– A Comprehensive Review, *Industrial Crops and Products*, 174, 114186, **2021**.
6. Silva M. J., Evaluation of the Physicochemical Properties of Natural Rubber from Hevea Brasiliensis Clones, *Industrial Crops and Products*, 171, 113925, **2021**.
7. Suryanarayanan T. S., From Forest to Plantation: A Brief History of the Rubber Tree, *Indian Journal of History of Science*, 58, 74–78, **2023**.
8. زرگری، علی، گیاهان دارویی، جلد سوم، انتشارات دانشگاه تهران شماره ۳/۱۳۹۰، ۱۳۵۲.
9. ثابتی، حبیب الله، بررسی اقلیم حیاتی ایران. انتشارات دانشگاه تهران. شماره ۱۲۳۱. ۱۳۴۸.
10. ثابتی، حبیب الله، جنگلها، درختان و درختچه‌های ایران. سازمان تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی، ۱۳۵۵.
11. طراز، منوچهر، : بررسی در اطراف مهم‌ترین گیاهان کائوچودهنده ایران. پایان نامه دانشکده داروسازی دانشگاه تهران، ۱۳۲۸.
12. شرکت مهندسی و تحقیقات صنایع لاستیک، : کائوچوی طبیعی؛ ساختمان، خواص و کاربردها، مرکز نشر سمر، ۱۳۷۶.



فصلنامه علمی
سال یازدهم، شماره ۱، شماره پیاپی ۴۱ بهار ۱۴۰۵
Vol. 11, No. 1 Issue No. 41
Autum 2025, Quarterly
صفحه ۳۹-۵۱

Iran Polymer Technology;
Research and Development

واژه‌های کلیدی:

چاپ سه‌بعدی اکستروژنی،
چاپ سه‌بعدی گرانولی
(FGF)،
پلیمرهای زیست‌سازگار.

مروری بر فناوری نوظهور چاپ سه‌بعدی گرانولی

عاطفه نژادابراهیم

قم، دانشگاه صنعتی قم، دانشکده فنی مهندسی، گروه مهندسی پلیمر

چکیده ...

چاپ سه‌بعدی گرانولی به‌عنوان یکی از فناوری‌های نوظهور در ساخت افزایشی اکستروژنی، به‌دلیل استفاده مستقیم از مواد اولیه گرانولی، به‌عنوان جایگزینی امیدبخش برای سامانه‌های متداول رشته‌محور مطرح شده است. حذف مرحله میانی تولید رشته، علاوه بر کاهش هزینه‌های فرایندی و مواد، موجب افزایش انعطاف‌پذیری در انتخاب مواد و توسعه ترکیبات پلیمری و کامپوزیتی متنوع می‌شود. این مزیت، چاپ گرانولی را به گزینه‌ای مناسب برای تولید قطعات مهندسی، ساختارهای زیست‌سازگار و کاربردهای بزرگ‌مقیاس تبدیل کرده است.

در این میان، عملکرد سامانه‌های گرانولی به‌شدت تحت تأثیر ویژگی‌های ماده اولیه و عوامل فرایندی قرار دارد. در کامپوزیت‌های پلیمری، نوع پرکننده، اندازه ذرات، مورفولوژی، نسبت ابعادی و کیفیت توزیع و پراکنش آن در ماتریس، از جمله عوامل کلیدی در تعیین رفتار رئولوژیکی، پایداری اکستروژن، چسبندگی بین‌لایه‌ای، دقت ابعادی و خواص نهایی قطعه چاپ‌شده به شمار می‌روند. بنابراین، طراحی موفق فرمول‌بندی‌های قابل چاپ، نیازمند درک ارتباط متقابل میان ساختار ماده، ویژگی‌های پرکننده و شرایط فرایند است.

این مقاله مروری به بررسی مبانی، مزایا، چالش‌ها و کاربردهای چاپ سه‌بعدی گرانولی پرداخته و آن را از منظر اقتصادی و فنی با چاپ سه‌بعدی رشته‌ای مقایسه می‌کند. همچنین، نقش پلیمرها و کامپوزیت‌های زیست‌سازگار، اثر مشخصات پرکننده بر چاپ‌پذیری و عملکرد قطعه و مهم‌ترین چالش‌های موجود در توسعه این فناوری مرور شده است. در پایان، مسیرهای آینده برای بهبود کیفیت چاپ، توسعه مواد پیشرفته و گسترش کاربردهای صنعتی و زیست‌پزشکی این فناوری ارائه می‌شود.

*پست الکترونیکی مسئول مکاتبات:

Nezhadebrahim@qut.ac.ir*

۱ مقدمه

فناوری چاپ سه بعدی (3D Printing) نخستین بار در دهه‌ی ۱۹۸۰ میلادی و با معرفی روش استریولیتوگرافی (Stereolithography) توسط چاک هال (Chuck Hull) وارد عرصه‌ی تولید شد و به سرعت به عنوان یکی از نوآوری‌های مهم در ساخت افزایشی (Additive Manufacturing) شناخته شد. ساخت افزایشی یا چاپ سه بعدی به عنوان یکی از فناوری‌های نوین، تحولی چشمگیر در حوزه تولید ایجاد کرده است [۱]. روش‌های مرسوم ساخت شامل فرآیندهایی مانند ساخت کاهشی (Subtractive Manufacturing) از جمله ماشین کاری CNC و همچنین روش‌های شکل دهی نظیر قالب گیری تزریقی (Injection Molding) و ریخته گری (Casting) هستند. این روش‌ها معمولاً زمان بر بوده، منجر به ایجاد ضایعات قابل توجهی از مواد می‌شوند؛ مسئله‌ای که هنگام کار با پلیمرهای با کارایی بالا به عنوان محدودیتی مهم مطرح می‌شود. افزون بر این، استفاده از این فرآیندها در بسیاری از موارد از نظر اقتصادی نیز مقرون به صرفه نیست [۲]. در مقابل، ساخت افزایشی به عنوان رویکردی نوین در تولید، مزایای قابل توجهی نسبت به روش‌های سنتی ساخت ارائه می‌دهد. در این فناوری، قطعات به صورت لایه به لایه ساخته می‌شوند که این امر ضمن کاهش مصرف و ضایعات مواد، امکان تولید ساختارهای پیچیده با دقت بالا را فراهم می‌کند. همچنین، کاهش مراحل فرآیند تولید در بسیاری از موارد موجب کوتاه تر شدن زمان ساخت شده، انعطاف پذیری بیشتری در طراحی و تولید قطعات ایجاد می‌کند. از دیگر مزایای مهم این فناوری می‌توان به قابلیت سفارشی سازی آسان و تولید قطعات متناسب با نیازهای اختصاصی اشاره کرد؛ ویژگی‌ای که در حوزه پزشکی، به ویژه در ساخت کاشتنی‌ها و تجهیزات اختصاصی بیمار، اهمیت ویژه‌ای دارد. به دلیل این مزایا، فناوری ساخت افزایشی در حوزه‌های مختلفی از جمله صنایع خودروسازی، نظامی، زیست پزشکی و کاربردهای بالینی مورد توجه گسترده قرار گرفته است. این فناوری در ابتدا عمدتاً برای نمونه سازی سریع در صنایع به کار می‌رفت، اما با توسعه روش‌های نوین چاپ و گسترش دامنه مواد قابل استفاده، کاربردهای آن به حوزه‌هایی نظیر مهندسی بافت، داروسازی، پزشکی بازساختی و حتی صنایع غذایی نیز گسترش یافت. امروزه، ساخت افزایشی به عنوان یکی از فناوری‌های پیشرو، امکان تولید قطعات و سازه‌هایی با هندسه‌های بسیار پیچیده، از جمله ساختارهای مبتنی بر آناتومی اختصاصی بیمار، را فراهم کرده، نقش مهمی در توسعه پزشکی شخصی سازی شده ایفا می‌کند [۳، ۴].

۲ چاپ سه بعدی

بر اساس استاندارد سازمان بین المللی استاندارد سازی (ISO 52900:2021)، فرآیندهای ساخت افزایشی یا چاپ سه بعدی به هفت دسته اصلی تقسیم می‌شوند؛ این دسته بندی‌ها که در شکل ۱ نشان داده شده‌اند، چارچوبی استاندارد برای شناخت و مقایسه فناوری‌های مختلف ساخت افزایشی فراهم می‌کنند. این دسته بندی، نمایی کلی از اصول عملیاتی فناوری‌های مختلف چاپ سه بعدی ارائه می‌دهد و هر یک از این دسته‌ها شامل چندین فناوری و روش چاپ متفاوت است. از میان این فناوری‌ها، برخی روش‌ها کاربرد گسترده تری در پژوهش‌ها و صنایع مختلف پیدا کرده‌اند. برای مثال، فناوری ساخت رشته ای ذوبی (Fused Filament Fabrication) یا مدل سازی رسوب ذوبی (Fused Filament Modelling) در دسته اکستروژن مواد (Material Extrusion) قرار می‌گیرد. همچنین فناوری‌های تفجوشی لیزری انتخابی (Selective Laser Sintering) و همجوشی چندجیتی (Multi Jet Fusion) از جمله روش‌های رایج در دسته همجوشی بستر پودر (Powder Bed Fusion) محسوب می‌شوند. در کنار این موارد، روش‌های مبتنی بر نور یعنی استریولیتوگرافی و پردازش نور دیجیتال (Digital Light Processing) در گروه پلیمری شدن نوری در مخزن یا حمامی (Vat Photopolymerization) از طریق پلیمری شدن نوری رزین‌های مایع شناخته می‌شوند (شکل ۱) و دقت سطحی بسیار بالایی دارند، در حالی که فناوری جت کردن مواد (Material Jetting) نیز به عنوان یکی دیگر از روش‌های شناخته شده در حوزه چاپ سه بعدی مطرح است [۵، ۶].

به طور کلی، روش‌های چاپ سه بعدی متنوع‌اند و هر کدام بر اساس نوع ماده و مکانیسم، ساز و کار ساخت ویژگی‌های خاص

ADDITIVE MANUFACTURING TECHNOLOGIES	Vat Photopolymerization
	Material Extrusion
	Material Jetting
	Binder Jetting
	Powder Bed Fusion
	Direct Energy Deposition
	Sheet Lamination

شکل ۱. تقسیم بندی فناوری‌های ساخت افزایشی (AM) طبق ۲۰۱۵: ISO/ASTM 52900 ساخت افزایشی - اصول کلی - اصطلاحات [۱].

رشته ذوبی (FFF)، ساخت افزایشی مبتنی بر پلت (Pellet Additive Manufacturing) و ساخت گرانول ذوبی (Fused Granular Fabrication). در میان این روش‌ها، فناوری FFF رایج‌ترین فناوری تجاری در حوزه چاپ سه بعدی پلیمرها محسوب می‌شود و از زمان معرفی آن در دهه ۱۹۹۰، کاربرد گسترده‌ای در صنایع مختلف یافته است. در این روش، رشته یا تار پلیمر گرم‌انرم از طریق سامانه تغذیه وارد محفظه ذوب شده، سپس ماده مذاب از افشانک خارج و به صورت لایه به لایه بر روی بستر ساخت رسوب داده می‌شود.

فناوری FDM به دلیل هزینه پایین، سهولت استفاده و دسترس پذیری بالا، در حوزه‌های متنوعی از جمله خودروسازی، هوافضا، طراحی صنعتی، آموزش و پزشکی مورد استفاده قرار گرفته است. این روش امکان استفاده از پلیمرهای گرم‌انرم مختلفی مانند Nylon، PETG، ABS، PLA و TPU را فراهم می‌کند و برای تولید نمونه‌های اولیه، قطعات سبک‌وزن، مدل‌های آناتومیک، داربست‌های مهندسی بافت و تجهیزات پزشکی سفارشی کاربرد دارد. همچنین، قابلیت تولید ساختارهای پیچیده و شخصی‌سازی آسان، این فناوری را به یکی از مهم‌ترین روش‌های ساخت افزایشی در پزشکی تبدیل کرده است [۸].

با وجود مزایای متعدد فناوری‌های مبتنی بر رشته، به‌ویژه FDM، با محدودیت‌هایی نیز همراه هستند. یکی از مهم‌ترین چالش‌ها، نیاز به رشته‌هایی با قطر یکنواخت و خواص پایدار است؛ زیرا تغییرات جزئی در قطر یا کیفیت رشته می‌تواند منجر به اختلال در جریان ماده و کاهش کیفیت چاپ شود. علاوه بر این، تولید رشته‌هایی کامپوزیتی حاوی نانوذرات، مواد زیست‌فعال یا پلیمرهای مهندسی‌شده، فرآیندی پیچیده، زمان‌بر و پرهزینه است و به تجهیزات اختصاصی نیاز دارد. بسیاری از پلیمرهای زیست‌سازگار و مواد مورد استفاده در کاربردهای پزشکی نیز به سختی به شکل رشته پایدار تبدیل می‌شوند که این موضوع دامنه استفاده از آن‌ها را محدود می‌کند. از سوی دیگر، هزینه بالاتر رشته نسبت به مواد اولیه گرانولی، سرعت تغذیه محدود و بهره‌وری پایین‌تر فرآیند، از دیگر محدودیت‌های این فناوری به شمار می‌روند [۹].

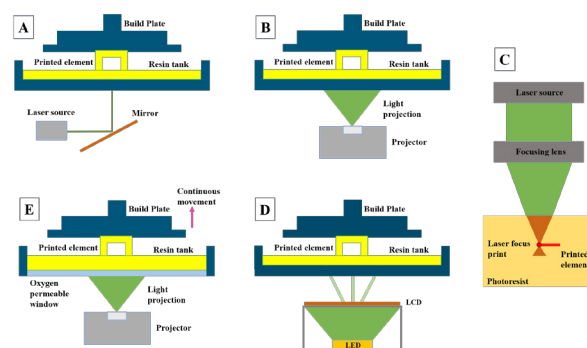
در همین راستا، فناوری‌های مبتنی بر گرانول یا نظیر PAM و FGF، به‌عنوان نسل جدیدی از روش‌های اکستروژنی مورد توجه قرار گرفته‌اند (شکل ۳). در این فناوری‌ها، به جای استفاده از رشته، مواد اولیه به صورت مستقیم و در قالب گرانول‌های پلیمری وارد سامانه اکستروژن می‌شوند. استفاده مستقیم از گرانول‌ها موجب کاهش هزینه مواد اولیه، افزایش سرعت چاپ، تسهیل استفاده از مواد کامپوزیتی و بازیافتی و همچنین

خود را دارند. روش‌های مبتنی بر پودر مانند SLM، SLS و EBM با استفاده از لیزر یا پرتو الکترونی پودرهای پلیمری و فلزی را ذوب یا تف‌جوشی می‌کنند و برای ساخت قطعات مقاوم و پیچیده مناسب‌اند. در کنار این‌ها، روش‌های جت‌کردن مواد مانند PolyJet با پاشش قطرات رزین یا هیدروژل امکان چاپ چند ماده به‌طور همزمان را فراهم می‌کنند و روش‌های ورقه‌ای مانند Sheet Laminating با برش و چسباندن لایه‌های ورقه‌ای سرعت بالایی دارند اما دقت کمتری ارائه می‌دهند. در میان همه‌ی این فناوری‌ها، روش‌های اکستروژنی جایگاه ویژه‌ای دارند، که در ادامه به آنها پرداخته می‌شود.

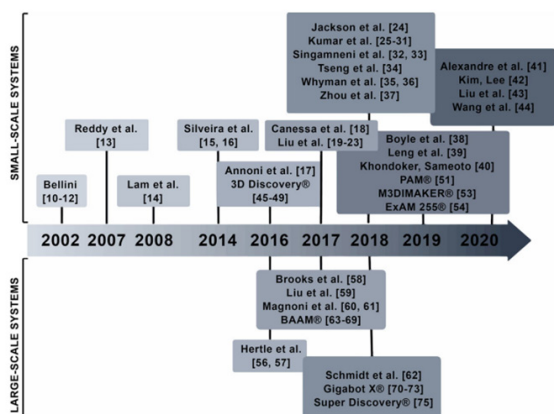
۳ فناوری‌های مبتنی بر اکستروژن

فناوری‌های مبتنی بر اکستروژن مواد (Material Extrusion)، یکی از پرکاربردترین و شناخته‌شده‌ترین دسته‌های ساخت افزایشی به شمار می‌روند و سهم قابل‌توجهی از بازار چاپ سه بعدی را به خود اختصاص داده‌اند. بر اساس یک نظرسنجی انجام‌شده در سال ۲۰۲۳، حدود ۵۶٪ از شرکت‌های فعال در حوزه چاپ سه بعدی از فناوری FDM/FFF استفاده می‌کنند، در حالی‌که سایر فناوری‌های پلیمری مانند SLS، SLA و MJF به ترتیب تنها ۲۰٪، ۱۰٪ و ۸٪ از بازار را در اختیار دارند. در روش‌های اکستروژنی، ماده اولیه پس از ذوب یا نرم شدن، از طریق افشانک اکستروود شده، به صورت لایه به لایه بر روی بستر ساخت رسوب داده می‌شود تا قطعه نهایی شکل گیرد. سادگی عملکرد، هزینه نسبتاً پایین تجهیزات، تنوع مواد قابل استفاده و امکان تولید قطعات پیچیده و سفارشی، از مهم‌ترین دلایل گسترش این فناوری در صنایع مختلف محسوب می‌شوند [۷].

فناوری اکستروژنی شامل روش‌های متعددی هستند که مهم‌ترین آن‌ها عبارت‌اند از مدل‌سازی رسوب ذوبی (FDM) یا ساخت



شکل ۲. روش‌های مختلف پلیمریزاسیون نوری حمامی: Two Photon Polymerization (C)، DLP (B)، SLA (A) و CLIPS (E و LCD) (D) [۵].

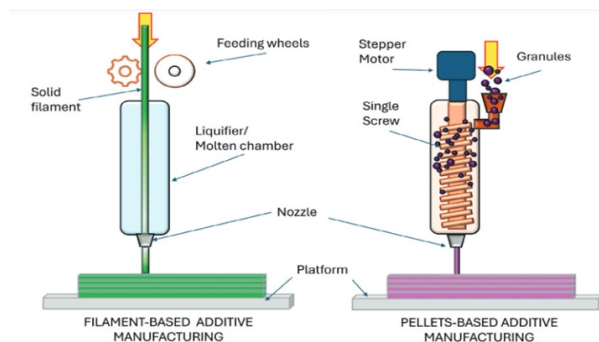


شکل ۴. نمودار زمانی توسعه چاپگرهای سه بعدی screw-assisted [۱۰].

سامان‌مند، نتو (Netto) و همکارانش در سال ۲۰۲۱، پژوهش‌های مختلف انجام شده در زمینه انواع چاپگرهای سه بعدی با استفاده از مواد خام پلیمری را تا سال ۲۰۲۰ از جهات مختلف بررسی و گزارش کرده‌اند [۱۰]. در میان نتایج سامان‌مند مختلفی که ایشان گزارش کرده‌اند، نمودار زمانی توسعه چاپگرهای سه بعدی پیچ‌ران (Screw Assisted) به صورت تجاری و تحقیقاتی را نمایش داده است (شکل ۴).

در سطح بین‌المللی نتایج این تلاش‌ها منجر به تولید دستگاه‌های پریتر سه بعدی با نام‌هایی نظیر Direct Pellet Extruder 3D Printing، Screw-Assisted 3D Printing، Fused Granular Fabrication شده است. طرحواره‌ای از انواع چاپگرهای گرانولی در شکل ۵ نشان داده شده است.

یکی از کاربردهای عمده و روبه‌رشد این فناوری در زمینه پزشکی است. چاپ سه‌بعدی امکان ساخت پروتزهای سفارشی را فراهم کرد که به‌طور مناسب با بدن هر فرد مطابقت داشتند. این فناوری‌ها به توسعه پروتزهای سه‌بعدی و سایر کاشتنی‌های پزشکی کمک کردند و امکان برنامه‌ریزی جراحی، آموزش و یادگیری مؤثرتر را فراهم کردند. کاشتنی‌های پزشکی، از جمله



شکل ۳. طرحواره فناوری‌های ساخت افزایشی اکستروژنی مبتنی بر رشته و گرانول [۹].

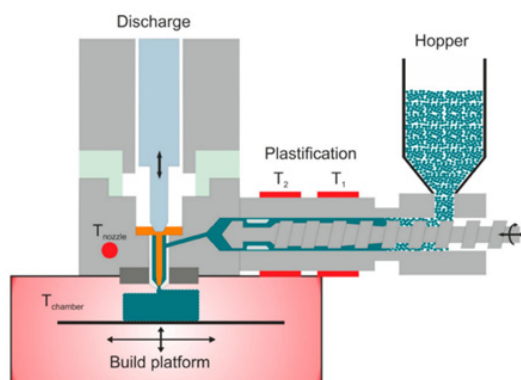
کاهش مراحل آماده‌سازی مواد می‌شود. به همین دلیل، چاپ سه‌بعدی گرانولی در سال‌های اخیر به‌عنوان رویکردی نوظهور و امیدوارکننده، به‌ویژه در کاربردهای صنعتی و پزشکی، مورد توجه گسترده پژوهشگران قرار گرفته است. در جدول ۱ مشاهده می‌شود که هزینه هر کیلوگرم ماده به‌صورت گرانول به‌طور میانگین ۵ تا ۱۰ برابر ارزان‌تر از رشته متناظر است. این اختلاف چشمگیر در هزینه مواد اولیه، یکی از اصلی‌ترین محرک‌های توسعه فناوری‌های اکستروژنی مبتنی بر گرانول نظیر PAM و FGF به‌ویژه در مقیاس صنعتی است [۹].

۴ چاپ سه‌بعدی مبتنی بر گرانول (PAM/FGF)

برای غلبه بر محدودیت‌های ذکر شده درباره روش مبتنی بر رشته، روش نوظهور مبتنی بر گرانول معرفی شده است. در این فناوری به جای رشته، از گرانول‌های پلیمری یا کامپوزیتی به‌طور مستقیم در فرآیند چاپ استفاده می‌شود. این رویکرد نه تنها مشکلات مربوط به تهیه رشته را برطرف می‌کند، بلکه هزینه‌ها را کاهش داده و امکان استفاده از ترکیبات متنوع‌تری را فراهم می‌آورد. محققان و صنعتگران تلاش‌های زیادی در راستای توسعه چاپگرها سه بعدی با قابلیت استفاده از مواد خام پلیمری به صورت درجا، به جای استفاده از رشته‌های پلیمری کرده‌اند. در یک مقاله مروری

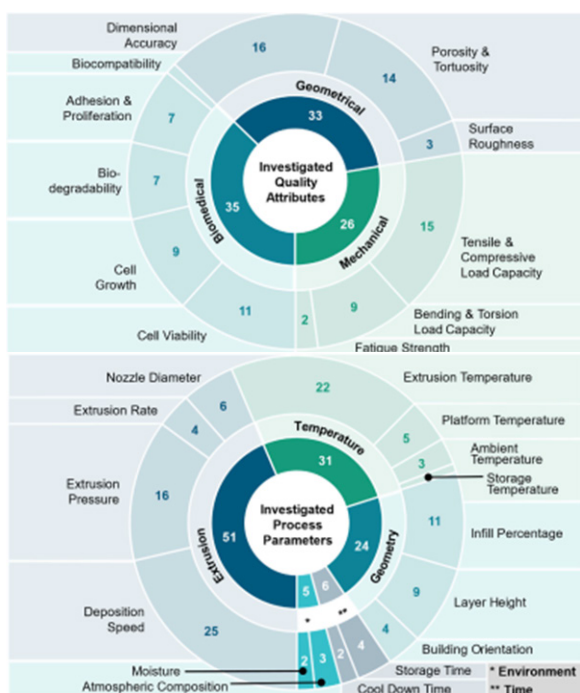
جدول ۱. مقایسه‌ای از قیمت مواد اولیه گرانول (Pellets) و رشته (Filaments) برای چند رزین متداول [۹].

Polymer	Pellets (per kg)	Filaments (per kg)
Polylactic acid (PLA)	15-30 \$	20-40 \$
Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS) Pellets	1-5 \$	15-35 \$
Polyamide (PA)	3 \$	100 \$
Polyetheretherketone (PEEK)	80E	500E
ULTEM 1000 و (Polyetherimide, PEI)	32E	270E

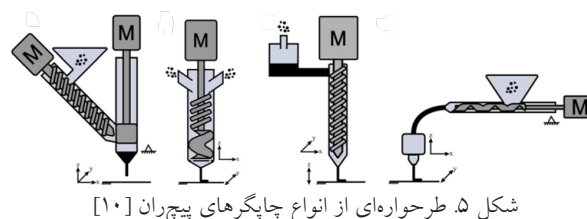


شکل ۶. طرحواره فرایند چاپ گرانولی در پژوهش کی و همکاران [۱۲].

نقطه مصرف (Point-of-Care) کمک کند. Janning و همکاران برای شناسایی الزامات فرایندی و کیفی در چاپ سه بعدی گرانولی داربست‌های پزشکی، مرور ساختاریافته‌ای ۳۰ مقاله انجام دادند و در آن، عوامل فرایندی و ویژگی‌های کیفی مرتبط با داربست‌های تولیدشده به این روش را استخراج کردند [۱۳]. همان‌گونه که در شکل ۷ نشان داده شده است، در میان ویژگی‌های کیفی داربست‌های پزشکی، شاخص‌هایی مانند استحکام کششی، استحکام فشاری و تخلخل بیشترین توجه را به خود اختصاص داده‌اند؛ در حالی که در کاربردهای مبتنی بر



شکل ۷. عوامل فرایندی مورد بررسی در چاپ سه بعدی اکستروژنی (در بالا) و ویژگی‌های کیفی داربست‌های پزشکی تولیدشده (در پایین) [۱۳].



شکل ۵. طرحواره‌ای از انواع چاپگرهای پیچ‌ران [۱۰].

کاشتنی‌های زانو و لگن و داربست‌هایی که برای کمک به کاربردهای اسکلتی-عضلانی طراحی شده‌اند، سفارشی‌سازی شدند. علاوه بر این، از آن برای ایجاد اندام‌های مصنوعی، تجهیزات جراحی و سامانه‌های تجویز دارو استفاده شد. بررسی چاپ‌پذیری پلیمرهای زیست‌سازگار در این روش می‌تواند به‌طور مستقیم در تولید داربست‌های مهندسی بافت، کاشتنی‌های زیستی و سامانه‌های دارورسانی نقش داشته باشد و محدودیت‌های موجود در روش‌های سنتی را کاهش دهد. به عنوان مثال، الیور (Oliver) و همکارانش در پژوهشی خواص فیزیکی-مکانیکی قطعه چاپ شده با استفاده از رشته آماده PLA و گرانول PLA را مقایسه کرده‌اند [۱۱]. نتایج نشان می‌دهد که نمونه‌های ساخته‌شده با گرانول (Pellet-Based) خواص کششی و خمشی بالاتری نسبت به نمونه‌های رشته‌ای (Filament-Based) از خود نشان دادند. این تفاوت‌ها ناشی از ساختارهای متفاوتی بود که در طول فرایند چاپ ایجاد شده‌اند. مشاهده شده است که نمونه‌های گرانولی نسبت به نمونه‌های رشته‌ای دارای درصد پُرشدگی (Infill) بالاتری هستند. به طور غیرمنتظره، نمونه‌های گرانولی به پُرشدگی ۱۰۰٪ دست یافتند. علاوه بر این، افزایش درصد پُرشدگی منجر به بهبود پیوند میان لایه‌ها نیز شده است. دلیل اصلی بهبود خواص مکانیکی در نمونه‌های گرانولی، پیوند بهتر میان لایه‌ها عنوان شده است و با آزمون‌های تکمیلی، عواملی همچون میزان بلورینگی دو قطعه نیز به طور دقیق بررسی شده‌اند.

کی (Qi) و همکارانش در پژوهشی روش چاپ سه بعدی با تغذیه مستقیم گرانول (شکل ۶) در تولید اشکال دارویی جامد متخلخل با استفاده از فناوری رسوب‌گذاری قطرات حرارتی (Thermal Droplet Deposition) معرفی کرده‌اند [۱۲]. این پژوهش برای اولین بار نشان داد که پلیمر Eudragit® EPO که به‌طور معمول برای چاپ FDM مناسب نیست، می‌تواند بدون افزودنی‌های نرم‌کننده با استفاده از این روش چاپ شود. حذف مرحله رشته‌سازی باعث کاهش مخاطرات تخریب حرارتی دارو در طول فرایند شده است. قرص‌های تولید شده دارای کیفیت چاپ بالا، توزیع یکنواخت دارو و رهش قابل کنترل بودند. این فناوری می‌تواند به شخصی‌سازی داروها و تولید قرص‌های سفارشی در

به اندازه متوسط ذرات کمتر از ۱۰۰ باشد، احتمال انسداد به شدت افزایش می‌یابد [۱۵].

در سامانه مبتنی بر گرانول و پیچ‌ران، این چالش‌ها اهمیت بیشتری دارند، زیرا تنوع در ترکیب مواد و رفتار رئولوژیکی می‌تواند منجر به جریان ناپیوسته، ایجاد حفره‌های داخلی، کاهش چسبندگی بین‌لایه‌ای و افت خواص مکانیکی شود. استفاده از عوامل سازگارکننده، اصلاح‌کننده‌های سطحی الیاف، پخش‌کننده‌ها و نرم‌کننده‌های زیست‌سازگار می‌تواند به بهبود توزیع پرکننده و کاهش تمایل به انسداد کمک کند. این نتایج نشان می‌دهد که در فناوری چاپ گرانولی، طراحی فرمولاسیون مناسب، کنترل اندازه ذرات و انتخاب قطر افشانک متناسب از عوامل کلیدی برای پایداری فرآیند و کیفیت ساخت هستند.

۵ پلیمرهای زیست‌سازگار در چاپ سه بعدی گرانولی

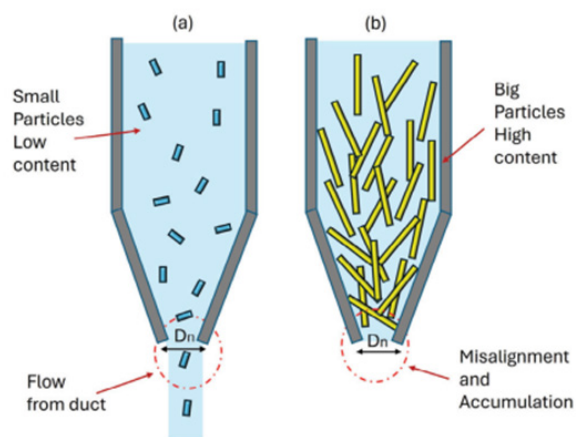
در سال‌های اخیر، استفاده از پلیمرهای گرمانرم زیست‌سازگار در چاپ سه‌بعدی زیستی توجه گسترده‌ای را به خود جلب کرده است. این مواد به دلیل قابلیت فرآیندپذیری، سازگاری زیستی و امکان تخریب کنترل‌شده، گزینه‌های مناسبی برای تولید داربست‌های مهندسی بافت، کاشتنی‌های پزشکی و سامانه‌های دارورسانی محسوب می‌شوند. از جمله پلیمرهای پرکاربرد در این حوزه می‌توان به پلی‌کاپرولاکتون (Polycaprolactone)، پلی‌لاکتیک اسید (Polylactic Acid)، پلی‌اتیلن گلیکول (Polyethylene Glycol)، پلی‌اتر اتر کتون (Polyether Ether Ketone) اشاره کرد [۱۶-۱۸]. در این بخش، پژوهش‌های انجام‌شده در زمینه کاربرد برخی از این پلیمرها در فناوری چاپ سه‌بعدی گرانولی مرور خواهد شد.

۵-۱ پلی‌لاکتیک اسید (PLA)

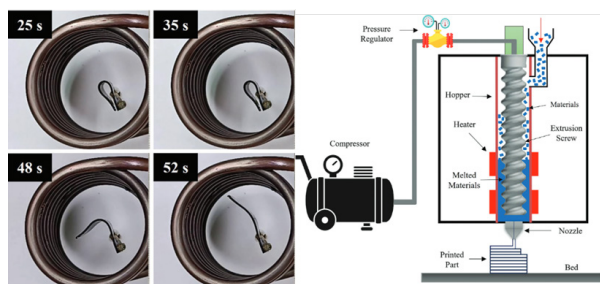
پلی‌لاکتیک اسید (PLA) یکی از پرکاربردترین پلیمرهای زیست‌سازگار در فناوری چاپ سه‌بعدی مبتنی بر اکستروژن مواد است و گزارش‌ها نشان می‌دهند که حدود ۸۶٪ از مواد مصرفی در این فناوری را تشکیل می‌دهد. این پلیمر از منابع تجدیدپذیر کشاورزی مانند نشاسته ذرت، چغندر قند و نیشکر تولید می‌شود و به دلیل زیست‌تخریب‌پذیری، زیست‌سازگاری و سمیت پایین، در کاربردهای پزشکی، زیست‌فناوری و بسته‌بندی مورد توجه قرار گرفته است. در فرآیندهای اکستروژنی، از جمله چاپ سه‌بعدی گرانولی، PLA به دلیل دمای ذوب نسبتاً پایین، پایداری فرآیندی مناسب و قابلیت شکل‌دهی آسان، یکی از گزینه‌های رایج برای ساخت داربست‌های مهندسی بافت، سامانه‌های دارورسانی و ساختارهای متخلخل زیستی محسوب

سلول، زنده‌مانی سلولی نیز به‌عنوان معیاری کلیدی مطرح است. یکی از چالش‌های اساسی در چاپ سه‌بعدی اکستروژنی مبتنی بر گرانول و پیچ‌ران، نحوه‌ی رفتار مواد پُر شده (کامپوزیت‌ها) در مسیر جریان و افشانک است. پژوهش‌ها نشان داده‌اند که در این سامانه‌ها، اندازه ذرات، درصد وزنی پرکننده و نسبت قطر پرکننده به قطر افشانک نقش تعیین‌کننده‌ای در پایداری جریان و احتمال انسداد دارند. همان‌گونه که در شکل ۸ نشان داده شده است، در حالتی که از ذرات کوچک با محتوای کم استفاده می‌شود، جریان مذاب در مسیر افشانک پایدار بوده و ماده بدون ایجاد تجمع از دهانه خارج می‌شود؛ اما در صورت استفاده از ذرات بزرگ‌تر یا افزایش درصد پرکننده، پدیده‌هایی مانند ناهم‌راستایی الیاف، تجمع ذرات و انسداد مسیر رخ می‌دهد که عملکرد چاپگر و کیفیت قطعه نهایی را به شدت کاهش می‌دهد [۱۴].

مدل‌سازی‌های عددی (شامل CFD و روش اجزای مجزا DEM) نشان داده‌اند که ارتباط مستقیمی میان طول الیاف، درصد حجمی فیلر، و قطر افشانک وجود دارد. برای مثال، الیاف کوتاه با طول تقریبی ۰.۲۴ میلی‌متر در افشانک ۰.۴۵ میلی‌متری تا زمانی که درصد پرکننده کمتر از حدود ۲۶.۷٪ باشد، جریان پایدار ایجاد می‌کنند. در مقابل، افزایش طول الیاف به ۰.۳۵ میلی‌متر حتی در مقادیر کمتر از ۲۰٪ باعث اختلال در جریان و انسداد می‌شود. حتی در بارگذاری حجمی پایین مانند ۱۳٪، نیز طول الیاف حدود ۰.۴۵ میلی‌متر موجب گرفتگی افشانک خواهد شد. همچنین ثابت شده است که اگر نسبت قطر افشانک



شکل ۸. نمایش طرحواره یک افشانک چاپ در دو حالت مختلف فرایندی برای کامپوزیت‌های زیستی: (a) مقدار کم پرکننده و ذرات کوچک در ماتریس پلیمری همراه با جریان پیوسته در مجرا؛ (b) مقدار زیاد پرکننده و ذرات بزرگ در ماتریس پلیمری که منجر به ناهم‌آهنگی و تجمع الیاف و گرفتگی مجرا می‌شود. (Dn: قطر افشانک) [۱۴].



شکل ۹. طرحواره چاپگر سه بعدی FGF، تصویری از آزمون حافظه شکلی در پژوهش یوسفی و همکاران [۲۲].

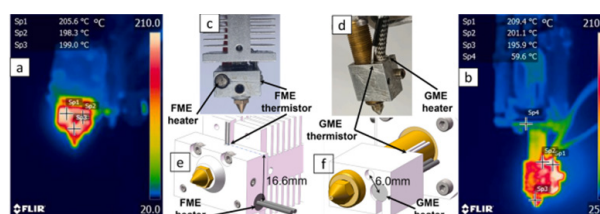
اختلاف معنی داری در خواص کششی، استحکام خمشی، مدول خمشی و استحکام ضربه بین دو روش وجود ندارد، اما در سختی Shore D و کرنش شکست خمشی تفاوت مشاهده شد. نویسندگان همچنین با ارجاع به شکل ۱۰ نشان دادند که دمای نزدیک ورودی خوراک به 59.6°C می‌رسد که می‌تواند باعث نرم شدن گرانول و افزایش خطر گرفتگی شود. نکته قابل توجه این پژوهش، استفاده هم‌زمان از تحلیل‌های حرارتی، رئولوژیکی و مولکولی در کنار آزمون‌های مکانیکی است؛ موضوعی که در بسیاری از مطالعات پیشین کمتر مورد توجه قرار گرفته بود. علاوه بر این، مقاله بر قابلیت استفاده از ضایعات PLA و کاربرد فناوری چاپ گرانولی در اقتصاد چرخشی و کاهش هزینه‌های تولید رشته تأکید دارد.

بدایع و همکاران در پژوهشی با تمرکز بر فناوری چاپ سه بعدی اکستروژن گرانولی، یک کامپوزیت زیست‌پایه تقویت شده با الیاف پیوسته شامل PLA، پودر زغال بامبو (BC) و الیاف ابریشم پیوسته (CSF) را توسعه دادند [۲۴]. برخلاف سامانه‌های رایج مبتنی بر رشته، در این روش از خوراک گرانولی استفاده شده که امکان نرخ تولید بالاتر، هزینه کمتر مواد اولیه و افزودن مستقیم تقویت‌کننده‌ها را فراهم می‌کند. پژوهشگران با اصلاح سامانه‌ی اکستروژن و یکپارچه‌سازی تزریق الیاف

می‌شود. با این حال، این پلیمر نسبت به بسیاری از پلیمرهای نفت‌پایه چقرمگی و انعطاف‌پذیری کمتری دارد و رفتار نسبتاً شکننده آن می‌تواند در برخی کاربردهای مهندسی محدودیت ایجاد کند. علاوه بر این، چالش‌هایی مانند کنترل نرخ تجزیه، مقاومت حرارتی پایین و آب‌گریزی سطحی که می‌تواند بر چسبندگی و رشد سلولی تأثیر بگذارد، از جمله محدودیت‌های استفاده از PLA در کاربردهای زیست‌پزشکی و چاپ سه بعدی محسوب می‌شوند. از این رو، پژوهش‌های اخیر عمدتاً بر بهبود خواص مکانیکی، اصلاح سطح، و توسعه کامپوزیت‌های مبتنی بر PLA برای افزایش فرآیندپذیری و عملکرد آن در فناوری‌های اکستروژنی و به‌ویژه چاپ سه بعدی گرانولی متمرکز شده‌اند. [۱۹-۲۱]

یوسفی و همکاران نانوکامپوزیت‌های زیست‌تخریب‌پذیر PLA/PBAT/Fe₃O₄ را برای کاربردهای چاپ چهاربعدی و حافظه شکلی مغناطیسی با استفاده از فناوری FGF توسعه دادند [۲۲]. در این پژوهش، مخلوط PLA/PBAT با نسبت وزنی ۳۰/۷۰ تهیه و با نانوذرات مگنتیت در مقادیر ۱۰، ۱۵ و ۲۰ phr تقویت شد. فرایند اختلاط مذاب در دمای 190°C و سرعت ۱۹۰ rpm انجام شد و نمونه‌ها بدون مرحله رشته‌سازی تولید شدند. نتایج مورفولوژی و آزمون‌های حرارتی-مکانیکی دینامیکی نشان داد که نانوذرات Fe₃O₄ عمدتاً در فاز PBAT توزیع شده و موجب افزایش مدول ذخیره، پایداری حرارتی، استحکام، ازدیاد طول و چقرمگی نانوکامپوزیت‌ها شدند. بهترین عملکرد مربوط به نمونه حاوی ۱۰ phr اکسید آهن بود؛ در حالی که مقادیر بالاتر به دلیل تجمع نانوذرات باعث افت خواص شدند. همچنین نمونه‌های مستطیلی با ابعاد $1.5 \times 10 \times 40$ mm حافظه شکلی سریع و مؤثری را تحت تحریک حرارتی و میدان مغناطیسی نشان دادند؛ به‌طوری‌که پس از گرم شدن تا 80°C و تثبیت شکل موقت، توانستند تحت القای مغناطیسی شکل اولیه خود را بازیابی کنند. نتایج نشان داده است که استفاده از سامانه تغذیه گرانولی امکان کنترل بهتر جریان رئولوژیکی و چاپ پایدار نانوکامپوزیت‌های حاوی ذرات اکسید آهن را فراهم کرد و مسیر مناسبی برای توسعه مواد هوشمند قابل تحریک از راه دور در چاپ چهاربعدی ارائه داد.

چن و همکاران به مقایسه‌ی چاپ سه بعدی مبتنی بر رشته و مبتنی بر گرانول برای قطعات PLA پرداختند و نشان دادند که روش گرانولی می‌تواند بدون نیاز به تولید رشته، عملکرد مکانیکی مشابهی با روش رشته‌ای ایجاد کند [۲۳]. در این مطالعه، یک چاپگر Creality Ender 3 Pro با استفاده از اکسترودر تک‌پیچ گرانولی اصلاح شد. نتایج نشان داد که

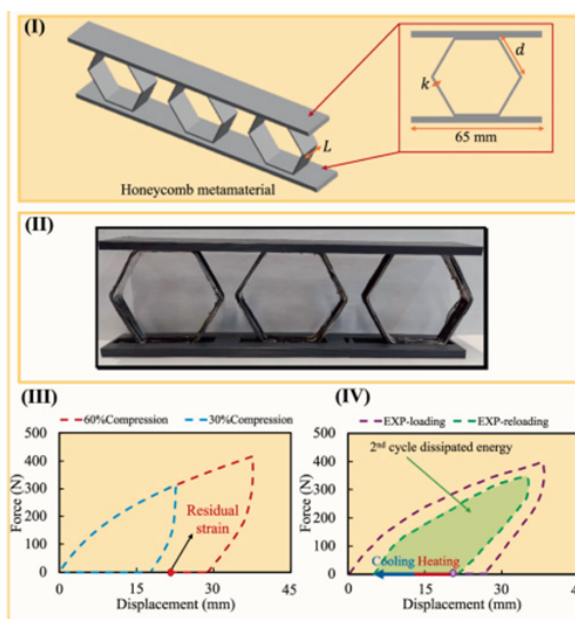


شکل ۱۰. تصاویر توزیع دمایی دای‌های اکستروژن رشته‌ای (a) و گرانولی (b)، به همراه تصاویر ساختار دای (c) برای رشته‌ای و (d) برای گرانولی و مدل‌های سه بعدی آن‌ها. نقاط Sp1، Sp2، Sp3 و Sp4 به ترتیب نشان‌دهنده نقاط اندازه‌گیری دمای گرم‌کن، نشانگر دما، افشانک و ورودی اکستروژن هستند [۲۳].

گیرد. همچنین پایداری ابعادی مناسب آن سبب می شود داربست پس از کاشت، ساختار خود را تا زمان تشکیل بافت جدید حفظ کند. با این حال، سرعت تخریب پایین، آب گریزی و محدودیت در تحمل بارهای مکانیکی بالا از مهم ترین نقاط ضعف PCL به شمار می روند. به همین دلیل، در بسیاری از پژوهش ها این پلیمر با مواد زیست فعال یا سایر پلیمرها ترکیب می شود تا خواص زیستی و مکانیکی آن بهبود یابد [۲۵، ۲۶].

در مطالعه ای، لطفیان و همکاران داربست های زیست فعال مبتنی بر پلی کاپرولاکتون را با افزودن نانوذرات کلسیم زیرکونیوم سیلیکات (CZS) و با استفاده از چاپ سه بعدی مبتنی بر اکستروژن گرانولی توسعه دادند [۲۷]. هدف این پژوهش بهبود خواص مکانیکی و زیست فعالی داربست های مورد استفاده در مهندسی بافت استخوان بود. همان طور که در شکل ۱۲ مشاهده می شود، داربست های چاپ شده دارای ساختار متخلخل و لایه گذاری منظم بوده اند که برای کاربردهای مهندسی بافت اهمیت زیادی دارد. نتایج نشان داد که افزودن CZS تأثیر قابل توجهی بر دمای ذوب پلیمر نداشت، اما باعث افزایش دمای بلورینگی و بهبود استحکام فشاری داربست ها شد؛ به طوری که استحکام فشاری نمونه های کامپوزیتی تا حدود ۱۰.۹ مگاپاسکال افزایش یافت. همچنین داربست های حاوی این نانوذرات توانایی بیشتری در تشکیل لایه آپاتیت در محیط شبیه سازی شده مایعات بدن نشان دادند که بیانگر افزایش زیست فعالی آن ها است. نتایج آزمون های زیست سازگاری نیز افزایش تکثیر سلول های استخوانی در داربست های کامپوزیتی را نشان داد. این نتایج نشان می دهد که ترکیب پلی کاپرولاکتون با نانوذرات CZS می تواند رویکردی مؤثر برای توسعه داربست های زیست فعال برای تسریع بازسازی استخوان باشد.

در پژوهشی، رندن و همکاران کوپلیمرهای زیست سازگار و زیست تخریب پذیر PCEC را بر پایه ی پلی اتیلن گلاکول و

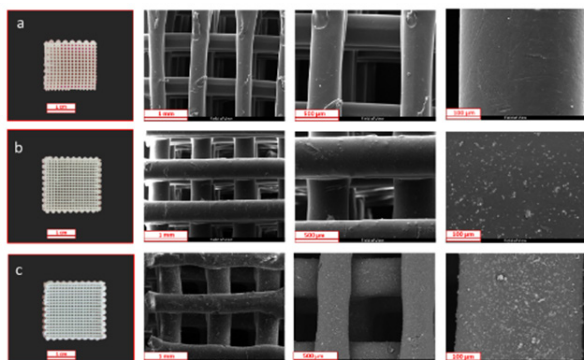


شکل ۱۱. خواص مکانیکی متاساختار لانه زنبوری ساخته شده از کامپوزیت زیستی PLA/BC/CSF. (I) طرحواره متاساختار طراحی شده، (II) ساختار لانه زنبوری چاپ سه بعدی شده، (III) پاسخ نیرو-جابجایی تحت فشار چرخه ای در سطوح ۶۰٪ و ۳۰٪، (IV) ویژگی های نیرو-جابجایی و اتلاف انرژی در چرخه های متعدد پس از فرایند بازیابی شکل [۲۴].

پیوسته در حین چاپ، موفق شدند خواص مکانیکی کامپوزیت را به طور چشمگیری بهبود دهند؛ به طوری که افزودن ۳ درصد وزنی پودر زغال بامبو استحکام کششی PLA را ۲۸٪ افزایش داد و حضور الیاف ابریشم پیوسته موجب رسیدن استحکام کششی به ۱۰۸ MPa، معادل ۲۱۳٪ بیشتر از PLA خالص شد. همچنین استحکام خمشی سه نقطه ای ۲۴۷٪ افزایش و نرخ سوختن ۴۱٪ کاهش یافت. نتایج پایداری حرارتی نشان داد نمونه های PLA/BC/CSF در دمای ۷۰ °C تحت بار ثابت، پایداری ابعادی خود را حفظ کردند، در حالی که PLA خالص دچار تغییر شکل شد (شکل ۱۱). علاوه بر این، متاساختارهای لانه زنبوری و دوزنقه ای چاپ شده رفتار جذب انرژی و بازیابی شکلی مطلوبی از خود نشان دادند.

۵-۲ پلی کاپرولاکتون (PCL)

پلی کاپرولاکتون (PCL) یک پلی استر آلیفاتیک زیست تخریب پذیر است که به دلیل زیست سازگاری، سمیت پایین و قابلیت فرآیندپذیری مناسب، کاربرد گسترده ای در چاپ سه بعدی زیستی دارد. این پلیمر دارای دمای ذوب پایین و انعطاف پذیری مطلوب بوده، می تواند در ساخت داربست های مهندسی بافت، به ویژه در بازسازی استخوان و غضروف، مورد استفاده قرار



شکل ۱۲. تصاویر SEM از داربست های PCL و کامپوزیتی:

(a) PCL، (b) PC20، (c) PC40 [۲۷].

نیازمند سامانه‌های چاپ با دمای بالا و کنترل دقیق حرارت است. در چاپ سه بعدی گرانیولی، PEEK امکان تولید قطعات مستحکم، سفارشی و مقاوم در برابر ضد عفونی کردن را فراهم می‌کند و به دلیل مدول نزدیک به استخوان طبیعی، در ساخت کاشتنی‌های ستون فقرات، مفاصل و پروتزهای پزشکی کاربرد گسترده‌ای دارد. با این حال، آب‌گریزی سطح، زیست‌فعالی پایین و دشواری چسبندگی سلولی از مهم‌ترین محدودیت‌های این پلیمر محسوب می‌شوند. از این رو، پژوهش‌های اخیر بر اصلاح سطح، ایجاد تخلخل، استفاده از پوشش‌های زیست‌فعال و توسعه کامپوزیت‌های مبتنی بر PEEK متمرکز شده‌اند تا عملکرد زیستی و فرآیندپذیری آن در فناوری‌های اکستروژنی و چاپ سه بعدی گرانیولی بهبود یابد [۲۹].

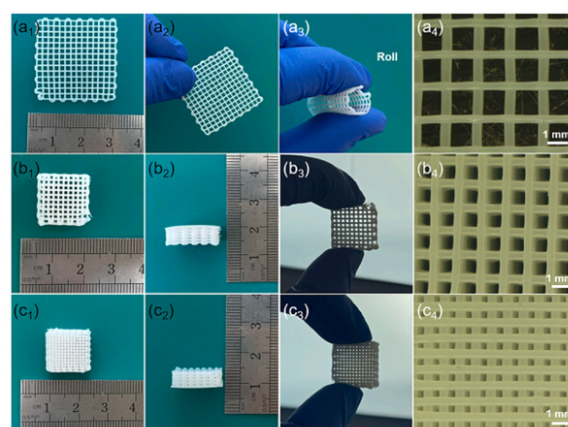
Pisaneschi و همکاران در مطالعه‌ای بر روی ساخت کاشتنی‌های حجمی اختصاصی بیمار با استفاده از پلیمر PEEK و فناوری شکل‌گیری آزاد ابرگر، عملکرد مکانیکی و ساختاری قطعات چاپ‌شده را به صورت تجربی و عددی بررسی کردند [۳۰]. در این پژوهش، نمونه‌های خمشی با ابعاد $4\text{mm} \times 10 \times 80$ در دو جهت XY و XZ چاپ شدند و آزمون سه نقطه‌ای مطابق استاندارد ISO ۱۷۸ با سرعت 2mm/min انجام گرفت. نتایج نشان داد که قطعات چاپ‌شده در جهت XZ نسبت به XY دارای سختی و مقاومت خمشی بالاتری هستند. همچنین آزمون DSC نشان داد که PEEK پس از چاپ عمدتاً در حالت آمورف باقی مانده است که این موضوع به کاهش اعوجاج و بهبود چسبندگی بین‌لایه‌ای کمک می‌کند. کاشتنی حجمی چاپ‌شده در آزمون فشاری تا بار $N1800$ و جابه‌جایی 6mm پیش از شکست مقاومت نشان داد و شکست عرضی نسبت به جهت ساخت، بیانگر اتصال مناسب لایه‌ها بود. علاوه بر این، تطابق خوبی میان نتایج تجربی و تحلیل المان محدود مشاهده شد که اعتبار مدل‌سازی عددی را تأیید می‌کند. همان‌گونه که در شکل ۱۴ نشان داده شده است، منحنی‌های بار-جابه‌جایی حاصل از آزمایش و شبیه‌سازی همخوانی نزدیکی با یکدیگر دارند و قابلیت APF را برای تولید کاشتنی‌های PEEK با عملکرد مکانیکی قابل قبول نشان می‌دهند.

Curmi و همکاران در مطالعه‌ای اثر گرانیولی در جرات مختلف PEEK را بر استحکام برشی بین‌لایه‌ای در ساخت افزایشی مبتنی بر گرانیولی بررسی کردند [۳۱]. نتایج نشان داد که هم گرانیولی ماده و هم دمای اکسترودر نقش تعیین‌کننده‌ای در چسبندگی بین‌لایه‌ای دارند؛ به‌طوری‌که درجه L4000G با گرانیولی بالاتر، در دمای 220°C بهترین عملکرد را نشان داد و بیشترین استحکام بین‌لایه‌ای برابر با $17.70 \pm 0.58\text{MPa}$

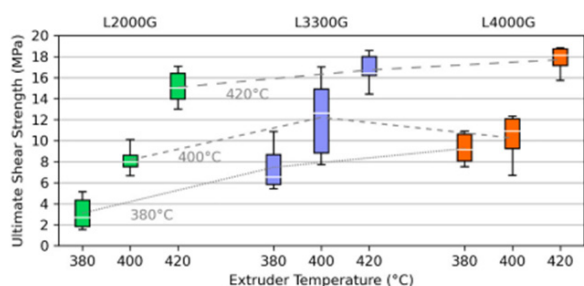
پلی (ε-کاپرولاکتون-کو-اتیلن کرینات) سنتز و اثر وزن مولکولی PEG را بر خواص فیزیکی، مکانیکی و رفتار تخریب این مواد بررسی کردند [۲۸]. نتایج نشان داد که تغییر وزن مولکولی PEG تأثیر قابل توجهی بر ساختار، درجه تبلور، رفتار رئولوژیکی و خواص حرارتی کوپلیمرها دارد؛ به‌طوری‌که با افزایش وزن مولکولی PEG، انعطاف‌پذیری و زیست‌تخریب‌پذیری نمونه‌ها افزایش یافت، در حالی که نمونه‌های دارای PEG کوتاه‌تر از استحکام مکانیکی و پایداری ساختاری بیشتری برخوردار بودند. این پژوهش همچنین نشان داد که کوپلیمرهای سنتز شده قابلیت فرآیندپذیری مناسبی در چاپ سه بعدی مبتنی بر اکستروژن گرانیولی و پیچ‌ران دارند و می‌توان از آن‌ها برای تولید داربست‌های متخلخل با معماری منظم و چسبندگی بین‌لایه‌ای مطلوب استفاده کرد. همان‌گونه که در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود، داربست‌های چاپ‌شده دارای ساختار لایه‌ای منظم و تخلخل کنترل شده بوده‌اند که برای کاربردهای مهندسی بافت و بازسازی پزشکی اهمیت بالایی دارد.

۵-۳ پلی اتر اتر کتون (PEEK)

پلی اتر اتر کتون یکی از پلیمرهای گرمانرم مهندسی و نیمه‌بلورین است که به دلیل استحکام مکانیکی بالا، پایداری حرارتی و شیمیایی مناسب، و زیست‌سازگاری مطلوب، در فناوری‌های چاپ سه بعدی مبتنی بر اکستروژن و به‌ویژه ساخت کاشتنی‌های پزشکی مورد توجه قرار گرفته است. این پلیمر دارای دمای ذوب بالا (حدود 343°C درجه سانتی‌گراد) و مقاومت حرارتی مناسب بوده، به همین دلیل در فرآیندهای اکستروژنی



شکل ۱۳. تصاویر دیجیتال و تصاویر میکروسکوپ نوری از داربست‌های PCE20kC چاپ‌شده به روش سه بعدی: (a) ورق دولایه، (b) داربست ده‌لایه با تخلخل هزار میکرومتر، (c) داربست ده‌لایه با تخلخل پانصد میکرومتر [۲۸].



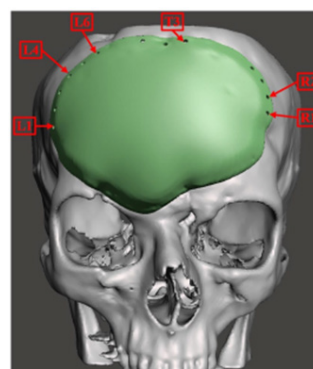
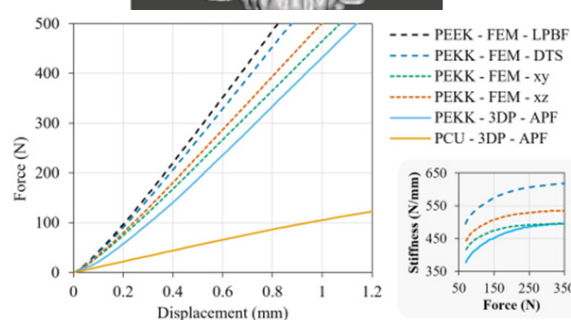
شکل ۱۵ نمودار جعبه‌ای استحکام برشی نهایی نمونه‌های آزمون فشار-برش. خطوط چین‌دار، روندهای هم‌دمای مربوط به هر دمای اکستروژن را نشان می‌دهند و بر اساس میانگین نتایج ترسیم شده‌اند (n=5) [۳۱].

افزایش قابل توجه استحکام کششی و خمشی شد؛ به‌طوری‌که نمونه 10HA40CF به استحکام کششی ۱۱۵.۷ MPa رسید، در حالی که افزایش HA بیشتر موجب افزایش مدول و کاهش چقرمگی شد. همچنین مشخص شد زمانی که نسبت حجمی فاز تقویت‌کننده از حدود ۲۰٪ فراتر می‌رود، فرایند تبلور PEEK مختل شده، تخلخل نمونه‌ها افزایش می‌یابد. تصاویر SEM نشان دادند در درصد‌های پایین تقویت‌کننده، اتصال بین HA و CF، زمینه PEEK مناسب است، اما در مقادیر بالاتر، جدایش بین لایه‌ای و حفرات افزایش پیدا می‌کند. در شکل ۱۶، طراحی سامانه اکستروژن پیچی شامل هندسه مارپیچ، نواحی تغذیه، تراکم و اندازه‌گیری مذاب، به همراه جهت چاپ نمونه‌های مکانیکی نمایش داده شده است که نقش کلیدی این ساختار را در بهبود اختلاط و فشار اکستروژن نشان می‌دهد.

۶ چالش‌ها و چشم‌اندازهای آینده در چاپ سه‌بعدی گرانولی

بررسی گسترده پژوهش‌های موجود نشان می‌دهد که چاپ سه‌بعدی مبتنی بر میکرواکستروژن‌های پیچ‌ران با گرانولی همچنان فناوری‌ای در حال توسعه است و با وجود پیشرفت‌های چشمگیر سال‌های اخیر، هنوز با چالش‌های فنی و تحقیقاتی متعددی روبه‌رو است. مهم‌ترین مسیرهای پژوهشی آینده در این حوزه را می‌توان در چند محور اصلی خلاصه کرد؛ کنترل دقیق و یکنواخت اکستروژن، بهبود قابلیت اختلاط و فرایندپذیری مواد کامپوزیتی، و طراحی میکرواکستروژن‌های سبک، کوچک و کارآمد.

پیشرفت در این حوزه‌ها می‌تواند امکان پردازش طیف گسترده‌ای از مواد مهندسی، زیست‌سازگار و تقویت‌شده را فراهم کند. یکی از مهم‌ترین مزایای استفاده از میکرواکستروژن، حذف



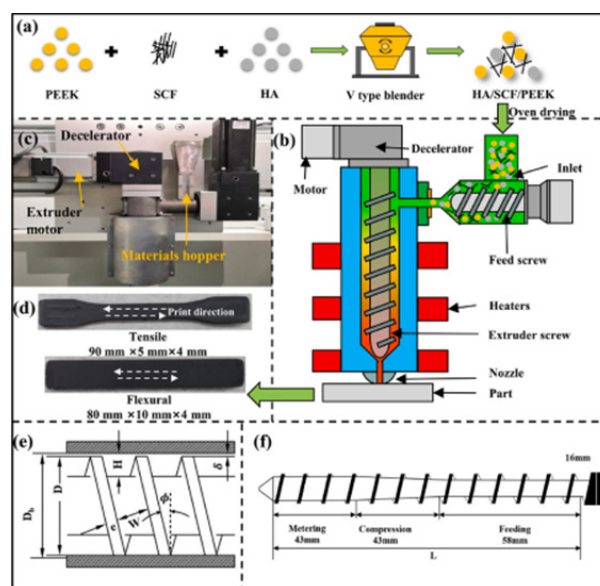
شکل ۱۴ طرحواره قطعه چاپ شده، منحنی‌های بار-جاب‌جایی نمونه‌ها [۳۰].

به‌دست آمد. در مقابل، برای نمونه با گرانروی کمتر (L2000G)، افزایش دمای چاپ از ۳۸۰ به ۴۲۰ درجه سانتیگراد باعث رشد استحکام برشی نهایی از $1,58 \pm 3.10$ به 15.08 ± 1.68 MPa شد که نشان‌دهنده اثر بسیار قوی شرایط فرایندی بر کیفیت اتصال لایه‌ها است. همچنین تغییرات بلورینگی با نتایج مکانیکی همسو بود؛ به‌گونه‌ای که درجات بلورینگی گزارش‌شده با رامن اسپکتروسکوپی در محدوده حدود $29.7 \pm 1.3\%$ تا 33% قرار داشت و با افزایش دمای اکستروژن کاهش یافت. همان‌طور که در شکل ۱۵ نشان داده شده است، روند افزایش استحکام برشی نهایی با افزایش دمای چاپ به‌وضوح مشاهده می‌شود و این شکل به‌خوبی نقش کلیدی گرانروی و دمای فرایند را در تقویت قدرت بین لایه‌ای نشان می‌دهد.

ژانگ و همکاران، یک سامانه چاپ سه‌بعدی مبتنی بر اکستروژن گرانولی برای ساخت کامپوزیت‌های HA/CF/PEEK توسعه دادند و تأثیر میزان هیدروکسی‌آپاتیت (HA) و الیاف کربن (CF) را بر ریزساختار، تبلور و خواص مکانیکی این کامپوزیت‌ها بررسی کردند [۳۲]. برخلاف فرایندهای متداول FFF، استفاده از اکستروژن پیچی به دلیل ایجاد فشار و اختلاط مذاب بالاتر، امکان چاپ کامپوزیت‌های با گرانروی زیاد و درصد تقویت‌کننده تا ۶۰ wt٪ را فراهم کرد که برای کاربردهای کاشتینی، کاشتینه استخوانی اهمیت زیادی دارد. نتایج نشان داد افزودن CF موجب

نیاز به رشته‌های از پیش ساخته و تولید درجا ماده مصرفی در هنگام چاپ است. این ویژگی، علاوه بر کاهش هزینه‌های تولید، می‌تواند در کاربردهای پزشکی بسیاری از چالش‌های مرتبط با نگهداری، آلودگی و الزامات ضدعفونی کردن را کاهش دهد. از این رو، این فناوری ظرفیت بالایی برای تولید پروتزهای سفارشی، قطعات با استحکام بالا، داربست‌های زیستی و مواد نوین مورد استفاده در مهندسی بافت دارد [۳۳، ۳۴].

در حال حاضر، بخش عمده‌ای از چاپگرهای سه بعدی صنعتی و رومیزی همچنان مبتنی بر استفاده از رشته‌های آماده هستند. با این حال، روند جهانی به سمت توسعه و استفاده از میکرواکسترودرهای گرانیولی در مقیاس‌های پژوهشی، نیمه‌صنعتی و صنعتی در حال گسترش است. توسعه و بهینه‌سازی این فناوری می‌تواند زمینه‌ساز افزایش رقابت‌پذیری، کاهش وابستگی به واردات مواد مصرفی و شکل‌گیری نسل جدیدی از چاپگرهای چندماده‌ای باشد که قابلیت پردازش مستقیم مواد اولیه ارزان و متنوع را دارند.



شکل ۱۶. تجهیزات اکسترودر پیچی. (a) آماده‌سازی پودر، (b) طرحواره دستگاه، (c) تصاویر واقعی تجهیزات دستگاه، (d) اندازه نمونه مکانیکی و جهت چاپ، (e) پارامترهای پیچ، (f) طول بخش‌های پیچ [۳۲].

مراجع

- Pagac M., Hajnys J., Ma Q. P., Jancar L., Jansa J., Stefek P., Mesicek J., A Review of Vat Photopolymerization Technology: Materials, Applications, Challenges, and Future Trends of 3D Printing, *Polymers*, 13, 598, **2021**
- Prabhakar M., Manoj A. K., Saravanan A., Haiter Lenin A., Mayandi K., Sethu Ramalingam P., A Short Review on 3D Printing Methods, Process Parameters and Materials, *Materials Today: Proceedings*, 45, 6108-6114, **2021**
- Vora H. D., Sanyal S., A Comprehensive Review: Metrology in Additive Manufacturing and 3D Printing Technology, *Progress in Additive Manufacturing*, 5, 319-353, **2020**
- Kumar A., Singh A. P., Singh S. K., Singh R., Ahuja I. P. S., Application of 3D Printing for Engineering and Bio-Medicals: Recent Trends and Development, *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*, 17, 2127-2136, **2023**
- Aznarte Garcia E., Qureshi A. J., Ayranci C., A Study on Material-Process Interaction and Optimization for VAT Photopolymerization Processes, *Rapid Prototyping Journal*, 24, 1479-1485, **2018**
- Nejadebrahim A., Ebrahimi M., Allonas X., Croutxé-Barghorn C., Ley C., Métral B., A New Safranin-Based Three-Component Photoinitiating System for High Resolution and Low Shrinkage Printed Parts via Digital Light Processing, *RSC Advances*, 9, 39709-39720, **2019**
- Ahmadi Z., Najafi M., Nejadebrahim A., Ataefard M., Investigation of Printing Parameters on Dimensional Accuracy of Geometrically Complex Objects in FDM 3D Printing, *Progress in Color, Colorants and Coatings*, 18, 493-502, **2025**
- Patti A., Challenges to Improve Extrusion-Based Additive Manufacturing Process of Thermoplastics Toward Sustainable Development, *Macromolecular Rapid Communications*, 45, 2400249, **2024**
- Pignatelli F., Percoco G., An Application- and Market-Oriented Review on Large Format Additive Manufacturing Focusing on Polymer Pellet-Based 3D Printing, *Progress in Additive Manufacturing*, 7, 1363-1377, **2022**
- Justino Netto J. M., Idogava H. T., Frezzatto Santos L. E., Silveira Z. D. C., Romio P., Alves J. L., Screw-Assisted 3D Printing with Granulated Materials: A Systematic Review, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 115, 2711-2727, **2021**
- Pagés-Llobet A., Espinach F. X., Julián F., Oliver-Ortega H., Méndez J. A., Effect of Extruder Type in the Interface of PLA Layers in FDM Printers: Filament Extruder Versus Direct Pellet Extruder, *Polymers*, 15, 2019, **2023**
- McDonagh T., Belton P., Qi S., Direct Granule Feeding of Thermal Droplet Deposition 3D Printing of Porous Pharmaceutical Solid Dosage Forms Free of Plasticisers, *Pharmaceutical Research*, 39, 599-610, **2022**
- Janning K., König S., Herbst L., Nießing B., Schmitt R. H., Development of an End-to-End Automated Production Concept for Extrusion-Based Additive Manufacturing of Personalized Medical Scaffolds, *Frontiers in Manufacturing Technology*, 5, 1572842, **2025**
- Patel A., Taufik M., Extrusion-Based Technology in Additive Manufacturing: A Comprehensive Review, *Arabian Journal for Science and Engineering*, 49, 1309-1342, **2024**
- Gupta A. K., Krishnanand, Taufik M., Effect of Process Parameters on Performances Measured in Filament and Pellets-Based Additively Manufactured Parts, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part E: *Journal of Process Mechanical Engineering*, 239, 489-512, **2025**
- Azad M. A., Olawuni D., Kimbell G., Badruddoza A. Z. M., Hossain M. S., Sultana T., Polymers for Extrusion-Based 3D Printing of Pharmaceuticals: A Holistic Materials-Process Perspective, *Pharmaceutics*, 12, 124, **2020**
- Aftab M., Ikram S., Ullah M., Khan N., Naeem M., Khan M. A., Qizi O. K. A., Recent Trends and Future Directions in 3D Printing of Biocompatible Polymers, *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 9, 129, **2025**
- Kyle S., Jessop Z. M., Al-Sabah A., Whitaker I. S., Printability of Candidate Biomaterials for Extrusion-Based 3D Printing: State-of-the-Art, *Advanced Healthcare Materials*, 6, 1700264, **2017**
- Tümer E. H., Erbil H. Y., Extrusion-Based 3D Printing Applications of PLA Composites: A Review, *Coatings*, 11, 390, **2021**
- Arockiam A. J., Subramanian K., Padmanabhan R. G., Selvaraj R., Bagal D. K., Rajesh S., A Review on PLA with Different Fillers Used as a Filament in 3D Printing, *Materials Today: Proceedings*, 50, 2057-2064, **2022**
- Wang X., Huang L., Li Y., Wang Y., Lu X., Wei Z., Liu Y., Research Progress in Polylactic Acid Processing for 3D Printing, *Journal of Manufacturing Processes*, 112, 161-178, **2024**
- Yousefi M. A., Rahmatabadi D., Baniassadi M., Bodaghi M., Baghani M., 4D Printing of Multifunctional and Biodegradable PLA-PBAT-Fe₃O₄ Nanocomposites with Supreme Mechanical and Shape Memory Properties, *Macromolecular Rapid Communications*, 46, 2400661, **2025**
- Liu H., Gong K., Portela A., Cao Z., Dunbar R., Chen

- Y., Granule-Based Material Extrusion Is Comparable to Filament-Based Material Extrusion in Terms of Mechanical Performances of Printed PLA Parts: A Comprehensive Investigation, *Additive Manufacturing*, 75, 103744, **2023**
24. Rahmani K., Ravanbod S., Dezaki M. L., Branfoot C., Bodaghi M., Pellet-Fed Continuous-Silk-Fibre 3D/4D Printing of PLA/Bamboo-Charcoal Bio-Composites with Shape Recovery and Thermomechanical Stability, *Materials & Design*, 290, 115704, **2026**
25. Borkar T., Goenka V., Jaiswal A. K., Application of Poly-ε-Caprolactone in Extrusion-Based Bioprinting, *Bioprinting*, 21, e00111, **2021**
26. Shaik Y. P., Schuster J., Shaik A., A Scientific Review on Various Pellet Extruders Used in 3D Printing FDM Processes, *Open Access Library Journal*, 8, 1-19, **2021**
27. Emadi H., Baghani M., Masoudi Rad M., Hoomehr B., Baniassadi M., Lotfian S., 3D-Printed Polycaprolactone-Based Containing Calcium Zirconium Silicate: Bioactive Scaffold for Accelerating Bone Regeneration, *Polymers*, 16, 1389, **2024**
28. Liu Y. Y., Blazquez J. P. F., Yin G. Z., Wang D. Y., Llorca J., Echeverry-Rendon M., A Strategy to Tailor the Mechanical and Degradation Properties of PCL-PEG-PCL Based Copolymers for Biomedical Application, *European Polymer Journal*, 198, 112388, **2023**
29. Oladapo B. I., Zahedi S. A., Ismail S. O., Omigbodun F. T., 3D Printing of PEEK and Its Composite to Increase Bio-interfaces as a Biomedical Material: A Review, *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 203, 111726, **2021**
30. Pisaneschi G., Numerical and Experimental Exploration of Patient-Specific Cranial Implants with 3D-Printed PEKK via Arburg Plastic Freeforming, *Progress in Additive Manufacturing*, 10, 8099-8111, **2025**
31. Curmi A., Rochman A., Buhagiar J., Influence of Polyether Ether Ketone (PEEK) Viscosity on Interlayer Shear Strength in Screw Extrusion Additive Manufacturing, *Additive Manufacturing*, 84, 104086, **2024**
32. Zhang B., Lu S., Niu J., Yang C., Sun C., Li D., Influence of Reinforcement Phase Content on Mechanical Properties of Hydroxyapatite/Carbon Fiber/Polyether-Ether-Ketone Composites 3D Printed by Screw Extrusion, *Composites Science and Technology*, 258, 110843, **2024**
33. Whyman S., Arif K. M., Potgieter J., Design and Development of an Extrusion System for 3D Printing Biopolymer Pellets, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 96, 3417-3428, **2018**
34. Altıparmak S. C., Yardley V. A., Shi Z., Lin J., Extrusion-Based Additive Manufacturing Technologies: State of the Art and Future Perspectives, *Journal of Manufacturing Processes*, 83, 607-636, **2022**



فصلنامه علمی
سال یازدهم، شماره ۱، شماره پیاپی ۴۱، بهار ۱۴۰۵
Vol. 11, No. 1 Issue No. 41
Autumn 2025, Quarterly
صفحه ۵۳-۷۱

Iran Polymer Technology;
Research and Development

واژه‌های کلیدی:

پوشش‌های منبسط‌شونده،
پوشش‌های
غیرمنبسط‌شونده،
نانوکامپوزیت،
روش سل-ژل،
حفاظت غیرفعال در برابر
آتش،
بهینه‌سازی فرمول‌بندی.

پوشش‌های ضدحریق و مقاوم در برابر آتش: مروری بر مبانی، بهینه‌سازی فرمول‌بندی و فناوری‌های نوین

مجید میرزایی

تهران، پژوهشگاه نیرو، گروه پژوهشی مواد غیرفلزی

چکیده ...

پوشش‌های ضدحریق و مقاوم در برابر آتش به‌عنوان یکی از کارآمدترین و اقتصادی‌ترین راهکارهای حفاظت غیرفعال، نقش کلیدی در تأخیر اشتعال، کاهش انتقال حرارت و محدود کردن گسترش شعله ایفا می‌کنند. این مقاله مروری با هدف نظام‌مندسازی دانش موجود در چهار حوزه اصلی تدوین شده است: نخست، مبانی و سازوکارهای عملکرد با تمایز دو دسته پوشش‌های منبسط‌شونده (تشکیل لایه زغالی متورم با قابلیت انبساط تا ۱۰۰ برابر) و غیرمنبسط‌شونده (سازوکار فاز گازی یا تشکیل لایه شیشه‌ای). دوم، بهینه‌سازی فرمول‌بندی مبتنی بر شواهد تجربی صنعتی که نشان می‌دهد انتخاب چسب پلیمری مناسب، نسبت بهینه اجزای اصلی و افزودنی‌های نانورسی و الیاف تقویت‌کننده تأثیر مستقیمی بر پایداری حرارتی و یکپارچگی لایه زغالی دارند. سوم، فناوری‌های نوین نظیر نانوکامپوزیت‌ها و روش سل-ژل که با ایجاد پوشش‌های شفاف و حفظ زیبایی زیرلایه، دامنه کاربرد این سامانه‌ها را به‌طور قابل توجهی گسترش داده‌اند. در بخش پایانی، با توجه به چالش‌های مرتبط با کاربرد مستقیم پوشش‌ها بر روی زیرلایه‌های حساس (آسیب‌های شیمیایی، کاهش استحکام و تغییرات ظاهری)، رویکرد «کاربرد غیرمستقیم» بر روی مواد پشتیبان به‌عنوان راهکاری کم‌تأثیر و منطبق با اصول برگشت‌پذیری پیشنهاد می‌شود. با این وجود، فقدان پژوهش‌های نظام‌مند در مقایسه مستقیم فرمول‌بندی‌های مختلف و ارزیابی پایداری طولانی‌مدت این پوشش‌ها، همچنان خلأ اساسی در دانش فعلی است.

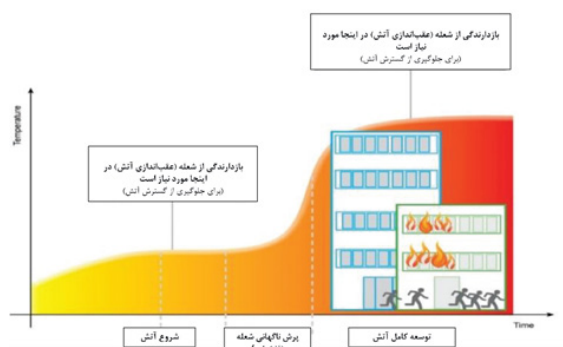
کلیدواژه‌ها:

*پست الکترونیکی مسئول مکاتبات:

mjmirzaei@nri.ac.ir*

۱ مقدمه

مختلف حریق تفاوت اساسی دارد. شکل ۱ سیر تحول آتش در محفظه‌ای بسته را نشان می‌دهد و مشخص می‌کند که هر دسته از پوشش‌ها در کدام بازه زمانی بیشترین نقش را ایفا می‌کنند [۲]. پیش از وقوع پدیده فلش اور (اشتعال همگانی در محوطه)، ویژگی‌های ذاتی مواد نقش تعیین‌کننده‌ای در شدت‌یابی آتش دارند. در این مرحله، پوشش‌های ضدحریق هستند که با تأثیر بر عواملی چون زمان اشتعال، نرخ گسترش شعله، میزان آزادسازی گرما، شدت تولید دود و غلظت گازهای سمی، واکنش ماده در برابر حریق را مهار یا تعدیل می‌کنند. در مقابل، پس از عبور از نقطه فلش اور و ورود به فاز آتش کاملاً توسعه یافته، حفاظت از سازه در برابر فروپاشی بر عهده پوشش‌های مقاوم در برابر آتش است. آتش‌سوزی‌های پس از فلش اور که دمایی بالاتر از ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد دارند، برای یکپارچگی سازه‌ها بسیار مخاطره‌آمیز تلقی می‌شوند [۳]. به عبارت دیگر، پوشش‌های ضدحریق عمدتاً به منظور مدیریت واکنش مواد در برابر آتش طراحی شده‌اند و کاربرد اصلی آن‌ها بر روی مواد قابل اشتعال نظیر چوب، اسفنج، منسوجات، کابل‌های برق و کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف است. هدف این پوشش‌ها، کندکردن فرایند احتراق یا جلوگیری از اشتعال این مواد است. در مقابل، پوشش‌های مقاوم در برابر آتش (یا محافظ در برابر آتش) برای تأمین مقاومت ذاتی سازه در برابر حریق به کار می‌روند و عمدتاً از مواد غیرقابل اشتعال در برابر حرارت شدید محافظت می‌کنند. ارزیابی عملکرد هر یک از این دو دسته، مستلزم به‌کارگیری عوامل آزمایشی متفاوتی است. برای مواد قابل اشتعال شاخص‌هایی چون حد اکسیژن مورد نیاز برای احتراق، سرعت گسترش شعله در سطح، مدت زمان تأخیر در اشتعال، شدت حرارت خروجی، مقدار دود تولیدشده و غلظت گازهای سمی مورد سنجش قرار می‌گیرند. در حالی که برای مواد غیرقابل اشتعال، سه معیار عایق‌بودن حرارتی، حفظ یکپارچگی فیزیکی و ظرفیت باربری در برابر حرارت از اولویت بالاتری برخوردارند.



خسارات سنگین جانی و مالی ناشی از آتش، همراه با درد و رنج انسانی و زیان‌های اقتصادی گسترده‌ای که این پدیده به همراه دارد، سبب شده است که توسعه راهکارهای کارآمد برای حفاظت در برابر حریق به یکی از اولویت‌های پژوهشی و صنعتی تبدیل شود. هدف نهایی این تلاش‌ها، مهار تلفات و کاهش آسیب‌های ناشی از آتش تا حدی قابل قبول است. در شرایط کنونی، تحولات سریع در صنعت ساختمان و پیشرفت فناوری معماری، سازه‌هایی با پیچیدگی بی‌سابقه و استفاده از اجزای سبک ولی مستحکم پدید آورده است. در چنین سازه‌هایی، طیف وسیعی از مواد اعم از آلی، معدنی، مصنوعی یا طبیعی، غالباً در برابر حرارت شدید ناشی از آتش به سرعت شعله‌ور می‌شوند یا می‌سوزند. در سوی دیگر، موادی مانند بتن و فلزات (به استثنای منیزیم و آلومینیوم) ذاتاً نمی‌سوزند، در فرایند احتراق شرکت نمی‌کنند و بخارات قابل اشتعال از خود متصاعد نمی‌سازند. با این حال، این نکته حائز اهمیت است که چنین موادی نیز تنها برای بازه زمانی مشخصی می‌توانند در برابر حرارت تاب‌آوری کنند؛ چراکه استحکام و شکل‌پذیری آن‌ها در دماهای بالا به‌طرز چشمگیری کاهش می‌یابد و در نتیجه، اعضای سازه‌ای در معرض آتش ممکن است تغییر شکل دهند یا حتی به کلی فرو بریزند. مدت زمانی که هر سازه می‌تواند در شرایط حریق دوام آورد، تا میزان زیادی به دمای پیش‌بینی شده آتش وابسته است و این دما نیز خود تابعی از نوع و مقدار مواد سوختنی موجود و وضعیت تهویه است [۱]. هرچند هیچ پوششی نمی‌تواند محافظت ابدی در برابر آتش فراهم آورد، اما کاربرد صحیح آن‌ها می‌تواند روند گسترش شعله را به تأخیر انداخته یا یکپارچگی سازه را برای مدتی حفظ کند و بدین ترتیب زمان ارزشمندی را برای اجرای اقدامات ایمنی و اطفای حریق فراهم سازد. از این رو، نه تنها ثبت و تحلیل این فجایع، بلکه تبدیل درس‌های آن‌ها به دستورالعمل‌های فنی و اجرایی برای حفاظت غیرفعال، ضرورتی جدی است. در ادامه موضوع بازدارندگی آتش در فراورده‌های چوبی و فلزی، بر اساس آنچه در منابع علمی آمده است، مورد بحث قرار خواهد گرفت.

۲ تمایز پوشش‌های ضدحریق و مقاوم در برابر آتش

یکی از موضوعات همواره بحث‌برانگیز در زمینه مهار آتش، تمایز قائل شدن میان پوشش‌های ضدحریق و پوشش‌های مقاوم در برابر آتش است. اگرچه این دو اصطلاح گاه به جای یکدیگر به کار می‌روند، اما کاربرد و سازوکار عملکرد آن‌ها در مراحل

قابل اشتعال طراحی می‌شوند. این پوشش‌ها بر اساس نقشی که در تشدید آتش و دود ایفا نمی‌کنند، در کلاس‌های A، B یا C رده‌بندی می‌شوند. نرخ گسترش شعله در این پوشش‌ها تابعی از نوع زیرلایه و ضخامت لایه خشک است. در مقابل، پوشش‌های منبسط‌شونده در اثر حرارت دچار تورم شده و لایه زغالی چندسلولی پدید می‌آورند. این لایه زغالی به‌عنوان سد عایق، انتقال حرارت و جرم میان فاز متراکم و فاز بخار را کند می‌کند و ضخامت آن می‌تواند تا ۵۰ برابر ضخامت اولیه پوشش افزایش یابد. پوشش‌های ضدحریق در دو نوع رنگی و لاک شفاف در بازار عرضه می‌شوند و بسته به زیرلایه هدف، واکنش متفاوتی در برابر آتش نشان می‌دهند. حوزه‌های کاربرد این پوشش‌ها شامل صنعت ساخت‌وساز، حمل‌ونقل، پوشش دیوار و سقف و سایر زمینه‌هایی است که محصولات باید الزامات کلاس‌های ایمنی در برابر آتش را برآورده کنند.

فرایند احتراق پوشش‌های سطحی عموماً از طریق سازوکار رادیکال آزاد توصیف می‌شود، که در آن رادیکال‌های H[•] و OH[•] به عنوان حامل‌های زنجیره در واکنش‌های ناحیه شعله شرکت می‌کنند. عملکرد پوشش‌های ضدحریق در حفاظت از زیرلایه، به سازوکار مواد بازدارنده شعله وابسته است [۶]. برای نمونه، فرمول‌بندی‌های حاوی ترکیبات هالوژنه عمدتاً در فاز گازی اثر می‌کنند. این ترکیبات با تشکیل یک لایه بخار هالوژن در ناحیه شعله، تولید رادیکال‌های آزاد بسیار واکنش‌پذیر را مختل کرده، روند انتشار شعله را متوقف می‌سازند. اما اشکال اساسی این ترکیبات، آزادسازی گازهای سمی و خوردنده در هنگام سوختن و در نتیجه نایمنی زیست‌محیطی آن‌هاست. در سوی دیگر، بازدارنده‌های شعله فسفردار بسته به نوع ترکیب و چسب پلیمری، سازوکار متفاوتی دارند. این مواد اغلب در فاز متراکم عمل کرده، لایه زغالی محافظی پدید می‌آورند که سدی فیزیکی در برابر انتقال حرارت از شعله به زیرلایه و انتشار گازها ایجاد می‌کند. همچنین برخی از ترکیبات فسفردار در فاز بخار نیز مؤثرند و می‌توانند رادیکال‌های پرانرژی شعله را مهار کنند. بازدارنده‌های شعله منبسط‌شونده از سه جزء اصلی تشکیل شده‌اند: منبع اسید، منبع کربن (زغال‌ساز) و منبع گاز (عامل دمنده). گاهی هر سه نقش در یک ترکیب واحد جمع می‌شود. سازوکار این پوشش‌ها بدین صورت است که در دمای بالا، واکنش تجزیه گرماگیر رخ داده، پوشش متورم می‌شود و لایه زغالی بسیار متخلخل، ضخیم و پایدار با رسانایی حرارتی بسیار پایین (عایق حرارتی) پدید می‌آید. سایر بازدارنده‌های شعله مانند اکسیدها و هیدروکسیدهای فلزی نیز از طریق خنک‌سازی (با آزادسازی آب)، رقیق‌سازی یا حذف سوخت‌های قابل

همچنین انتخاب روش آزمون مناسب به نوع ماده، کاربرد نهایی و حتی منطقه جغرافیایی و استانداردهای ملی حاکم بر آن کشور بستگی دارد؛ از این رو استانداردهای آزمایش برای پوشش‌های ضدحریق و مقاوم در برابر آتش در نقاط مختلف جهان یکسان نیست.

۳ پوشش‌های ضدحریق

پوشش‌های آلی متداول به‌طور ذاتی قابلیت اشتعال بالایی دارند و در معرض حرارت، ضمن ذوب شدن و چکیدن، می‌توانند آسیب قابل‌توجهی به زیرلایه وارد آورند. از این رو، انتظار می‌رود پوششی که به‌منظور حفاظت در برابر آتش فرموله می‌شود، نه تنها سوخت قابل‌توجهی به آتش نیفزاید، بلکه هم‌زمان گسترش شعله و تولید دود را نیز محدود کند. پوشش‌های ضدحریق از دیرباز به عنوان یکی از ساده‌ترین، قدیمی‌ترین و کارآمدترین روش‌ها برای محافظت از مواد در برابر حریق شناخته شده‌اند. مزیت این رویکرد در آن است که بدون ایجاد تغییر شیمیایی در زیرلایه، صرفاً با تشکیل لایه محافظ، شار حرارتی ورودی به زیرلایه را تغییر داده، فرایند تخریب حرارتی، اشتعال یا احتراق را به تأخیر می‌اندازد یا مهار می‌کند [۴]. پوشش ضدحریق ایده‌آل باید معیارهایی چون گسترش شعله حداقلی، تولید ناچیز دود و گازهای سمی، سهولت در اجرا، مقاومت سایشی مطلوب، چسبندگی کافی به زیرلایه و هزینه اقتصادی را برآورده سازد. فرمول‌بندی‌های سنتی این پوشش‌ها غالباً بر پایه آلکیدی‌های کلردار، رزین‌های اپوکسی برومینه همراه با هیدروکسید آلومینیوم، یا ترکیبی از پارافین کلردار و اکسید آنتیموان تهیه می‌شوند. با این حال، در بازار امروز، طیف گسترده‌ای از مواد بازدارنده شعله به دو شکل افزودنی و واکنشی و در دسته‌های مختلف (هالوژنه، فسفردار، نیتروژنه، معدنی، اکسیدی، منبسط‌شونده و نانوپرکننده‌ها) در دسترس است که می‌توان آن‌ها را در فرمول‌بندی پوشش به کار برد. انتخاب نوع بازدارنده شعله بسته به چسب پلیمری مورد استفاده در پوشش و کاربرد نهایی آن قابل سفارشی‌سازی است. پوشش‌های ضدحریق از نظر ظاهری مشابه رنگ‌های معماری بوده و اغلب به شکل حلالی عرضه می‌شوند و با روش‌های رایجی همچون قلم‌مو، غلتک یا پاشش قابل اجرا هستند. بر اساس رفتار در هنگام حرارت‌دیدگی، پوشش‌های ضدحریق به دو دسته کلی تقسیم می‌شوند: پوشش‌های غیرمنبسط‌شونده و پوشش‌های منبسط‌شونده [۵]. دسته نخست عمدتاً جنبه تزئینی - معماری دارند و با دارا بودن افزودنی‌های بازدارنده شعله، برای کاهش نرخ گسترش شعله و میزان تولید دود در زیرلایه‌های

اشتعال و اکسیژن عمل می‌کنند.

۴ ارزیابی قابلیت بازدارندگی آتش در مواد قابل اشتعال

مواد قابل اشتعال به‌طور ذاتی مستعد آتش‌گیری سریع هستند و در مرحله پیش از فلش‌اور، نرخ رشد و گسترش شعله در آن‌ها چشمگیر است. مدت زمان وقوع فلش‌اور، چه در عرض چند ثانیه و چه به تدریج، مستقیماً به سرعت رشد آتش بستگی دارد. در میان طیف گسترده مواد قابل اشتعال مورد استفاده در صنعت ساختمان، چوب پرمصرف‌ترین است و پس از آن پلیمرها (شامل پلاستیک‌ها و لاستیک‌ها)، اسفنج‌ها، منسوجات، کابل‌ها و کامپوزیت‌های تقویت‌شده قرار دارند. برای محدود کردن رشد و گسترش آتش در چوب، سه روش اصلی به کار می‌رود: کاربرد لاک‌ها و رنگ‌های شفاف، استفاده از پوشش‌های واکنشی منبسط‌شونده رنگی و اشباع سطحی چوب با مواد بازدارنده.

در نظام طبقه‌بندی اروپایی (Euro-Class)، ارزیابی واکنش مواد در برابر آتش بر پایه شاخصی به نام نرخ رشد آتش (FIGRA) انجام می‌شود. این شاخص بیانگر زمانی است که ماده‌ای در آزمون مرجع استاندارد BS EN ۱۴۳۹۰ طول می‌کشد تا به نقطه فلش‌اور برسد. افزون بر این، روش‌های آزمون دیگری نیز برای تعیین درجه‌بندی اروپایی پوشش‌های ضدحریق کاربرد دارند: آزمون تک‌آیتم سوز (SBI) مطابق با BS EN ۱۳۸۲۳ (۲۰۰۲)، آزمون پنل تابشی برای پوشش‌های کف بر اساس EN ISO ۹۲۳۹-۱ (۲۰۰۲)، و همچنین آزمون شعله کوچک BS EN ۱۱۹۲۵-۲ (۲۰۰۲) یا کالری‌متر بمبی (BS EN ISO ۱۷۱۶) [۷]. در بریتانیا، پیش از هماهنگ‌سازی با استانداردهای اروپایی، دو روش آزمون اصلی برای مواد قابل اشتعال مورد استفاده قرار می‌گرفت: آزمون انتشار آتش (BS۴۷۶، بخش ۶، ۱۹۸۹) و آزمون گسترش سطح شعله (BS۴۷۶، بخش ۷، ۱۹۸۷). روش نخست برای سنجش سهم نسبی محصول در تشدید آتش طراحی شده است و نتیجه آن به‌صورت شاخص انتشار آتش (I) همراه با سه زیرشاخص i_1 ، i_2 و i_3 گزارش می‌شود. هر چه مقدار این شاخص بالاتر باشد، نقش آن ماده در رشد و شدت‌یابی آتش بیشتر است. روش دوم گسترش جانبی شعله را در امتداد سطح نمونه اندازه‌گیری می‌کند؛ نمونه در زاویه قائم نسبت به پنل تابشی با شدت بالا نصب می‌شود. بر اساس میزان و نرخ گسترش شعله، نمونه در یکی از دسته‌های ۱ تا ۴ جای می‌گیرد که دسته ۱ مطلوب‌ترین و دسته ۴ نامطلوب‌ترین وضعیت را نشان می‌دهد. در ایالات متحده و بسیاری از استانداردهای بین‌المللی، روش‌های ASTM E84 (نسخه ۲۰۱۰) و ISO5660

بیشترین کاربرد را برای آزمون مواد قابل اشتعال دارند. عملکرد سامانه پوشش ضدحریق به عوامل متعددی وابسته است که از آن جمله می‌توان به ضخامت لایه پوشش، چگالی آن، نوع زیرلایه، ساختار کامپوزیت و جنس پنل اشاره کرد. برای هر محصول جدید، لازم است نمونه‌های معرف تحت آزمون قرار گیرند تا تأثیر هر یک از این عوامل متغیر به‌درستی لحاظ شده و ارزیابی جامعی از رفتار ماده در برابر آتش به‌دست آید.

۵ چوب به‌عنوان زیرلایه قابل اشتعال

چوب از دیرباز به‌دلیل دارا بودن ویژگی‌هایی چون سازگاری با محیط زیست، زیبایی طبیعی، تجدیدپذیری و انعطاف‌پذیری در کاربردهای مختلف، یکی از پرمصرف‌ترین مصالح ساختمانی و تزئینی به شمار می‌رود. این ماده بر اساس ساختار تشریحی خود به دو دسته کلی چوب‌های سخت و نرم طبقه‌بندی می‌شود که از نظر درصد ترکیبات سه‌گانه سلولز، همی سلولز و لیگنین با یکدیگر تفاوت دارند. طیف وسیعی از فراورده‌های چوبی از جمله پانل‌های مبتنی بر چوب جامد (مانند تخته خرده‌چوب، تخته سخت، تخته فیبر و تخته سه‌لا)، الوارهای سازه‌ای، الوارهای چندلایه چسبی، روکش‌ها و کفپوش‌های چوبی، به‌طور گسترده در ساخت‌وساز، کف‌پوش‌ها و مبلمان منازل، مدارس و ادارات سراسر جهان به کار می‌روند. با وجود این مزایا، چوب کاستی‌های اساسی نیز دارد که از آن جمله می‌توان به قابلیت اشتعال بالا، پایداری ابعادی ضعیف (تغییر شکل در برابر رطوبت و دما) و مقاومت کم در برابر عوامل زیستی مخرب اشاره کرد. این نواقص زمانی که چوب به‌عنوان ماده سازه‌ای به کار می‌رود، باید مورد توجه ویژه قرار گیرند. به‌دلیل اشتعال‌پذیری بالای چوب و نقشی که در تغذیه آتش به‌عنوان سوخت ایفا می‌کند، این ماده در رده مصالح ضعیف از نظر ایمنی در برابر حریق طبقه‌بندی می‌شود. احتراق شعله‌ور چوب عمدتاً توسط سلولز موجود در دیواره سلولی آن پشتیبانی می‌شود [۸]. در چوب تیمار شده با مواد بازدارنده شعله، پنج سازوکار اصلی برای مهار آتش شناسایی شده است: نخست، تسریع فرایند آب‌زدایی و کربن‌دار کردن سطح که منجر به ایجاد لایه عایق حرارتی می‌شود؛ دوم، اعمال اصلاحات شیمیایی در مسیر گرماکافت چوب؛ سوم، جذب گرمای محیط از طریق واکنش‌های گرماگیر؛ چهارم، مهار احتراق شعله‌ور در فاز گازی؛ و پنجم، افزایش رسانایی حرارتی چوب به‌منظور دفع سریع‌تر گرما از سطح [۹]. اعمال تیمار بازدارندگی معمولاً یا از طریق پوشش سطحی با روش‌های رنگ‌آمیزی، پاشش یا غوطه‌وری انجام می‌شود یا با بهره‌گیری از روش خلأ تحت فشار یا

تیمار پلاسم، مواد بازدارنده به عمق ساختار چوب نفوذ داده می‌شوند [۱۰]. در هر دو حالت، هدف جلوگیری از اشتعال و مهار گسترش شعله است. نکته قابل توجه آنکه سه جزء اصلی چوب بازه‌های دمایی متفاوتی برای تجزیه دارند: همی سلولز در گستره ۲۰۰ تا ۲۶۰ درجه سانتی‌گراد، سلولز در گستره ۲۴۰ تا ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد و لیگنین در گستره ۲۸۰ تا ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد تجزیه می‌شوند. در اثر حرارت، چوب دچار تخریب و احتراق شده و محصولات چوبی گازه‌های فرار، قیرها (از جمله لووگلوکوزان) و زغال کربنی تولید می‌کند. مطالعات گسترده‌ای بر روی رفتار آتش‌سوزی فرآورده‌های چوبی و روش‌های آزمون آن انجام شده است. بازدارنده‌های شعله سنتی مانند ترکیبات بور، اسیدهای معدنی و نمک‌های معدنی (از جمله فسفات مونوآمونیم، فسفات دی‌آمونیم، فسفات گوانیل‌اوره، فسفات گوانیدین، پلی‌فسفات آمونیوم و فسفات ملامین) می‌توانند خواص ضدحریق چوب را به‌طور قابل ملاحظه‌ای بهبود بخشند. با این حال، با افزایش آگاهی‌های زیست‌محیطی و نگرانی‌های مرتبط با ایمنی مصرف‌کننده، تمایل به استفاده از سامانه‌های مبتنی بر بور و فرمالدئید رو به کاهش است. نمک‌های معدنی نیز اگرچه مؤثرند، اما می‌توانند عوارض جانبی نظیر افزایش رطوبت‌پذیری، کاهش استحکام (و در نتیجه بی‌ثباتی ابعادی)، تخریب تدریجی چوب، خوردگی اتصال‌دهنده‌های فلزی، مشکلات چسبندگی و افزایش سایش را به همراه داشته باشند. در شرایط کنونی، بازدارنده‌های شعله مبتنی بر فسفر، نیتروژن، سیلیکون و افزودنی‌های زغال‌ساز، همچنان راهکارهای برجسته و امیدوارکننده‌ای برای حل معضل اشتعال‌پذیری چوب و نیز رعایت ملاحظات زیست‌محیطی به‌شمار می‌روند [۱۱].

کالری متر مخروطی رایج‌ترین روش آزمایشگاهی در مقیاس کوچک برای ارزیابی اشتعال‌پذیری چوب است. در مطالعه‌ای، شی و چو عملکرد منوکسیدکربن شش گونه چوب را تحت شارهای حرارتی خارجی متفاوت و با رطوبت‌های گوناگون و در شرایط اشتعال خودبه‌خودی در کالری متر مخروطی بررسی کردند. اشتعال خودبه‌خودی پدیده‌ای پیچیده است که در آن ماده قابل اشتعال بدون حضور جرقه یا شعله خارجی و صرفاً بر اثر گرمایش داخلی مشتعل می‌شود. این نوع اشتعال در مقایسه با اشتعال با جرقه، شباهت بیشتری به روند واقعی آتش‌سوزی دارد. نتایج این پژوهش نشان داد که ضخامت چوب تأثیر اندکی بر حداکثر نرخ انتشار منوکسیدکربن دارد، اما زمان رسیدن به این حداکثر با افزایش ضخامت به تأخیر می‌افتد. همچنین با افزایش شار حرارتی خارجی، حداکثر نرخ انتشار CO کاهش می‌یابد، هرچند این کاهش در گستره ۵۰ تا ۷۵

کیلووات بر مترمربع چندان چشمگیر نیست. میانگین بازده CO نیز با شار حرارتی خارجی، ضخامت و چگالی رابطه معکوس نشان داد. محققان نتیجه گرفتند که هم شعله و هم رطوبت موجود در چوب می‌توانند نرخ انتشار CO را کاهش دهند، چراکه انرژی مصرف‌شده برای تبخیر آب با افزایش رطوبت بیشتر می‌شود. در پژوهشی دیگر، اثر شار حرارتی متغیر و غلظت‌های مختلف اکسیژن (۲۰/۹، ۱۸، ۱۶ و ۱۵ درصد) بر زمان اشتعال و نرخ کاهش جرم چوب مورد بررسی قرار گرفت تا عوامل جنبشی نظیر انرژی فعال‌سازی و ضریب فرکانس استخراج شوند. نتایج حاکی از آن بود که با افزایش غلظت اکسیژن، نرخ کاهش جرم افزایش می‌یابد، اما زمان اشتعال، انرژی فعال‌سازی و ضریب فرکانس کاهش می‌یابند. در نهایت، شار حرارتی بحرانی مورد نیاز برای اشتعال طیف گسترده‌ای از محصولات چوبی بین ۱۰ تا ۱۳ کیلووات بر مترمربع برآورد شده است. چگالی، ضخامت و محتوای رطوبت از مهم‌ترین عواملی هستند که بر این خواص وابسته به ماده تأثیر می‌گذارند. در ارزیابی رفتار آتش‌گیری چوب، یکی از عوامل کلیدی که تعیین‌کننده میزان باقی‌مانده مقطع مقاوم پس از حریق است، نرخ پیشروی زغال‌شدگی در عمق ماده نام دارد. این نرخ که بر حسب واحد زمان سنجیده می‌شود، تابعی از عوامل متعددی نظیر گونه چوب، تراکم، رطوبت داخلی، نفوذپذیری، ترکیب شیمیایی و همچنین جهت الیاف نسبت به منبع حرارت است. برای نمونه، در چوب تیمارشده با مواد بازدارنده شعله، نرخ زغال‌شدگی با میزان شار حرارتی اعمال‌شده در کالری متر مخروطی رابطه‌ای مستقیم و خطی دارد، درحالی‌که با افزایش چگالی چوب، این نرخ کاهش می‌یابد [۱۲]. از نظر ساختاری، چوب زغال‌شده را می‌توان به دو ناحیه مجزا تقسیم کرد: نخست، لایه گرماکافت که منطقه فعال تخریب حرارتی و تشکیل زغال است و دوم، لایه زغالی که ناحیه‌ای از کربن ترک‌خورده و فاقد استحکام یا سفتی قابل ملاحظه است. مرز میان این دو ناحیه، خط زغال‌شدگی نامیده می‌شود و عمق زغال‌شدگی به‌عنوان فاصله میان سطح بیرونی قطعه چوبی و این خط تعریف می‌شود. مطالعات نشان داده‌اند که جبهه پیشروی لایه زغال عمدتاً در گستره دمایی ۲۸۰ تا ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد قرار دارد [۱۲]. در پژوهشی تجربی، بایکیرچر و همکاران با استفاده از کالری متر مخروطی و آزمون کوره استاندارد ISO 834 (که منحنی زمانی-دمای آتش سلولزی را شبیه‌سازی می‌کند)، به بررسی تأثیر پوشش‌های منبسط‌شونده (در دو نوع شفاف و رنگی) بر نرخ زغال‌شدگی، کاهش جرم و تغییرات دمایی چوب نروژی پرداختند. یافته‌های این تحقیق نشان داد که اعمال پوشش منبسط‌شونده در مقایسه با نمونه

در مطالعه‌ای وزن‌سنجی حرارتی در اتمسفر هوا، نمونه‌های چوب تیمار شده با غلظت‌های مختلف DAP (۲۰ تا درصد) و با نرخ‌های حرارتی ۵ تا ۲۰ درجه سانتی‌گراد بر دقیقه، تجزیه سه‌مرحله‌ای (تجزیه چوب، فاز القا و اکسایش زغال) را نشان دادند. عوامل جنبشی برآورد شده مستقل از نرخ حرارت بودند اما با غلظت DAP تغییر می‌کردند، هرچند انرژی فعال‌سازی مراحل مختلف - به جز مرحله تجزیه سلولز - تقریباً ثابت باقی ماند [۱۳].

در پژوهشی دیگر، عملکرد آتش‌سوزی چوب داگلاس صنوبر تحت تیمار هم‌زمان با عصاره‌های طبیعی و مخلوط اسیدبوریک و بوراکس مورد ارزیابی قرار گرفت. هدف از این تیمار دوگانه، بهره‌مندی هم‌زمان از مقاومت زیستی عصاره‌های طبیعی و خاصیت بازدارندگی آتش بورات‌ها بود. نتایج نشان داد که هر دو نمونه چوب تیمار شده، عملکرد ضدحریق عالی از خود نشان می‌دهند [۱۴]. تومارک و کاودار نیز تأثیر پودر بور، مخلوط اسیدبوریک و بوراکس و بازدارنده شعله تجاری مبتنی بر مخلوط سنگ آهک و روغن سیلیکون را بر شاخص اکسیژن چوب کاج اسکاتلندی، هم در حالت تازه و هم پس از فرایند شستشو (برای سنجش پایداری تیمار)، بررسی کردند. شاخص اکسیژن حداقل درصد اکسیژن مورد نیاز برای ادامه احتراق شعله‌ور در شرایط آزمایشگاهی است. نمونه‌های چوب نخست با خلأ تیمار شده، سپس تحت شستشو قرار گرفتند. نتایج نشان داد که چوب تیمار شده با بازدارنده‌های شعله بیشترین مقدار شاخص اکسیژن را داراست و فرایند شستشو تغییر چندانی در آن ایجاد نمی‌کند. هرچند در نمونه‌های تیمار شده، مقدار شاخص اکسیژن تا حدودی تحت تأثیر شستشو قرار گرفت که به عدم اتصال شیمیایی مواد نگه‌دارنده به چوب نسبت داده شد (شکل ۳) [۱۵].

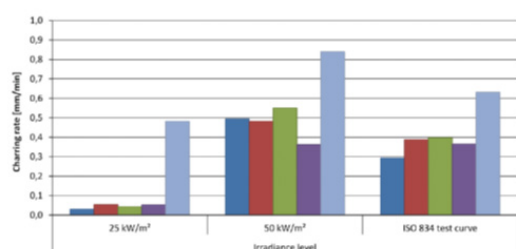
۶-۲ ترکیبات مبتنی بر فسفر

استفاده از ترکیبات حاوی نیتروژن و اسید فسفریک به‌عنوان بازدارنده شعله در تیمار چوب، موضوع پژوهش‌های متعددی بوده است. در این میان، روش تیمار نقشی تعیین‌کننده در کارایی نهایی دارد. مطالعات نشان داده‌اند که تیمار با پرس حرارتی در مقایسه با روش خشک‌کردن حرارتی، خواص چوب را بهبود می‌بخشد. همچنین مقدار و واکنش‌پذیری عاملی بازدارنده‌های شعله در حضور فرمالدئید، برای نمونه در سامانه‌های دی‌سیانیدی آمید-فرمالدئید-اسید فسفریک یا ملامین-دی‌سیانیدی آمید-فرمالدئید-اسید فسفریک، بر کارایی ضدحریق می‌افزاید. آزادسازی گرماگیر آب در طی تراکم اسیدفسفریک نیز با خنک‌کردن چوب و رقیق‌سازی گازهای گرماکافت فرار،

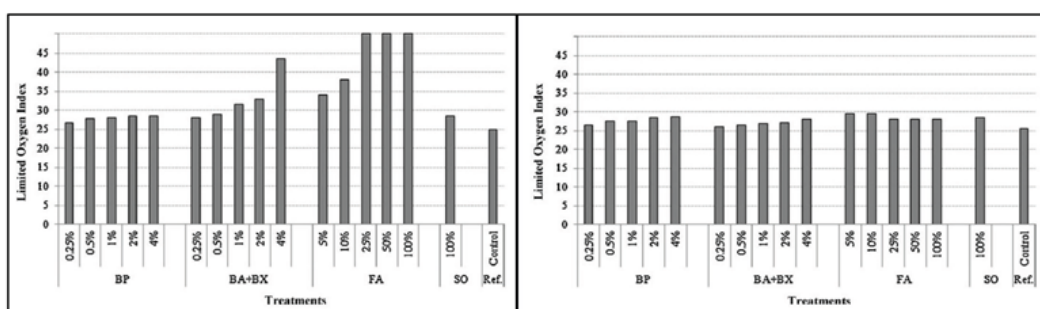
چوب بدون پوشش (مرجع)، در تمام سطوح تابش حرارتی و نیز در شرایط آتش سلولزی استاندارد، نرخ زغال‌شدگی را به‌طور چشمگیری کاهش می‌دهد (شکل ۲). به عبارت دیگر، پوشش‌های منبسط‌شونده علاوه بر آنکه شروع فرایند زغال‌شدگی را به تأخیر می‌اندازند، سرعت پیشروی زغال در عمق چوب را نیز به میزان قابل توجهی پایین می‌آورند. این ویژگی در کاربردهای مهندسی و حفاظتی به‌ویژه برای افزایش زمان مقاومت سازه‌های چوبی در برابر آتش از اهمیت بالایی برخوردار است [۲].

۶ پوشش‌های بازدارنده شعله ۶-۱ ترکیبات بور

در میان ترکیبات مورد استفاده برای کاهش اشتعال‌پذیری چوب، بورات‌ها جایگاه ویژه‌ای دارند. اسید بوریک و بوراکس که هر دو در آب حل می‌شوند، پرمصرف‌ترین بازدارنده‌های شعله در فراورده‌های چوبی محسوب می‌شوند. افزون بر خاصیت ضدحریق، فرمول‌بندی‌های حاوی بور به‌دلیل توانایی در افزایش مقاومت چوب در برابر حملات قارچی و حشرات، عمر مفید الوارها را نیز بهبود می‌بخشند. آثار و کشکین در پژوهشی، اثر اشباع چوب صنوبر اولوداغ با مخلوط اسیدبوریک و بوراکس (طبق استاندارد ASTM D1413-99 و با استفاده از فن خلأ) را بر قابلیت اشتعال آن بررسی کردند. ارزیابی اشتعال‌پذیری بر اساس استاندارد ASTM E160-50 نشان داد که اشباع با ترکیبات بور در مقایسه با نمونه‌های تنها لاک‌شده، کاهش چشمگیری در اشتعال‌پذیری ایجاد می‌کند. محققان نتیجه گرفتند که اعمال تیمار بور پیش از پوشش لاک، دمای احتراق را پایین آورده، ایمنی سازه چوبی را افزایش می‌دهد. در ادامه، آن‌ها تأثیر همین تیمار را بر خواص احتراقی الوارهای چندلایه ساخته شده از بلوط اروپایی و صنوبر لومباردی نیز مورد آزمون قرار دادند. در هر دو مورد، کمترین میزان احتراق در مجاورت منبع شعله در نمونه‌های تیمار شده با بور مشاهده شد که ناشی از برهم‌کنش مواد اشباع‌کننده با ساختار شیمیایی چوب است.



شکل ۲ نرخ زغال‌شدگی چوب پوشش‌داده‌شده با پوشش منبسط‌شونده و چوب بدون پوشش در معرض شرایط مختلف آزمون [۲].



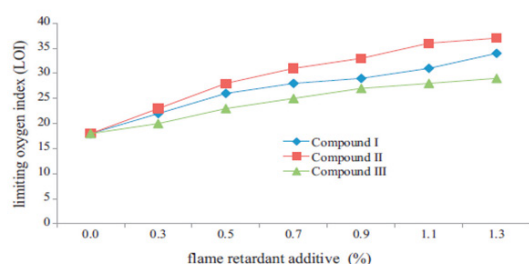
شکل ۳ شاخص اکسیژن (OI) چوب تیمار شده با بازدارنده شعله، قبل و پس از فرایند شستشو [۱۵].

زیرلایه را افزایش می‌دهد. رسوب سفید دی‌اکسیدسیلیکونی که سطح زغال را می‌پوشاند، همچون سپری در برابر تابش حرارتی عمل کرده و نرخ اکسایش زغال را کاهش می‌دهد [۲۲]. در پژوهشی تجربی، گرکسا و لوبکه اثر چهار ماده هیدروکسیدمنیزیم، فسفات مونوآمونیم، هیدروکسید آلومینیوم و اسیدبوریک را بر اشتعال‌پذیری تخته خرده‌چوب در کالری‌متر مخروطی با تابش خارجی ۵۰ کیلووات بر مربع مورد بررسی قرار دادند. ترکیب حاوی هیدروکسیدمنیزیم، فسفات مونوآمونیم و اسیدبوریک در مقایسه با نمونه‌ای که در آن اسیدبوریک با هیدروکسید آلومینیوم جایگزین شده بود، نرخ آزادسازی حرارت و تولید دود کمتری از خود نشان داد. توضیح این پدیده آن است که فسفر و نیتروژن با هم‌افزایی، مسیر گرماکافت را به سمت تولید زغال و آب بیشتر و مواد فرار قابل‌اشتعال کمتر هدایت می‌کنند، در حالی که بور موجود ذوب شده و سدی شیشه‌مانند بر سطح چوب پدید می‌آورد که زغال را تثبیت کرده، مانع انتقال جرم می‌شود. همچنین بازدارنده‌های شعله منبسط‌شونده مبتنی بر گرافیت قابل‌انقباض، در مقایسه با پلی‌فسفات آمونیوم با همان میزان بارگذاری، نرخ آزادسازی حرارت و کاهش جرم کمتری را برای تخته خرده‌چوب به همراه داشتند. به‌طورکلی، بازدارنده‌هایی که قادر به تشکیل لایه زغالی هستند، تأثیر بسزایی در بازدارندگی شعله چوب دارند و وجود این لایه

به مهار آتش کمک می‌کند [۱۶]. در پژوهشی مشابه، سوبیاکتو و همکاران نشان دادند که ترکیب تیمار اسیدفسفریک با پیش‌گرمایش و متراکم‌سازی سطح چوب، خواص ضدحریق را بهبود می‌بخشد. در این روش، رزین تری‌متیلول ملامین-فرمالدئید همراه با اسیدفسفریک روی سطح چوب اعمال شده، سپس پیش‌گرمایش و در ادامه پرس گرم انجام می‌شود. اشباع تحت فشار پوشش، بدون آنکه استحکام خمشی چوب کاهش یابد، خاصیت ضدحریق آن را افزایش داد [۱۷]. همچنین نشان داده شد که فسفر و آمیدها هنگامی که به سلولز متصل می‌شوند، در مقایسه با تیمار با پنتاکسید فسفر یا آمین، بازده زغال را افزایش داده و نرخ کاهش وزن را کاهش می‌دهند [۱۸]. استیونس و همکاران با اصلاح خاک اره کاج با استفاده از ترکیبات آلکیل و فیل کلروفسفر در حضور پیریدین، موفق به کاهش ۹۰ درجه سانتی‌گرادی دمای بیشینه نرخ گرماکافت و افزایش ۲۹ درصدی تشکیل زغال شدند. فیل فسفات‌ها کارایی بیشتری نسبت به آنالوگ‌های آلکیل خود داشتند و ترتیب اثربخشی (فسفات > فسفونات > فسفینات) به اسیدیته و پایداری حرارتی نسبت داده شد [۱۹]. در مطالعه‌ای دیگر، اشباع چوب با بازدارنده شعله ارگانوفسفرس همراه با ماده نگه‌دارنده مبتنی بر مس، شاخص نرخ رشد آتش (FIGRA) را ۱۵ درصد دیگر کاهش داد [۲۰].

۳-۶ سامانه‌های پوشش حاوی بازدارنده‌های شعله هم‌افزا

در سال‌های اخیر، ترکیبات حاوی سیلیکون و فسفر و نیز مخلوط‌های سه‌جزئی سیلیکون، فسفر و نیتروژن، توجه گسترده‌ای در حوزه بازدارندگی آتش به خود جلب کرده‌اند. سازوکار هم‌افزایی در این سامانه‌ها حاصل جمع اثرات مجزای هر یک از اجزا است: فسفر با کاتالیز کردن واکنش‌های زغال‌سازی، زمینه را برای تشکیل لایه محافظ فراهم می‌کند؛ نیتروژن با آزادسازی گازهای غیرقابل احتراق، نقش رقیق‌کننده سوخت‌های فرار را ایفا می‌کند و سیلیکون با استقرار لایه محافظ بر روی زغال در حال شکل‌گیری، پایداری حرارتی



شکل ۴ شاخص اکسیژن (OI) چوب پوشش‌داده‌شده با لاک حاوی ترکیبات سیکلودی‌فسفازان [۲۱].

اکسیژن و کاهش فرارشدن سوخت، از تداوم چرخه احتراق نیز جلوگیری می‌کند. پدیده انبساط در نتیجه استفاده از سامانه‌های پوشش بازدارنده شعله روی چوب، می‌تواند تشکیل زغال و انباشت گرما را کاهش داده، زمان شروع احتراق را به تأخیر اندازد [۲۷]. گاردنر و تامسون در پژوهشی، اشتعال‌پذیری فراورده‌های جنگلی شامل تخته‌های اره‌شده، تخته سه‌لا، تخته سخت و تخته خرده چوب را مطابق با استاندارد ASTM E906 (روش آزمون نرخ آزادسازی حرارت و دود مرئی) مورد ارزیابی قرار دادند. در این تحقیق، از بازدارنده شعله منبسط‌شونده برای تیمار تخته سه‌لا به روش اشباع تحت فشار استفاده شد. یافته‌ها نشان داد که در نمونه‌های تخته اره‌شده تیمار شده، زمان اشتعال با افزایش چگالی تغییر نکرد (زیرا شارهای حرارتی ۲۰ و ۴۰ کیلووات بر متر مربع اعمال شده بودند). اما در تخته سه‌لا، اشباع تحت فشار با بازدارنده شعله، زمان اشتعال را افزایش داد. همچنین پوشش‌های بازدارنده شعله، خواص آزادسازی حرارت هر دو نوع نمونه را کاهش دادند، هرچند میزان این کاهش به شار حرارتی اعمالی وابسته بود [۲۸]. چو و همکاران نیز تأثیر پودر گرافیت مصنوعی، ماده‌ای معدنی به نام سریسیت و مخلوط این دو را بر روی تخته سه‌لا بررسی کردند. فرمول‌بندی پوشش منبسط‌شونده شامل ۱۹/۸ درصد بازدارنده شعله، ۱۵ درصد عامل آب‌زدایی، ۱۸ درصد عامل کف‌ساز، ۷/۲ درصد چسب رزین و ۴۰ درصد حلال بود. نتایج نشان داد که اگر نسبت سریسیت در ترکیب بازدارنده آتش از ۷۵ درصد فراتر رود، مخلوط حاصله کمترین درجه اشتعال‌پذیری ممکن را بر اساس استاندارد تایوان CNS 7614 به‌دست می‌آورد. نکته جالب آنکه برای کارایی سریسیت در مهار احتراق، وجود عوامل کربنی‌کننده مانند گرافیت ضرورتی ندارد [۲۹].

رفتار سوختن تخته کتان پوشش داده‌شده با پوشش منبسط‌شونده نیز با استفاده از کالری‌متر مخروطی و آزمون تک‌آیتم سوز (SBI) مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان داد که این پوشش‌ها به‌طور قابل‌توجهی زمان اشتعال را افزایش داده، نرخ

زغالی، عملکرد ماده را در مواجهه با گرمای خارجی به‌طور چشم‌گیری نسبت به حالتی که چنین لایه‌ای وجود ندارد، تغییر می‌دهد. محققان نتیجه گرفتند که سامانه‌های بازدارنده شعله منبسط‌شونده پتانسیل لازم برای بهبود واکنش چوب در برابر آتش را دارا هستند [۲۳].

کربنات‌ها و بی‌کربنات‌ها به‌عنوان بازدارنده‌های شعله با کارایی بسیار بالا در فاز گازی شناخته می‌شوند. کربنات پتاسیم که دمای تجزیه نسبتاً بالایی (۸۰۰ درجه سانتی‌گراد) دارد، به‌عنوان کاتالیزور آب‌زدایی چوب عمل کرده، تولید زغال، آب و دی‌اکسید کربن را افزایش می‌دهد. با این حال، این ترکیب به‌ویژه در غلظت‌های بالا نمی‌تواند به‌طور مؤثر از بسپارزدایی چوب جلوگیری کند و همچنین باعث تولید منوکسید کربن می‌شود. از این رو، کربنات پتاسیم تنها در غلظت‌های پایین به کار می‌رود [۲۴]. تأثیر نمک‌های معدنی مختلفی چون Na_2WO_4 ، Na_2SnO_3 و Na_2MoO_4 بر تجزیه حرارتی و خواص ضدحریق چوب نیز مورد بررسی قرار گرفته است. تیمار با این نمک‌ها سبب افزایش شاخص اکسیژن نمونه‌های چوبی شد که ناشی از افزایش مقدار زغال تشکیل‌شده روی سطح بود. انرژی فعال‌سازی نمونه‌ها نیز در هر دو مرحله زغال‌سازی و کلسینه‌شدن پس از تیمار کاهش یافت. این بازدارنده‌ها با کاتالیز کردن واکنش آب‌زدایی، منجر به تولید بیشتر آب، دی‌اکسید کربن و زغال و در مقابل کاهش بخارات قابل اشتعال مانند لووگلوکوزان و لووگلوکز شدند [۲۵].

۷ پوشش‌های منبسط‌شونده (Intumescent)

پوشش‌های منبسط‌شونده، چه به شکل رنگی و چه به صورت شفاف، به‌عنوان یکی از کارآمدترین راهکارها برای بازدارندگی آتش در فراورده‌های چوبی معرفی شده‌اند. عملکرد این دسته از پوشش‌ها بدین صورت است که در مواجهه با حرارت، دچار تورم شده، به زغال تبدیل می‌شوند و اسفنجی کربنی پدید می‌آورند که سطح زیرین را در برابر آتش عایق می‌کند. این لایه زغالی افزون بر خاصیت عایق‌بودن، با محدود کردن نفوذ

جدول ۱ داده‌های کالری‌متر مخروطی برای تخته خاک اره [۲۶].

نمونه	حداکثر نرخ آزادسازی گرما (kW/m^2)	زمان رسیدن به حداکثر HRR (ثانیه)	میانگین HRR (kW/m^2)	کل گرمای آزاد شده (MJ/m^2)	نرخ تولید دود (m^3/s)	مجموع دود تولیدی (m^3/m^2)	شاخص رشد آتش (kW/sm^2)
SB-APP	۱۲۲۰۰	۴۰	۲۹۰۲	۴۰۴	۳۱۰	۴۰۱	۵۰۳
SB-AP-P/5A	۱۲۴۰۸	۶۰	۲۴۰۵	۳۰۳	۲۲۹	۲۰۰	۳۰۱
SB-AP-P/5A	۵۰۰۱	۵۰	۸۰۵	۱۰۱	۲۱۵	۱۰۹	۱۰۴

آزادسازی حرارت کمتری داشته، زمان رسیدن به این اوج را به تأخیر می‌اندازد. افزودن نانورس‌های اصلاح‌شده، بهبود بیشتری ایجاد کرد، اما نوع و مقدار نانورس نقشی تعیین‌کننده داشت. برای نمونه، ۳ درصد Cloisite 30B و ۵ درصد Cloisite 10A عملکرد بهتری نسبت به سایر سطوح بارگذاری نشان دادند. مطالعات طیف‌سنجی تأیید کرد که نانورس اصلاح‌شده، طول عمر ساختارهای زغالی فسفروکربنی را افزایش می‌دهد [۳۲]. در حوزه نانوپوشش‌های فلزی، رسانایی حرارتی بالای پوشش‌های حاوی نانونقره برای بهبود انتقال حرارت در چوب و افزایش بازدارندگی آتش مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج نشان داد که تیمار نانونقره قابلیت چشمگیری در بهبود برخی از خواص ضدحریق در محصولات چوب جامد دارد. به نظر می‌رسد این پوشش‌ها با کاهش انباشت گرما (که به سرعت منتقل می‌شود)، تخریب حرارتی و کربن‌دارکردن را به تأخیر می‌اندازند [۳۳]. نانولاستونیت نیز به‌عنوان افزودنی چندمنظوره در چوب معرفی شده است. گروه پژوهشی یادشده، کارایی نانوالیاف ولاستونیت را در بهبود دوام و خواص ضدحریق چوب صنوبر و کامپوزیت‌های چوب جامد گزارش کرده‌اند. اشباع چوب با ۱۰ درصد نانولاستونیت، هم خاصیت ضدحریق و هم پایداری ابعادی را افزایش داد. ولاستونیت به‌عنوان ماده معدنی، با ایجاد سدی فیزیکی غیرقابل نفوذ در برابر نفوذ شعله به ساختار چوب عمل می‌کند [۳۴]. در پژوهشی نوآورانه، نانوصفحات نیتريد بور شش‌ضلعی با استفاده از روش ساده لایه‌برداری فاز مایع با نیروی برشی سنتز شدند و به‌عنوان پوشش‌های چوبی بدون چسب و مقاوم در برابر اکسایش و آتش به‌کار رفتند. به‌دلیل نفوذپذیری و گسیل حرارتی بسیار پایین ذاتی این نانوصفحات، پوشش حاصل مقاومت استثنایی در برابر آتش و اکسایش تا دمای ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد از خود نشان داد [۳۵].

۱۰ مطالعه موردی فرمول‌بندی بهینه پوشش منبسط‌شونده برای سازه‌های فولادی

مقاله وختیوا و همکاران [۳۶]، نمونه‌ای برجسته از پژوهشی است که این شکاف را پر کرده، پلی میان دانش نظری و تولید صنعتی ایجاد می‌کند. این مطالعه با هدف دستیابی به پوشش منبسط‌شونده‌ای طراحی شد که بتواند درجه مقاومت حریق R120 (حداقل ۱۲۰ دقیقه) را برای سازه‌های فولادی باربر تأمین کرده، در عین حال از نظر اقتصادی برای تولید انبوه نیز مقرون‌به‌صرفه باشد. تمایز اصلی این پژوهش نسبت به بسیاری از مطالعات مشابه، در رویکرد گام‌به‌گام و چندسطحی آن نهفته است. محققان مسیر خود را از آزمون‌های ساده آزمایشگاهی

آزادسازی حرارت تخته کتان را کاهش می‌دهند. همچنین تأیید شد که نتایج تجربی با پیش‌بینی‌های عددی مبتنی بر حل‌های تحلیلی برای مواد زغال‌شونده و نرخ سوختن در آزمون SBI، از جمله ضریب کسری و نسبت شار حرارتی در سطح مشترک پوشش منبسط‌شونده و لایه زغالی، هم‌خوانی خوبی دارد. گرچه پوشش‌های منبسط‌شونده به‌طور معمول برای حفاظت از سازه‌های فولادی به کار می‌روند و کاربرد آن‌ها روی چوب نیز در برخی مطالعات و حتی محصولات تجاری دیده می‌شود، اما در حال حاضر استفاده گسترده از این پوشش‌ها برای حفاظت از فراورده‌های چوبی و مبتنی بر چوب رواج نیافته است.

۹ پوشش‌های نانو کامپوزیتی

در سال‌های اخیر، بهره‌گیری از نانوذرات در ساختار پوشش‌های ضدحریق، افق‌های جدیدی را در بهبود عملکرد این سامانه‌ها گشوده است. با این حال، چالش اصلی در کاربرد نانوذرات، دستیابی به پراکندگی یکنواخت آن‌ها در ماتریس پوشش است. اصلاح سطح نانوذرات، گامی ضروری برای افزایش سازگاری و حصول پراکندگی همگن به شمار می‌رود. یکی از مزایای مهم نانوپرکننده‌ها در مقایسه با هم‌تایان میکرونی خود، بارگذاری مورد نیاز بسیار پایین‌تر است که از منظر صنعتی و اقتصادی مزیتی بزرگ محسوب می‌شود. در تحقیقی، پودر نانورسی مرکب از مونت‌موریلونیت و نانوالیاف سلولز به‌عنوان پوشش ضدحریق شفاف برای چوب به کار گرفته شد. ارزیابی عملکرد آتش با کالری‌متر مخروطی در شار تابشی ۳۵ کیلووات بر متر مربع نشان داد که چوب پوشش‌داده‌شده با این نانوپودر، افزایش چشمگیری در زمان اشتعال داشته، کل حرارت آزادشده ۳۳ درصد و حداکثر میانگین نرخ انتشار حرارت ۴۶ درصد کاهش یافت. این بهبودها ناشی از عملکرد توأمان محافظ حرارتی و سد گازی است که تخریب حرارتی چوب و انتشار گازهای قابل اشتعال فرار را به تأخیر می‌اندازد [۳۰]. در پژوهشی دیگر، فوفا و همکاران اثر پوشش‌دهی چوب صنوبر با نانوذرات دی‌اکسیدتیتانیوم و/یا نانورس را بر واکنش به آتش و نفوذپذیری بخار آب بررسی کردند. نتایج کالری‌متر مخروطی در مقیاس کوچک حاکی از آن بود که این تیمارها نه تنها عملکرد واکنش به آتش را بهبود نمی‌بخشند، بلکه تأثیر منفی نیز بر جای می‌گذارند [۳۱]. چوانگ و همکاران به بررسی افزودن نانورس‌های تجاری (Cloisite 10A، Cloisite 30B و Cloisite 15A) در بارگذاری‌های ۱، ۳، ۵ و ۱۰ درصد به پوشش منبسط‌شونده تخته سه‌لا پرداختند. نتایج کالری‌متر مخروطی نشان داد که پوشش منبسط‌شونده در مقایسه با تخته سه‌لا بدون پوشش، نرخ اوج

جدول ۲ اجزای تشکیل دهنده رنگ منبسط شونده و درصد هر یک [۳۶].

IFR	چسب پلیمری	APP	MA	PE	TiO ₂	افزودنی ها	لایه
پایه آبی	۱۰	۲۵	۸	۱۰	۱۲	۵	۳۰
پایه حلالی	۱۰	۲۶	۱۰	۱۰	۹	۳	۳۲

نظیر اندازه گیری ضریب انبساط حجمی در کوره با دمای ۳۴۰ درجه سانتی گراد، آزمون مشعل با دمای شعله ۹۵۰ تا ۱۰۰۰ درجه سانتی گراد، تحلیل وزن سنجی حرارتی آغاز کردند. اما آنچه این تحقیق را از بسیاری کارهای مشابه متمایز می کند، اعتبارسنجی نهایی یافته ها از طریق آزمون های آتش در مقیاس کامل، مطابق با استانداردهای ملی (DSTU B V.1.1-14:2007) و (DSTU B V.1.1-13:2007) است که با استانداردهای اروپایی EN 1365-3:1999 و EN 1365-4:1999 هم خوانی دارد. در این آزمون ها، ستون ها و تیرهای فولادی I شکل با سطح مقطع مشخص (ضریب مقطع میان ۴/۲ تا ۶/۴ میلی متر) در معرض منحنی زمانی-دمای استاندارد سلولز (مطابق با ISO 834) قرار گرفتند و نقطه حدی نهایی بر اساس رسیدن دمای میانگین فولاد به ۵۰۰ درجه سانتی گراد تعریف شد [۳۶]. نخستین و شاید بنیادین ترین یافته این پژوهش، بازتعریف نقش چسب پلیمری

در سامانه منبسط شونده است. در نگاه سنتی، چسب تنها عاملی برای فیلم سازی و تأمین چسبندگی تلقی می شود، اما وختیوا و همکاران به روشنی نشان دادند که چسب پلیمری در واقع چهارمین جزء جدایی ناپذیر سامانه بازدارنده شعله محسوب می شود و مستقیماً بر دمای تخریب، گرانیروی مذاب، یکنواختی لایه زغالی و در نهایت مقاومت حریق تأثیر می گذارد. برای اثبات این ادعا، هشت نوع چسب مختلف (چهار نوع پایه آبی و چهار نوع پایه حلال) در فرمول بندی ثابت و با ضخامت یکسان (۱/۵±۰/۱۵ میلی متر) با یکدیگر مقایسه شدند (جدول ۲ و ۳) [۳۶]. نتایج این مقایسه تفاوت های چشم گیری را آشکار ساخت. پوشش هایی که از کوپلیمرهای وینیل استات غیرهالوژنه (مانند EZ 3010 و EZ 3112) استفاده کرده بودند، لایه زغالی متراکم، یکنواخت و با چسبندگی بالا به فولاد ایجاد کردند. ریشه این عملکرد برتر را باید در سازوکار تخریب دومرحله ای این پلیمرها جستجو کرد: نخست فرایند استیل زدایی در گستره ۳۰۰ تا ۴۰۰ درجه سانتی گراد و سپس شکست زنجیره های پلی انی در گستره ۴۰۰ تا ۵۰۰ درجه سانتی گراد (شکل ۵). این تخریب تدریجی به تشکیل زغالی با پایداری حرارتی تا ۷۰۰ درجه سانتی گراد منجر می شود. در سوی دیگر، پوشش های حاوی استایرن آکریلات ها (چون AC80 در پایه حلال و H211 در پایه آب) با مشکل جدی ذوب و چکیدن در سطوح عمودی مواجه بودند و لایه زغالی سبک، اسفنجی و ناپایداری تولید می کردند. تخریب یک مرحله ای این پلیمرها در گستره ۳۴۰

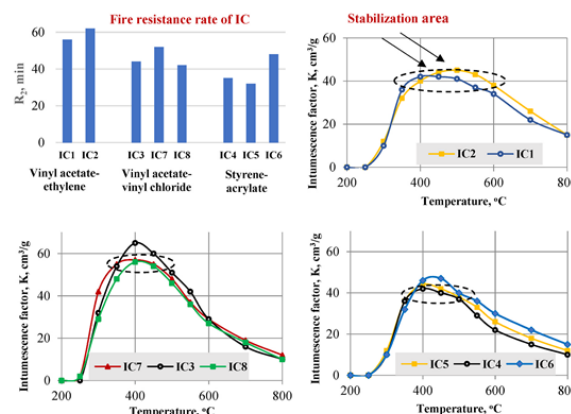
جدول ۳ نتایج مطالعه ویژگی های بازدارندگی آتش برای نمونه های پوشش منبسط شونده [۳۶].

پوشش ضد حریق	پلیمر	K ₂ cm ³ /g	R ₂ دقیقه	K ₂ cm ³ /g	R ₂ دقیقه	K ₂	T _d
پایه آبی							
IC1	EZ 3010	۴۲	۳۵	۳۸	۵۶	۴۲	۲۴۹
IC2	EZ 3112	۴۵	۴۱	۴۰	۶۲	۴۶	۲۵۶
IC3	CEZ 3031	۶۴	۳۰	۲۴	۴۴	۲۳	۲۱۱
IC4	H211	۳۵	۲۸	۱۸	۳۵	۲۱	۲۳۱
پایه حلالی							
IC5	AC80	۴۰	۲۳	۱۵	۳۲	۵	۲۰۷
IC6	AC80+AC4	۴۳	۳۶	۲۵	۴۸	۳۴	۲۲۹
IC7	VAGH	۵۶	۴۱	۴۶	۵۲	۳۸	۲۰۰
IC8	VYHH	۶۲	۳۷	۲۶	۴۴	۳۰	۲۰۸

کمتری (حدود ۳۵ تا ۴۰ سانتی‌متر مکعب بر گرم) نشان می‌دهد، پایداری حرارتی زغال را به‌طور چشمگیری افزایش می‌دهد (جدول ۴ و ۵). داده‌های تحلیل TGA این ادعا را تأیید می‌کند (جدول ۶ و شکل ۶). برای فرمول‌بندی با نسبت ۲:۱:۱، دمای تخریب ۶۰ درصد جرم (T60٪) حدود ۴۵۸ درجه سانتی‌گراد ثبت شد، در حالی که این دما برای نسبت ۳/۵:۱:۱/۵ به ۵۹۳ درجه سانتی‌گراد افزایش یافت (تفاوتی به میزان ۱۳۵ درجه سانتی‌گراد). همچنین جرم باقی‌مانده در دمای ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد برای نسبت ۳/۵:۱:۱/۵ حدود ۳۰ تا ۳۷ درصد بود، در حالی که برای نسبت ۲:۱:۱ به ۲۴ تا ۲۸ درصد کاهش می‌یافت. بنابراین، برای تأمین R60 و بالاتر در ضخامت ۱/۶ تا ۱/۸ میلی‌متر، نسبت ۳/۵:۱:۱/۵ ضروری تشخیص داده شد. محققان همچنین تأکید می‌کنند که برای دستیابی به R120، ضخامت خشک پوشش باید از ۳/۵ میلی‌متر فراتر رود و نسبت اجزا نیز در همان محدوده ۳/۵:۱:۱/۵ حفظ شود. افزون بر این، محتوای بهینه چسب پلیمری در سامانه (صرف نظر از نوع)

جدول ۴ ترکیب (درصد وزنی) و مقاومت در برابر آتش برای نمونه‌های مختلف پوشش منبسط‌شونده مورد مطالعه [۳۶].

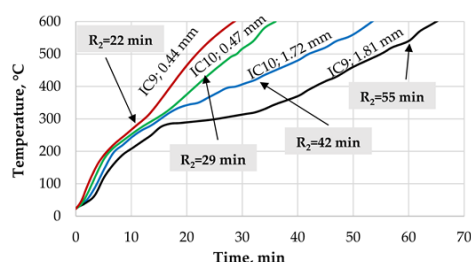
پوشش ضدحریق	APP	MA	PE	TiO ₂	R _i دقیقه
IC2-1	۱۲	۱۹	۱۹	۱۲	۲۱
IC2-2	۱۹	۱۶	۱۶	۱۰	۳۱
IC2-3	۳۳	۱۱	۱۴	۸	۳۷
IC2-4	۴۲	۱۱	۱۲	۷	۳۴
IC2-5	۴۹	۱۰	۱۰	۷	۲۵
IC3-1	۳۸	۹	۶	۹	۳۷
IC3-2	۳۵	۹	۱۲	۹	۴۱
IC3-3	۳۳	۸	۱۷	۹	۳۶
IC3-4	۳۱	۸	۲۱	۸	۳۱
IC3-5	۳۰	۸	۲۵	۷	۲۶
IC4-1	۳۸	۶	۹	۹	۳۵
IC4-2	۳۵	۱۰	۱۱	۸	۳۸
IC4-3	۳۵	۱۲	۹	۹	۳۱
IC4-4	۳۲	۲۱	۸	۷	۲۶
IC4-5	۳۰	۲۵	۸	۷	۲۲



شکل ۵ ضریب انبساط K (سانتی‌متر مکعب بر گرم) بر حسب دمای T (درجه سانتی‌گراد) برای ترکیبات منبسط‌شونده مورد مطالعه [۳۶].

تا ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد رخ می‌دهد و زغال حاصل در دماهای بالای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد به سرعت اکسید شده، فرو می‌پاشد. پوشش‌های حاوی وینیل‌استات‌های هالوژنه نیز اگرچه بالاترین ضریب انبساط را نشان دادند، اما لایه زغالی شکننده با حفره‌های درشت و نواحی سوختگی موضعی داشتند و به‌دلیل آزادسازی گازهای سمی و خورنده (از جمله HCl) برای کاربردهای صنعتی مدرن قابل قبول نبودند [۳۶]. بر پایه این یافته‌ها، محققان راهنمای عملی ساده اما حیاتی ارائه می‌دهند: برای دستیابی به مقاومت حریق در دسته R30 (۳۰ دقیقه)، استفاده از استایرن‌آکریلات‌ها با ضخامت ۰/۴ تا ۰/۵ میلی‌متر کافی و اقتصادی است، اما برای تأمین R60 و بالاتر، استفاده از کوپلیمرهای وینیل‌استات غیرهالوژنه با ضخامت ۱/۶ تا ۱/۸ میلی‌متر الزامی است. این تمایز که ریشه در تفاوت بنیادین سازوکار تخریب حرارتی دو خانواده پلیمری دارد، یکی از کاربردی‌ترین دستاوردهای این پژوهش برای صنعت تولید پوشش‌های ضدحریق به‌شمار می‌رود [۳۶].

دومین محور اصلی این مطالعه، تعیین نسبت بهینه سه جزء اصلی سامانه منبسط‌شونده یعنی پلی‌فسفات‌آمونیم (APP)، ملامین (MA) و پنتا اریتریتول (PE) بود. محققان با آزمودن بیش از پانزده فرمول‌بندی مختلف به این نتیجه رسیدند که نسبت ۲:۱:۱ (APP:MA:PE) معادل حدود ۲۰ درصد APP، ۱۰ درصد MA و ۱۰ درصد PE در فرمول‌بندی وزنی-بالاترین ضریب انبساط (حدود ۴۵ تا ۵۰ سانتی‌متر مکعب بر گرم) را در دمای ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد فراهم می‌کند و برای مقاومت حریق R30 در ضخامت کم مناسب است. اما در مقابل، نسبت ۳/۵:۱:۱/۵ (APP:MA:PE) معادل حدود ۳۵ درصد APP، ۱۰ درصد MA و ۱۵ درصد PE اگرچه ضریب انبساط اندکی



شکل ۶ نتایج آزمون‌های آتش مطابق با استاندارد DSTU B V.1.1-14:2007 برای ستون‌های فولادی پوشش داده شده با پوشش‌های منبسط‌شونده مورد مطالعه [۳۶].

Nanoclay است-به نانورسی گفته می‌شود که قابلیت لایه‌لایه‌شدگی (Exfoliation) بالایی در آن محیط پلیمری خاص داشته باشد. در پوشش‌های پایه‌آبی با چسب وینیل‌استات، نانورس‌های Optigel WA و Claytone HY و همچنین Garamite 7305 در مقادیر ۰/۳ تا ۰/۶ درصد بهترین عملکرد را داشتند. به‌عنوان نمونه، افزودن ۰/۵ درصد Garamite 7305 به نمونه IC13، ضریب انبساط را از ۴۵ به ۵۲ سانتی‌متر مکعب بر گرم افزایش داد و مقاومت حریق را از ۳۴ به ۴۴ دقیقه رساند (حدود ۳۰ درصد بهبود). در پوشش‌های پایه‌حلال با چسب استایرن آکریلات، نانورس‌های اصلاح‌شده با مواد آلی آب‌گریز در مقادیر ۰/۳ درصد مؤثرتر بودند و افزایش مقاومت حریق تا بیش از ۴۵ درصد ثبت شد (جدول ۷ و ۸). اما فراتر از این مقادیر بهینه، نانورس به جای کمک، به‌عنوان مانعی فیزیکی عمل کرده، انبساط را مهار می‌کند. یکی از نتایج بسیار ارزشمند برای کاربرد صنعتی، بهبود چشمگیر مقاومت محیطی بود. نمونه‌های حاوی نانورس پس از ۳۰۰ روز قرارگیری در رطوبت نسبی ۸۰ درصد (شرایط شتابیده) کاهش مقاومت حریق کمتر از ۳ درصد داشتند، در حالی که نمونه بدون نانورس بیش از ۱۰ درصد افت نشان داد. برای نمونه IC13 حاوی Garamite 7305، افت مقاومت پس از پیری صفر درصد ثبت شد. همچنین نانورس‌ها به‌عنوان اصلاح‌کننده رئولوژی عمل کرده، مشکل چکیدن پوشش‌های استایرن آکریلاتی روی سطوح عمودی را به میزان قابل توجهی کاهش دادند-مزیتی که در اجرای پوشش روی تیرها و ستون‌های فولادی اهمیت عملی فراوانی دارد (شکل ۷) [۳۶].

چهارمین و آخرین بخش این مطالعه به چالش پوشش‌های با ضخامت بالا (بیش از ۳ میلی‌متر) اختصاص داشت که برای تأمین R90 و R120 ضروری هستند (جدول ۹ و ۱۰ و ۱۱). در چنین ضخامت‌هایی، لایه زغالی به‌دلیل وزن خود دچار ریزش و جدا شدن از سطح فولاد می‌شود. محققان چهار نوع

جدول ۵ ضریب انبساط K (سانتی‌متر مکعب بر گرم) برای پوشش‌های منبسط‌شونده اندازه‌گیری شده در گستره دمایی ۲۰۰ تا ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد [۳۶].

مؤلفه	میزان، %	K_{max} , cm^3/g	T_{max} , °C
APP	۱۲	۲۶	۴۵۰
	۴۹-۴۲	۴۶-۳۲	۴۲۰
	۳۳-۱۹	۱۰۸-۶۷	۵۰۰
PE	۶	۶۰	۴۰۰
	۲۵-۲۱	۴۴-۳۹	۴۰۰
	۱۷-۱۲	۵۲-۴۸	۴۵۰
MA	۶	۱۱۲	۴۲۰
	۱۲-۱۰	۸۸-۷۸	۵۰۰
	۲۵-۲۱	۴۸-۳۵	۴۵۰

حدود ۹ تا ۱۱ درصد وزنی پلیمر خالص تعیین شد. کمتر از این مقدار، زغال شکننده و نامنظم می‌شود و چسبندگی کافی ندارد؛ بیشتر از آن نیز گرانروی مذاب افزایش یافته و فرایند انبساط مهار می‌شود [۳۶].

سومین دستاورد مهم این پژوهش، بررسی تأثیر افزودنی‌های نانورسی بر عملکرد پوشش بود. چهار نوع نانورس (Op- tigel WA آب‌دوست، Claytone HY آب‌دوست، La- ponite EP آب‌دوست و Garamite7305 اصلاح‌شده با مواد آلی آب‌گریز) بر روی دو خانواده چسب (وینیل‌استات و استایرن آکریلات) مورد آزمون قرار گرفتند. یافته کلیدی این بخش، معرفی مفهوم «نانورس هم‌ساز» (Cognate)

جدول ۶ نتایج تحلیل وزن‌سنجی حرارتی (TGA) برای نمونه‌های پوشش منبسط‌شونده [۳۶].

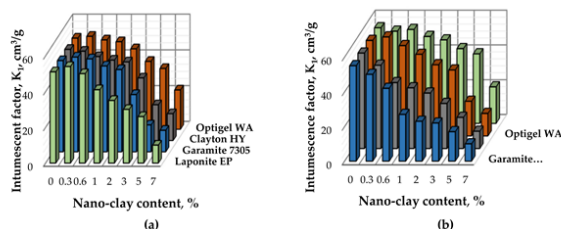
پوشش ضد حریق	T_d , °C	T_{10} , °C	T_{50} , °C	T_{80} , °C	%m
IC2-2	۲۰۴	۳۰۴	۴۰۰	۴۵۸	۲۴
IC2-3	۲۱۰	۳۳۱	۴۷۵	۵۳۸	۳۵
IC3-2	۲۲۴	۳۴۵	۵۰۳	۵۲۳	۳۱
IC3-3	۲۱۰	۳۲۹	۴۹۷	۵۶۳	۲۴
IC4-1	۲۰۱	۳۲۷	۵۰۵	۵۰۵	۲۵
IC4-2	۲۰۸	۳۲۵	۵۳۷	۵۹۳	۳۷

جدول ۷ ترکیب (بر حسب جزء وزنی) پوشش‌های منبسط‌شونده [۳۶].

پوشش ضدحریق	نانو-رس	APP/MA/PE/ TiO ₂	افزودنی‌ها	چسب EZ 3010	چسب AC80+AC4
IC11	بدون نانو-رس	۱	۰,۰۰۸	۰,۰۲۷	-
IC12	Optigel WA	۱	۰,۰۰۸	۰,۰۲۷	-
IC13	Garamite 7305	۱	۰,۰۰۸	۰,۰۲۷	-
IC14	Claytone HY	۱	۰,۰۰۸	۰,۰۲۷	-
IC15	Laponite EP	۱	۰,۰۰۸	۰,۰۲۷	-
IC16	بدون نانو-رس	۱	۰,۰۰۵	-	۰,۰۶۱
IC17	Optigel WA	۱	۰,۰۰۵	-	۰,۰۶۱
IC18	Garamite 7305	۱	۰,۰۰۵	-	۰,۰۶۱
IC19	Claytone HY	۱	۰,۰۰۵	-	۰,۰۶۱
IC20	Laponite EP	۱	۰,۰۰۵	-	۰,۰۶۱

زمانی-دمایی ثبت‌شده نشان می‌داد که دمای فولاد پس از ۱۲۰ دقیقه همچنان زیر ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد باقی می‌ماند. به عنوان گواه نهایی بر موفقیت این پژوهش، پوشش توسعه‌یافته (با نام تجاری ICX) با پوشش مرجع جهانی Nullifire SC801-120 مقایسه شد. نتایج نشان داد که در ضخامت ۳/۶۵ میلی‌متر برای مقطع با ضریب ۱۰ میلی‌متر، پوشش ICX مقاومت R120 را تأمین می‌کند و در ضخامت ۴/۹ میلی‌متر حتی به دسته R150 نیز دست می‌یابد، در حالی که پوشش مرجع در این ضخامت صرفاً برای R120 تأیید شده بود [۳۶].

این مطالعه تأکید می‌کند که انتخاب چسب پلیمری، نسبت اجزای سامانه منبسط‌شونده، نوع و مقدار نانورس و الیاف تقویت‌کننده - نه به عنوان متغیرهای مستقل، بلکه به عنوان عوامل درهم‌تنیده یک شبکه پیچیده- باید در چارچوب رویکردی منظم و با تأیید نهایی از طریق آزمون‌های بزرگ-مقیاس مورد توجه قرار گیرند.



شکل ۷ ضریب انبساط (K_p) بر حسب سانتی‌متر مکعب بر گرم) برای پوشش‌های منبسط‌شونده مورد مطالعه بر حسب میزان نانورس (درصد) در پوشش: (الف) IC11 تا IC15؛ (ب) IC16 تا IC20 [۳۶].

الیاف (الیاف معدنی Lapinus، الیاف شیشه Cem-fil، بازالت، پلی‌پروپیلن و سلولز) را آزمایش کردند. بهترین نتیجه با مخلوط ۱:۱ الیاف معدنی و الیاف شیشه (در مجموع حدود ۳ درصد وزنی پوشش) حاصل شد. نمونه IC24 که حاوی این مخلوط الیاف بود، مقاومت حریق ۶۲ دقیقه را در آزمون کوره آزمایشگاهی نشان داد (در مقایسه با ۵۴ دقیقه برای نمونه بدون الیاف) و خصوصیات زغال آن یکنواخت و بدون جدا شدن از زیرلایه توصیف شد (شکل ۸ و ۹). در آزمون بزرگ-مقیاس روی ستون‌های فولادی با ضریب مقطع ۴/۲ میلی‌متر، همین پوشش توانست مقاومت حریق R120 را تأمین کند. منحنی

جدول ۸ مقاومت در برابر آتش ورق‌های فولادی محافظت‌شده با پوشش‌های منبسط‌شونده مورد مطالعه (الف) [۳۶].

ضدحریق	پوشش	IC20	IC19	IC18	IC17	IC16	IC15	IC14	IC13	IC12	IC11	R ^۱
دقیقه	R ^۱	۲۵	۲۲	۲۹	۲۷	۲۲	۲۷	۲۹	۴۴	۴۱	۲۴	۲۴
R ^۱ ، دقیقه	R ^۱ ، دقیقه	۲۳	۲۱	۲۸	۲۵	۲۰	۲۲	۲۷	۴۴	۲۸	۲۰	۲۰
% ΔR	% ΔR	<	۲	۲	>	۵	۱۱	۵	۰	>	۱۲	>

جدول ۹ نسبت (بر حسب جزء وزنی) اجزای تشکیل دهنده پوشش منبسط شونده [۳۶].

پوشش ضدحریق	APP	PE	MA	EZ 3112	TiO ₂	نانو رس	MC	GF	افزودنی ها
IC21	۳،۵	۱،۶	۱،۱	۲،۲	۱،۰	۰،۱	-	-	۰،۵
IC22	۳،۵	۱،۶	۱،۱	۲،۲	۱،۰	۰،۱	-	۰،۳	۰،۵
IC23	۳،۵	۱،۶	۱،۱	۲،۲	۱،۰	۰،۱	۰،۳	-	۰،۵
IC24	۳،۵	۱،۶	۱،۱	۲،۲	۱،۰	۰،۱	۰،۱۵	۰،۱۵	۰،۵

تنها از این راه می توان به فرمول بندیی دست یافت که هم از نظر فنی کارآمد و هم از نظر اقتصادی مقرون به صرفه باشد. برای پژوهشگران حوزه پوشش های ضدحریق، این مطالعه نقشه راه عملی ارائه می دهد: از آزمون ساده ضریب انبساط در کوره آزمایشگاهی گرفته تا تأیید نهایی در آتش سوزی تمام عیار بر روی ستون های فولادی [۳۶].

۱۱ چشم انداز و جهت گیری های پژوهشی آینده

با وجود پیشرفت های قابل توجه در دهه های اخیر در زمینه پوشش های ضدحریق و مقاوم در برابر آتش از درک عمیق تر سازوکارهای شیمیایی و فیزیکی تا توسعه فرمول بندی های صنعتی با مقاومت R120 و فراتر از آن همچنان شکاف ها و چالش های مهمی وجود دارد که جهت گیری پژوهش های آینده را ترسیم می کنند. در ادامه، مهم ترین چشم اندازها و اولویت های پژوهشی پیش رو ارائه می شود. توسعه پوشش های هوشمند و پاسخگو به دما: پژوهش های

کنونی عمدتاً بر روی فرمول بندی های با انبساط خطی و غیرقابل کنترل متمرکز هستند. یکی از جهت گیری های هیجان انگیز آینده، طراحی پوشش هایی است که بتوانند ضریب انبساط خود را بر اساس نرخ افزایش دما به طور پویا تنظیم کنند. به عبارت دیگر، پوششی که در برابر آتش سوزی های با نرخ رشد آهسته، انبساط تدریجی و در برابر فلش اورهای ناگهانی، انبساط سریع و کنترل شده از خود نشان دهد. این رویکرد نیازمند سنتز پلیمرهای جدید با دمای انتقال شیشه ای قابل برنامه ریزی یا استفاده از شبکه های پلیمری با اتصال های برگشت پذیر (مانند پیوندهای هیدروژنی دینامیک یا پیوندهای دی سولفیدی) است. پوشش های همه کاره با قابلیت حذف آسان (برگشت پذیری کامل): یکی از چالش های جدی به ویژه در کاربردهای حساس (نظیر زیرلایه های با ارزش تاریخی یا تجهیزات دقیق)، نبود پوشش هایی با قابلیت حذف کامل و بدون باقی مانده است. پژوهش های آینده باید بر روی طراحی چسب ها و افزودنی هایی متمرکز شوند که در پاسخ به محرک خارجی خاص (مانند حلال

جدول ۱۰ نتایج آزمون های آتش برای پوشش های منبسط شونده مورد مطالعه [۳۶].

پوشش ضدحریق / ضخامت پوشش	ویژگی های زغال واره	K	مقاومت در برابر آتش، دقیقه
IC21 ۲،۱ میلی متر	شکننده، با ترک های متعدد و نشانه های قابل مشاهده از تخریب	۱۴	۳۲
IC22 ۲،۱ میلی متر	شکننده، ناهموار، با حفره های متعدد، عمدتاً جدا شده از بستر	۲۶	۴۴
IC23 ۱،۹ میلی متر	محکم، با ترک های متعدد، تا حدی جدا شده از بستر	۳۶	۵۴
IC24 ۱،۹ میلی متر	محکم، یکنواخت، بدون جدایش از بستر	۳۲	۶۲
Nullfire SC801-120 ۲،۱ میلی متر	محکم، یکنواخت، تا حدی جدا شده از بستر	۳۸	۵۹

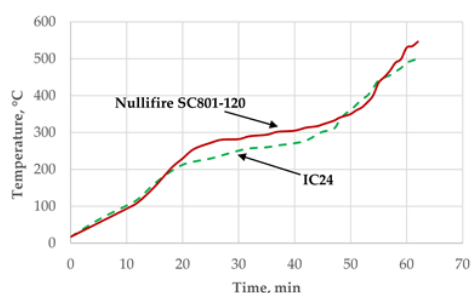
جدول ۱۱ داده‌های به‌دست‌آمده از گواهی‌نامه‌های انطباق برای پوشش منبسط‌شونده توسعه‌یافته ICX و پوشش موجود Nullfire SC801-120 [۳۶].

مقاومت در برابر آتش، R، دقیقه		ضریب مقطع δ ، میلی‌متر	ضریب مقطع m^{-1} ، A_m/V	حداقل ضخامت پوشش، که در آن دما کمتر از $500^\circ C$ است، میلی‌متر	
				Nullfire SC801-120	ICX
۶۰		۱۰،۰	۱۰۰	۱،۰۲	۱،۱۲
		۵،۰۰	۲۰۰	۱،۷۸	۱،۹۵
		۳،۱۰	۳۲۴	۲،۳۲	۲،۲۷
۹۰		۱۰،۰	۱۰۰	۲،۲۴	۲،۳۳
		۵،۰۰	۲۰۰	۳،۶۶	۳،۵۳
		۳،۱۰	۳۲۴	۴،۶۶	۴،۱۹
۱۲۰		۱۰،۰	۱۰۰	۳،۲۰	۳،۶۵
		۵،۰۰	۲۰۰	۵،۲۰	۵،۲۰
		۳،۱۰	۳۲۴	N/A	۶،۱۰
۱۵۰		۱۰،۰	۱۰۰	N/A	۴،۹۱
		۶،۲۵	۱۶۰	N/A	۶،۲۸

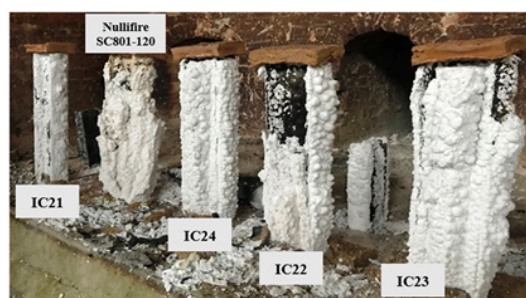
(مانند فیتات‌ها، اسیدفیتیک و نانوذرات سلولزی) است. چالش اصلی در این مسیر، دستیابی به پایداری حرارتی قابل مقایسه با پوشش‌های نفتی و نیز حفظ خواص مکانیکی و چسبندگی در شرایط مرطوب است.

پوشش‌های فوق‌نازک با کارایی بالا (ضخامت کمتر از ۲۰۰ میکرون): در بسیاری از کاربردهای صنعتی و نیز کاربردهای حساس، هر میلی‌متر ضخامت پوشش می‌تواند مسئله‌ساز باشد - چه از نظر وزن، چه از نظر پنهان شدن جزئیات زیرلایه و چه از نظر هزینه. پژوهش در مورد سامانه‌های منبسط‌شونده با نسبت انبساط بسیار بالا (بیش از ۲۰۰ برابر) و پوشش‌های

خاص، تغییر pH، یا میدان الکتریکی) بدون آسیب به زیرلایه، از سطح جدا شوند. این ویژگی به‌طور چشمگیری دامنه کاربرد پوشش‌های ضدحریق‌رادر حوزه‌های حساس گسترش خواهد داد. پوشش‌های زیست‌پایه و کاملاً زیست‌تخریب‌پذیر: با وجود حرکت به سمت حذف هالوژن‌ها، بسیاری از فرمول‌بندی‌های کنونی همچنان از ترکیبات فسفردار و چسب‌های مبتنی بر پلیمرهای نفتی استفاده می‌کنند که در انتهای چرخه عمر خود مشکل‌ساز هستند. جهت‌گیری آینده به سمت استفاده از پلیمرهای زیست‌پایه (مانند لیگنین، نشاسته اصلاح‌شده، کیتوزان و پلی لاکتیک اسید) و بازدارنده‌های شعله طبیعی



شکل ۹ دمای ستون فولادی بر حسب زمان قرارگیری در معرض آتش در شرایط آزمون تعیین‌شده در استاندارد DSTU B V.1.1-14:2007 [۳۶].



شکل ۸ تصویر نمونه‌ها پس از آزمون آتش انجام‌شده مطابق با روش توصیف‌شده در استاندارد DSTU B V.1.1-14:2007 [۳۶].

درک عمیق‌تر از سازوکارهای شیمیایی و فیزیکی، به تدوین قواعد عملی برای طراحی فرمول‌بندی‌های کارآمد انجامیده است. نخستین و بنیادین‌ترین یافته این مرور، تمایز روشن میان دو دسته پوشش‌های منبسط‌شونده و غیرمنبسط‌شونده بر اساس مرحله عملکرد (پیش و پس از فلش‌اور) و سازوکار حاکم (فاز متراکم در برابر فاز گازی) است. پوشش‌های منبسط‌شونده با تشکیل لایه زغالی متورم، به دلیل قابلیت انبساط تا ۱۰۰ برابر ضخامت اولیه و ایجاد سدی فیزیکی و حرارتی با رسانایی بسیار پایین، گزینه برتر برای حفاظت طولانی‌مدت سازه‌ها در برابر آتش کاملاً توسعه‌یافته محسوب می‌شوند. در مقابل، پوشش‌های غیرمنبسط‌شونده با سازوکار رادیکال‌گیر در فاز گازی یا تشکیل لایه شیشه‌ای در فاز متراکم، برای کاربردهایی که به ضخامت کم و هزینه پایین نیاز دارند (مانند کلاس R30) مناسب‌ترند. دومین دستاورد مهم این مرور، بازتعریف نقش چسب پلیمری است. بر خلاف نگاه سنتی که چسب را صرفاً عاملی برای فیلم‌سازی و چسبندگی تلقی می‌کند، شواهد تجربی نشان می‌دهد که چسب پلیمری چهارمین جزء جدایی‌ناپذیر سامانه بازدارنده شعله است و مستقیماً بر دمای تخریب، گرانشی مذاب، یکنواختی و پایداری حرارتی لایه زغالی تأثیر می‌گذارد. کوپلیمرهای وینیل‌استات غیرهالوژنه به دلیل تخریب دوماجره‌ای (استیل‌زدایی و سپس شکست زنجیره‌های پلی‌انی) برای مقاومت‌های حریق بالا (R60 و بیشتر) مناسبند، در حالی که استایرن‌آکریلات‌ها برای کلاس R30 در ضخامت کم کافی و اقتصادی هستند. سومین یافته کلیدی، تأثیر مستقیم نسبت اجزای اصلی (APP/MA/PE) بر کارایی نهایی است. نسبت ۲:۱:۱ بالاترین ضریب انبساط را فراهم می‌کند و برای ضخامت‌های کم (۰/۴-۰/۵ میلی‌متر) و مقاومت R30 بهینه است. نسبت ۳/۵:۱:۱/۵ اگرچه ضریب انبساط کمتری دارد، اما به دلیل افزایش چشمگیر دمای تخریب ۶۰ درصد جرم (T60٪ تا ۵۹۳ درجه سانتی‌گراد)، پایداری حرارتی بسیار بالاتری ایجاد کرده و برای دستیابی به R60 و R120 ضروری است. در حوزه فناوری‌های نوین، دو رویکرد برجسته هستند. نخست، پوشش‌های نانوکامپوزیتی که با افزودن نانورس‌های هم‌ساز (۰/۳-۰/۶ درصد) و نانوصفات نیتريدبور، ضمن افزایش مقاومت حریق تا ۵۰ درصد، پایداری محیطی را نیز بهبود می‌بخشند. دوم، روش سل-ژل که امکان تولید پوشش‌های هیبریدی شفاف و بسیار نازک را فراهم می‌کند-ویژگی که برای کاربردهایی که حفظ ظاهر اصلی زیرلایه (به ویژه چوب) اهمیت دارد، حیاتی است. با این حال، هیچ فناوری بدون چالش نیست. کاربرد مستقیم پوشش‌های ضدحریق بر روی زیرلایه‌های حساس (نظیر چوب‌های تاریخی

هیبریدی که ترکیبی از سازوکار سل-ژل و نانوذرات را با هم به کار می‌برند، می‌تواند به پوشش‌هایی با ضخامت کمتر از ۰/۲ میلی‌متر منجر شود که همان محافظت پوشش ۲ میلی‌متری سنتی را فراهم می‌کنند.

ارزیابی استاندارد شده پایداری طولانی‌مدت و پیری تسریع‌شده: یکی از نقاط کور دانش فعلی، نبود پروتکل استاندارد و جهانی برای پیش‌بینی عمر مفید پوشش‌های ضدحریق در شرایط محیطی مختلف (رطوبت، اشعه فرابنفش، نوسانات دما، نشست گرد و غبار و آلاینده‌ها) است. پژوهش‌های آینده باید به سمت تدوین روش‌های پیری شتابیده معتبر حرکت کنند که بتوانند با دقت بالایی، کاهش کارایی پوشش را در بازه‌های ۱۰، ۲۵ و ۵۰ سال پیش‌بینی کنند. این امر برای پذیرش گسترده‌تر این پوشش‌ها در کاربردهای زیرساختی و حساس حیاتی است.

مطالعات نظام‌مند مقایسه‌ای فرمول‌بندی‌ها بر روی زیرلایه‌های متنوع: در حال حاضر، مقایسه نتایج پژوهش‌های مختلف به دلیل تفاوت در روش‌های آزمون، ضخامت پوشش، نوع زیرلایه و شرایط پیری بسیار دشوار است. ایجاد بانک داده باز و استاندارد از عملکرد صدها فرمول‌بندی مختلف بر روی زیرلایه‌های استاندارد (فولاد، آلومینیوم، چوب با گونه‌های مشخص، پلیمرهای رایج، منسوجات و کاغذ) با استفاده از روش‌های آزمون یکسان، نیاز اساسی برای پیشرفت سریع‌تر این حوزه است. چنین بانک داده‌ای می‌تواند با بهره‌گیری از یادگیری ماشین، به پیش‌بینی فرمول‌بندی‌های بهینه برای کاربردهای خاص کمک کند.

کاربردهای نوظهور در بسته‌بندی هوشمند و ذخیره‌سازی حساس: اگرچه تمرکز اصلی این مرور بر روی پوشش‌های سازه‌ای و حفاظتی بود، اما یکی از چشم‌اندازهای امیدوارکننده، استفاده از نسل جدید پوشش‌های فوق‌نازک، شفاف و زیست‌تخریب‌پذیر در بسته‌بندی‌های هوشمند (برای محافظت از اقلام حساس در برابر آتش در حین حمل‌ونقل) و تجهیزات ذخیره‌سازی آرشیوی (قفسه‌ها، کابینت‌ها و جعبه‌های نگهداری) است. پژوهش در این حوزه نیازمند همکاری میان‌رشته‌ای بین شیمی دانان پلیمر، مهندسان حریق و متخصصان حفاظت است.

۱۲ نتیجه‌گیری

پوشش‌های ضدحریق و مقاوم در برابر آتش، امروزه به یکی از پایه‌های اصلی حفاظت غیرفعال در صنایع گوناگون از جمله ساختمان، حمل‌ونقل، هوافضا و تأسیسات زیربنایی تبدیل شده‌اند. این مقاله مروری تلاش کرد تا تصویری نظام‌مند از دانش فنی موجود در این حوزه ترسیم کند و نشان دهد که چگونه

یا منسوجات ارزشمند) با خطراتی چون تخریب شیمیایی، لیف-لیف‌شدن، شوره‌زدگی، کاهش استحکام و تغییرات ظاهری همراه است. از این رو، رویکرد «کاربرد غیرمستقیم» بر روی مواد پش‌تیبان، مبل‌مان ذخیره‌سازی و تجهیزات جانبی به‌عنوان راهکاری کم‌تأثیر و منطبق با اصول برگشت‌پذیری و حداقل مداخله پیشنهاد می‌شود. در مجموع، پوشش‌های

ضدحریق و مقاوم در برابر آتش امروزه به بلوغ قابل‌توجهی رسیده‌اند، اما همچنان زمینه برای نوآوری گسترده است. حرکت به سمت پوشش‌های هوشمند پاسخگو به دما، زیست‌پایه و زیست‌تخریب‌پذیر، فوق‌نازک با نسبت انبساط بالای ۲۰۰، همراه با تدوین پروتکل‌های استاندارد برای ارزیابی پایداری طولانی‌مدت، جهت‌گیری‌های اصلی پژوهش در دهه آینده را تشکیل می‌دهند.

مراجع

- Mariappan T., Recent Developments of Intumescent Fire Protection Coatings for Structural Steel: A Review, *Journal of Fire Sciences*, 34, 120-163, **2016**.
- Mariappan T., Fire Retardant Coatings, *New Technologies in Protective Coatings*, 28, 101-122, **2017**.
- White R., Dietenberger M., Fire Safety of Wood Construction. Wood Handbook-Wood as an Engineering Material, General Technical Report FPL-GTR-190, US Department of Agriculture, Forest Service, *Forest Products Laboratory*, **2010**.
- Jimenez M., Duquesne S., Bourbigot S., Multiscale Experimental Approach for Developing High-Performance Intumescent Coatings, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 45, 4500-4508, **2006**.
- Verburg G.B., et al., Water-Resistant, Oil-Based, Intumescent Fire-Retardant Coatings. I. Developmental Formulations, *Journal of the American Oil Chemists Society*, 41, 670-674, **1964**.
- Wilkie C.A., Morgan A.B., Fire Retardancy of Polymeric Materials, *CRC Press, USA*, **2024**.
- Östman B.A.L., Mikkola E., European Classes for the Reaction to Fire Performance of Wood-Based Panels, *Fire and Materials*, 34, 315-330, **2010**.
- Goldsmith F., Fire Retardant Coatings: An Evaluation of Fire-Retardant Coatings as a Means of Protecting Wood Panels, *Wood* 493, **2011**.
- Hirata T., Kawamoto S., Nishimoto T., Thermogravimetry of Wood Treated with Water-Insoluble Retardants and a Proposal for Development of Fire-Retardant Wood Materials, *Fire and Materials*, 15, 27-36, **1991**.
- Pabeliña K.G., Lumban C.O., Ramos H.J., Plasma Impregnation of Wood with Fire Retardants, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 272, 365-369, **2012**.
- Li Q., Jiang P., Wei P., Synthesis, Characteristic, and Application of New Flame Retardant Containing Phosphorus, Nitrogen, and Silicon, *Polymer Engineering & Science*, 46, 344-350, **2006**.
- Mačiulaitis R., Lipinskas D., Lukošius K., Singularity and Importance of Determination of Wood Charring Rate in Fire Investigation, 12, 42-47, **2006**.
- Branca C., Di Blasi C., Semi-Global Mechanisms for the Oxidation of Diammonium Phosphate Impregnated Wood, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 91, 97-104, **2011**.
- Baysal E., Altinok M., Colak M., Ozaki S.K., Toker H., Fire Resistance of Douglas Fir (*Pseudotsuga menziesii*) Treated with Borates and Natural Extractives, *Bioresource Technology*, 98, 1101-1105, **2007**.
- Tomak E.D., Cavdar A.D., Limited Oxygen Index Levels of Impregnated Scots Pine Wood, *Thermochimica Acta*, 573, 181-185, **2013**.
- Getto H., Ishihara S., Functionally Graded Wood in Fire Endurance with Basic Nitrogen Compounds and Phosphoric Acid, *Fire and Materials*, 22, 77-83, **1998**.
- Subyakto, Kajimoto T., Hata T., Ishihara S., Kawai S., Getto H., Improving Fire Retardancy of Fast Growing Wood by Coating with Fire Retardant and Surface Densification, *Fire and Materials*, 22, 207-212, **1998**.
- Lee H.L., Chen G.C., Rowell R.M., Thermal Properties of Wood Reacted with a Phosphorus Pentoxide-Amine System, *Journal of Applied Polymer Science*, 91, 2465-2481, **2004**.
- Stevens R., Van Es D.S., Bezemer R., Kranenbarg A., The Structure-Activity Relationship of Fire Retardant Phosphorus Compounds in Wood, *Polymer Degradation and Stability*, 91, 832-841, **2006**.
- Marney D., Russell L., Combined Fire Retardant and Wood Preservative Treatments for Outdoor Wood Applications: A Review of the Literature, *Fire Technology*, 44, 1-14, **2008**.
- Abd El-Wahab H., Abd El-Fattah M., Abd El-Khalik N., Sharaby C.M., Synthesis and Performance of Flame Retardant Additives Based on Cyclodiphosph(V) Azane Derivatives Incorporated into Polyurethane Varnish, *Progress in Organic Coatings*, 74, 615-621, **2012**.
- Kandola B., Horrocks A., Price D., Coleman G., Flame-Retardant Treatments of Cellulose and Their Influence on the Mechanism of Cellulose Pyrolysis, *Journal of Macromolecular Science Part C: Polymer Reviews*, 36, 721-794, **1996**.
- Grexa O., Poutch F., Manikova D., Martvonova H., Bartekova A., Intumescence in Fire Retardancy of Lignocellulosic Panels, *Polymer Degradation and Stability*, 82, 373-377, **2003**.
- Dobele G., Urbanovich I., Zhurins A., Kampars V., Meier D., Application of Analytical Pyrolysis for Wood Fire Protection Control, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 79, 47-51, **2007**.
- Qu H., Wu W., Wu H., Jiao Y., Xu J., Thermal Degradation and Fire Performance of Wood Treated with Various Inorganic Salts, *Fire and Materials*, 35, 569-576, **2011**.
- Yuan L., Chen X., Hu Y., Combination Effect of 4-Picolinic Acid with 5A Zeolite on Ammonium Polyphosphate Flame-Retarded Sawdust Board, *Journal of Fire Sciences*, 32, 230-240, **2014**.

27. Richardson L., Cornelissen A., Fire-Resistant Coatings for Roof/Ceiling Deck Timbers, *Fire and Materials*, 11, 191-194, **1987**.
28. Gardner W., Thomson C., Ignitability and Heat-Release Properties of Forest Products, *Fire and Materials*, 15, 3-9, **1991**.
29. Chou C.S., Lin S.H., Wang C.I., Preparation and Characterization of the Intumescent Fire Retardant Coating with a New Flame Retardant, *Advanced Powder Technology*, 20, 169-176, **2009**.
30. Carosio F., Cuttica F., Medina L., Berglund L.A., Clay Nanopaper as Multifunctional Brick and Mortar Fire Protection Coating: Wood Case Study, *Materials & Design*, 93, 357-363, **2016**.
31. Fufa S.M., Steen-Hansen A., Jelle B.P., Hovde P.J., Reaction to Fire and Water Vapour Resistance Performance of Treated Wood Specimens Containing TiO₂ and Clay Nanoparticles, *Fire and Materials*, 38, 717-724, **2014**.
32. Chuang C.S., Tsai K.C., Yang T.H., Ko C.H., Wang M.K., Effects of Adding Organo-Clays for Acrylic-Based Intumescent Coating on Fire-Retardancy of Painted Thin Plywood, *Applied Clay Science*, 53, 709-715, **2011**.
33. Taghiyari H.R., Fire-Retarding Properties of Nano-Silver in Solid Woods, *Wood Science and Technology*, 46, 939-952, **2012**.
34. Haghighi Poshtiri A., Taghiyari H.R., Naghi Karimi A., The Optimum Level of Nano-Wollastonite Consumption as Fire-Retardant in Poplar Wood (*Populus nigra*), *International Journal of Nano Dimension*, 4, 141-151, **2013**.
35. Liu J., Kutty R.G., Zheng Q., Eswariah V., Sreejith S., Liu Z., Hexagonal Boron Nitride Nanosheets as High-Performance Binder-Free Fire-Resistant Wood Coatings, *Small*, 13, 1602456, **2016**.
36. Vakhitova L., Kalafat K., Vakhitov R., Drizhd V., Improving the Fire-Retardant Performance of Industrial Reactive Coatings for Steel Building Structures, *Heliyon*, 10, **2024**.

پلیمرهای هوشمند زیست تخریب پذیر

دنیا نمادی وثوقی^{۱*}، فاطمه زین الدینی^۱، مهرانوش محمدی^۲

۱. تهران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، دانشجوی کارشناسی مهندسی شیمی

۲. تهران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، عضو هیئت علمی گروه مهندسی شیمی

چکیده ...

پلیمرهای هوشمند زیست تخریب پذیر، به عنوان نسل نوینی از مواد پیشرفته، به دلیل ترکیب منحصر به فرد دو ویژگی کلیدی یعنی توانایی پاسخ دهی به محرک های بیرونی و قابلیت تجزیه زیستی کنترل شده، توجه زیادی را در تحقیقات اخیر به خود جلب کرده اند. این پلیمرها به محرک هایی همچون تغییرات دما، pH، نور و میدان های مغناطیسی واکنش نشان می دهند و در انواع مختلفی از جمله حافظه دار، خودترمیم شونده، پیزوالکتریک و کروموزنیک توسعه یافته اند. مزایای چشمگیر این مواد، در زیست سازگاری بالا، ایمنی زیست محیطی و پایداری به همراه قابلیت تنظیم دقیق نرخ تخریب، آن ها را برای کاربردهای گسترده ای مناسب ساخته است. حوزه هایی نظیر سامانه های پیشرفته دارورسانی، مهندسی بافت، بسته بندی هوشمند مواد غذایی، حسگرهای زیستی، نانوفناوری و کشاورزی هوشمند از مهم ترین زمینه های کاربردی این پلیمرها به شمار می روند. پژوهش های جدید بر فناوری های نوظهوری همچون چاپ چهاربعدی، مواد الهام گرفته از طبیعت با خاصیت خودترمیمی و کاربردهای پزشکی پیشرفته تمرکز کرده اند. با این حال، توسعه و تجاری سازی این پلیمرها با چالش هایی نظیر هزینه بالای تولید، پیچیدگی های فرایند سنتز و دشواری در کنترل دقیق نرخ تجزیه روبرو است. در ایران نیز فعالیت هایی در زمینه تولید این مواد صورت گرفته است که نیازمند پشتیبانی فناورانه، سیاست گذاری های کارآمد و سرمایه گذاری هدفمند برای پیشرفت و گسترش است. این مواد با قابلیت فراوان نویدبخش آینده ای روشن در صنایع مختلف هستند.

واژه های کلیدی:

پلیمر، هوشمند،
زیست تخریب پذیر،
پلیمرهای طبیعی،
پلیمرهای مصنوعی.

*پست الکترونیکی مسئول مکاتبات:

donyavosough1384@gmail.com

۱ مقدمه

می کنند.

- محرک های شیمیایی (حلال، قدرت یونی و الکتروشیمی یا pH) که برهم کنش های بین مولکولی، برای مثال میان پلیمر با حلال یا بین زنجیرهای پلیمر را کم و زیاد می کنند.

- محرک های زیستی (آنزیم ها یا گیرنده ها) که عملکرد واقعی مولکول ها، مانند واکنش های آنزیمی یا تشخیص گیرنده های مولکول ها را تحت تأثیر قرار می دهند [۲].

در پاسخ به محرک های محیطی، پلیمرهای هوشمند ممکن است تغییرات ساختاری چشمگیر و سریعی از خود نشان دهند. به بیان دیگر، این پلیمرهای هوشمند می توانند اندازه، شکل یا دیگر ویژگی های خود را در واکنش به محرک های خارجی تغییر دهند. این پلیمرها با تغییر ساختار فیزیکی یا ترکیب شیمیایی خود در برابر تغییرات جزئی محیط، خود را تطبیق می دهند. پلیمر تطبیق پذیر می تواند ورودی خارجی را به عنوان علائم دریافت کرده، شدت آن را ارزیابی کرده، در پاسخ ساختار خود را تغییر دهد.

پلیمرهای پاسخ پذیر ممکن است از منابع طبیعی یا به شکل مصنوعی تولید شوند. پلیمرهای طبیعی مانند کیتوسان و آلومین می توانند نسبت به دما و pH پاسخ دهند. مواد دیگری مانند متیل سلولز و ژلاتین نیز خواص دما-پاسخ پذیر دارند. یکی از روش های ساخت سامانه های مصنوعی پاسخ پذیر، استفاده از پلیمر پاسخ گو است. روش دیگر، ترکیب پلیمر با ترکیب پاسخ پذیر است که در این حالت، پلیمر بیشتر نقش حامل یا الگو را برای جزء پاسخ دهنده ایفا می کند [۳].

پلیمرهای هوشمند طبق دسته بندی Kumar بر اساس حالت فیزیکی خود به سه دسته تقسیم می شوند:

- ۱- زنجیرهای آزاد در محلول، که پلیمر در اثر محرک می تواند به طور برگشت پذیر دچار فروپاشی ساختار شود.
- ۲- ژل های دارای پیوند عرضی کووالانسی و ژل های برگشت پذیر یا فیزیکی با شبکه های میکروسکوپی یا ماکروسکوپی که رفتار تورم آنها تحت تأثیر محیط اطراف آنها قرار می گیرد.
- ۳- حالت جذب سطحی زنجیر یا پیوند زنی به سطح، که پلیمرهای روی سطح به طور برگشت پذیر متورم شده یا فرو می پاشند و می توانند سطح مشترک را از حالت آب دوست به آب گریز و برعکس تبدیل کنند.

این تغییرات اغلب برگشت پذیر به سطوح انرژی در حالت های انتقالی مدنظر بستگی دارد. در حقیقت، تغییرات مزبور به طور ضمنی با حفظ ساختار اصلی شبکه در سطوح انرژی پایین تر از حالت تعادل اتفاق می افتد. با توجه به ماهیت ماده، محرک تنها به وسیله بخشی از ساختار مولکولی یا ابرمولکولی به طور

فناوری امروزه بشر همان طور که در صدد تخصصی تر کردن کارها و به کارگیری نیروی کار متخصص برای انجام امور است، به دنبال اختراع و تولید دستگاه ها و موادی است که قابلیت انجام کاری را به طور تخصصی و هوشمندانه داشته باشند. هم زمان با پیشرفت سایر شاخه های علم در این زمینه، دانشمندان پلیمر نیز به پیشرفت های قابل ملاحظه ای در زمینه پلیمرهای هوشمند با قابلیت ها و کاربردهای ویژه دست یافته اند. در طبیعت موارد متعددی از مواد پاسخ گو به محرک دیده می شود که طی سال ها الهام بخش پژوهشگران در زمینه های مختلف بوده است. نمونه های موجود در سامانه های طبیعی مانند گل آفتابگردان که به طرف خورشید می چرخد، میوه درخت کاج که پره های آن در اثر رطوبت محیط باز و در محیط های خشک جمع می شود، پوست آفتاب پرست که با تغییر محیط اطراف تغییر رنگ می دهد، بسته و باز شدن مردمک چشم در حضور و غیاب نور، خودترمیمی پوست بدن انسان یا قسمت های مختلف گیاهان و موارد مشابه دیگر، دانشمندان را به تلاش برای سنتز پلیمرهای هوشمند با کاربردهای گسترده، نوظهور و راهگشا در جهت شبیه سازی عملکرد این اندامواره ها واداشته است. پلیمرهای هوشمند دسته ای از پلیمرهای سنتزی با خواص منحصر به فرد فیزیکی-شیمیایی هستند که کاربردهای بسیاری در زمینه های تخصصی و تجاری دارند [۱]. در این مقاله پلیمرهای هوشمند زیست تخریب پذیر مورد مطالعه قرار می گیرند.

۱ پلیمرهای هوشمند (Smart Polymers)

پلیمرهای هوشمند دسته ای از پلیمرهای سنتزی با خواص منحصر به فرد فیزیکی-شیمیایی هستند که از زمان پیدایش، کاربردهای بسیاری را در زمینه های تخصصی و تجاری پیدا کرده اند. پلیمر پاسخ گو به محرک (Stimuli-Responsive)، پلیمر حساس به محیط (Environmentally-Sensitive) و پلیمرهای هوشمند (Intelligent) نام های دیگری از این دسته مواد است. ویژگی منحصر به فرد این پلیمرها در ایجاد تغییرات ساختاری ماکروسکوپی سریع، ابعادی یا فیزیکی اغلب برگشت پذیر در رنگ، نفوذ پذیری، شکل و امثال آن در اثر قرارگیری در معرض کوچک ترین اثر محرک معین در آنهاست.

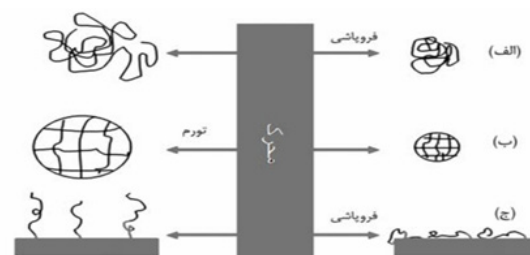
طبق دسته بندی Cabane و همکاران، محرک ها به سه دسته فیزیکی، شیمیایی و زیستی زیر تقسیم می شوند:

- محرک های فیزیکی (نور، دما، فراصوت، مغناطیس، محرک های مکانیکی و الکتریکی و فشار) که اغلب دینامیک زنجیرها، برای مثال سطح انرژی سامانه پلیمر-حلال را دستخوش تغییر

مزایای قابل توجهی نسبت به ربات های سفت و سخت ارائه می دهند. محرک های پلیمری الکتروفعال (EAP) در مرکز این ربات ها قرار دارند که امکان تغییر شکل های بزرگ در پاسخ به محرک های خارجی را فراهم می کنند. EAP ها به ویژه انواع یونی و الکترونیکی، به دلیل کرنش تحریک بالا، انعطاف پذیری، ماهیت سبک و بهره وری انرژی مورد توجه قرار گرفته اند که آن ها را برای کاربردهایی در مکاترونیک، رباتیک و مهندسی زیست پزشکی ایده آل می کنند. پلیمرهای پیزوالکتریک مانند پلی وینیلیدین فلورید (PVDF) به دلیل انعطاف پذیری، زیست سازگاری و سهولت ساخت شناخته می شوند و به سنجش فشار و حس لامسه در سامانه های رباتیک کمک می کنند. پلیمرهای رسانا، با سرعت تحریک سریع و قابلیت های کرنش بالا، در کنار کامپوزیت های پلیمری مغناطیسی (MPC) با کاربردهایی در زیست پزشکی و الکترونیک وجود دارند. ادغام یادگیری ماشین (ML) و اینترنت اشیا، در حال تغییر رباتیک نرم، بهبود تحریک، کنترل و طراحی است [۵]. جذاب ترین جنبه پلیمرهای هوشمند در توانایی آن ها برای سفارشی سازی و حساسیت سازگار آن ها نهفته است. همه این محرک های خارجی برای پلیمرهای هوشمند به دلیل نقص اصلی خود، زمان واکنش آهسته دارند. به دلیل سازگاری پلیمری منابع و ساخت ترکیبی آن ها، می توان واکنش پلیمری به القای معین را در محدوده خاص اصلاح کرد [۴].

۲ پلیمرهای زیست تخریب پذیر

پلیمرهای زیست تخریب پذیر در طبیعت به دلیل تعامل بین موجودات زنده تجزیه می شوند. منظور از زیست تخریب پذیر، تجزیه به زیست توده و گازها (مانند CO_2 و CH_4) در حضور



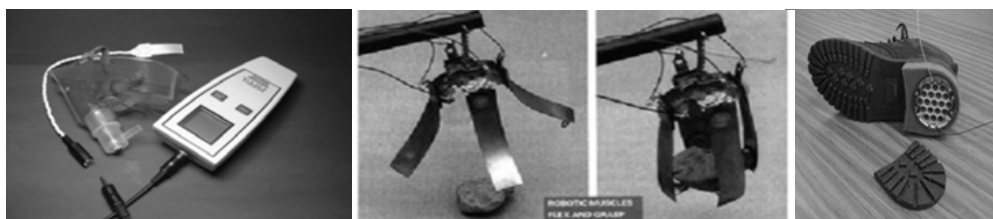
شکل ۱ سه حالت فیزیکی پلیمرهای هوشمند: (الف) زنجیر محلول، (ب) شبکه های میکرو یا ماکروسکوپی و (ج) زنجیرهای سطحی [۲].

جزئی جذب می شود. اما با جمع شدن بازتاب این پاسخ ها از هر بخش، پاسخ مورد نظر شدت می یابد و به شکل علایمی قوی مشاهده می شود. انتقال بین این دو حالت که در حالت اعمال انرژی مناسب اتفاق می افتد، می تواند نوآرایی بین دو حالت سیس-ترانس یا سایر تغییرات صورت بندی باشد. نوآرایی های القا شده با پیوند هیدروژنی، تجمع و تفکیک، نفوذ-جدایش، نظم-بی نظمی یا پروتون دار شدن-پروتون زدایی نیز از این قبیل هستند. در مجموع، اساس عملکرد پلیمر هوشمند شامل دریافت، پردازش و پاسخ به محرک (Actuation) بر اساس ترمودینامیک انتقالات استوار است [۲].

پلیمرهای هوشمند در زمینه مهندسی بافت، حمل و نقل دارویی، حامل ژن، کشت سلول، بازیابی روغن، مهندسی نساجی، تصفیه پروتئین و مدیریت پسماند رادیواکتیو سودمند هستند. گسترش و تقویت برنامه های فعلی با توسعه پلیمرهای جدید و عوامل اتصال متقابل که هم تجزیه و تحلیل پذیری بهتر و هم زیست سازگاری دارند، امکان پذیر است [۴]. ربات های نرم که از مواد تغییر شکل پذیر ساخته شده اند، با تقلید از بافت های زیستی و ارائه سازگاری، ایمنی و عملکرد در کاربردهای مختلف،

جدول ۱ مقایسه پلیمر هوشمند و غیرهوشمند [۳ و ۴].

ویژگی ها	پلیمرهای هوشمند	پلیمرهای غیرهوشمند (معمولی)
پاسخ به محیط	پاسخ گو به محرک های بیرونی مانند دما، pH، نور	فاقد توانایی پاسخ به تغییرات محیطی
ساختار مولکولی	ساختار تطبیق پذیر، قابلیت تغییر در واکنش به علایم	ساختار پایدار و بدون تغییر
کاربردها	زیست مواد، پزشکی، نساجی هوشمند	بسته بندی، الیاف، ظروف پلاستیکی
رفتار مکانیکی مثال ها	متغیر و وابسته به محیط کیتوسان، متیل سلولوز، ژلاتین	ثابت و قابل پیش بینی پلی اتیلن، پلی وینیل کلراید، نایلون
قابلیت تنظیم خواص	بالا- قابل طراحی برای پاسخ به محرک خاص	پایین- خواص از پیش تعیین شده اند
منبع	طبیعی یا مصنوعی، اغلب با طراحی مولکولی پیشرفته	طبیعی، مصنوعی یا نیمه مصنوعی

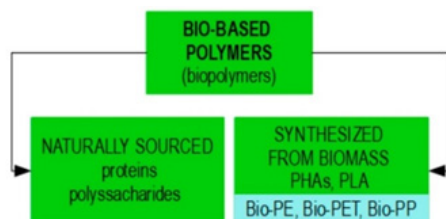


شکل ۲ نمونه کاربردهای پلیمرهای الکتروفعال: (الف) پاشنه کفش مولد انرژی الکتریکی از پلیمر پیزوالکتریک، (ب) بازوی مکانیکی از جنس پلیمر رسانا و (ج) حسگر تنفسی از جنس پلیمر پیزوالکتریک [۲].

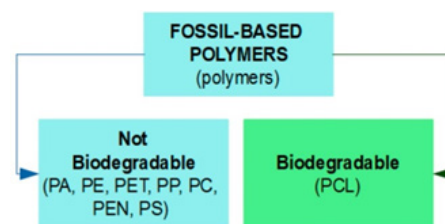
غیرزیست تخریب پذیر مزایایی مانند هزینه کم، قابلیت بازیافت، استفاده مجدد، سازگاری با محیط زیست و کاهش آلودگی در طبیعت دارند. مواد زیست تخریب پذیر نه تنها در بسته بندی مواد غذایی کاربرد دارند بلکه در زمینه زیست پزشکی و الکترونیک نیز کاربرد دارند. پلیمرهای زیست تخریب پذیر را می توان بر اساس نوع رسانایی، یعنی این که پلیمر زیست تخریب پذیر عایق، رسانا یا نیمه رسانا است، برای کاربرد در دستگاه های الکترونیکی استفاده کرد. از آنجایی که استفاده گسترده از دستگاه های الکترونیکی منجر به تولید انبوه زباله های الکترونیکی می شود که باعث ایجاد آلودگی و کاهش دسترسی به این مواد می شود، بازیافت مواد زائد به طور موثر برای تولید مجدد همان ماده ای که از آن تشکیل شده اند، امکان پذیر نیست. از این رو، به پلیمرهای زیست تخریب پذیر نیاز است که بتوانند جایگزین موادی شوند که در حال حاضر در دستگاه های الکترونیکی استفاده می شوند [۷]. سه بخش اصلی که پلیمرهای زیست تخریب پذیر در آنها معرفی شده اند عبارتند از پزشکی، بسته بندی و کشاورزی. به دلیل داشتن قابلیت تجزیه پذیری، کاربردهای پلیمرهای زیست تخریب پذیر نه تنها شامل دستگاه های دارویی، به عنوان ماتریس هایی برای بی حرکت کردن آنزیم و دستگاه های رهایش کنترل شده، بلکه شامل دستگاه های درمانی، به عنوان اندام های مصنوعی موقت و ساختار متخلخل برای مهندسی بافت نیز می شود. زیست پلیمرها حلالیت کمی در آب دارند و جذب آب بسیار مهمی دارند، بنابراین می توانند به عنوان مواد جاذب در مراقبت های بهداشتی، باغبانی و کشاورزی مورد استفاده قرار گیرند. ضایعات بسته بندی باعث افزایش نگرانی های زیست محیطی شده است. توسعه مواد

(هوازی) یا عدم حضور (بی هوازی) اکسیژن به دلیل فعالیت میکروب ها (عمدتاً قارچ ها و باکتری ها) است. در شرایط محیطی مختلف، پلیمرهای زیست تخریب پذیر تغییرات قابل توجهی را نشان می دهند. برای همه پلیمرهای زیست تخریب پذیر، لازم است که هنگام استفاده در کاربرد خاص خود، به اندازه کافی پایدار و بادوام باشند، اما پس از دفع باید به راحتی تجزیه شوند. پلیمرهای زیست تخریب پذیر دارای ستون فقرات کربنی بسیار قوی هستند که شکستن آن ها بسیار دشوار است، به طوری که تجزیه پلیمرها اغلب از گروه های انتهایی آغاز می شوند. وقتی پلیمر حاوی بخش های آب گریز و آب دوست باشد، به نظر می رسد که زیست تخریب پذیری بالاتری نسبت به پلیمرهایی دارد که فقط ساختارهای آب گریز یا آب دوست دارند. برخی قوانین کلی تعیین ارزیابی زیست تخریب پذیری را ممکن می سازند. به عنوان مثال، افزایش عواملی مانند وزن مولکولی درشت مولکول ها، آب گریزی و اندازه دامنه های بلوری، زیست تخریب پذیری را کاهش می دهد. از طریق عمل آنزیم ها و تخریب شیمیایی مرتبط با زیست تخریب پذیری موجودات زنده، این اتفاق می افتد. برای این که مواد زیستی، زیست تخریب پذیر باشند باید برخی از خواص مهم در نظر گرفته شوند. این مواد باید (الف) زمان تخریبی متناسب با عملکردشان داشته باشند، (ب) پاسخ التهابی پایدار ایجاد نکنند، (ج) شامل نفوذپذیری و فرایندپذیری مناسب برای کاربرد طراحی شده باشند، (د) خواص مکانیکی مناسبی برای کاربرد مورد نظر خود داشته باشند، (ه) محصولات تخریب غیرسمی تولید کنند که به راحتی جذب یا دفع شوند و... [۶].

پلیمرها بر اساس تخریب آن ها به دو دسته زیست تخریب پذیر و زیست تخریب ناپذیر تقسیم می شوند. زیست تخریب پذیری به تولید مواد بستگی ندارد و بنابراین نه تنها پلیمرهای طبیعی مانند لاستیک، پشم و پنبه زیست تخریب پذیر هستند بلکه پلیمرهای مصنوعی مانند پلی هیدروکسی بوتیرات (PHB) و پلی وینیل استات (PVAc) نیز در طبیعت زیست تخریب پذیر هستند. پلیمرهای زیست تخریب پذیر نسبت به



شکل ۳ پلیمرهای زیست-پایه [۸].



شکل ۴ پلیمرهای فسیل-پایه [۸].

بسته بندی زیست تخریب پذیر توجه فزاینده ای را به خود جلب کرده است. پلیمرهای زیست تخریب پذیر به عنوان ماتریس های قابل کاشت برای آزادسازی کنترل شده داروها در داخل بدن یا به عنوان بخیه های قابل جذب استفاده می شوند [۶].

۳ پلیمر هوشمند زیست تخریب پذیر

در سال های اخیر، پیشرفت های چشم گیری در توسعه پلیمرهای زیست تخریب پذیر هوشمند توسط پژوهشگران سراسر جهان حاصل شده است. پلیمرهای حافظه دار، خودترمیم شونده، پیزوالکتریک، کروموزنیک و الاستومرهای مغناطیسی-رئولوژیکی از دسته های شناخته شده پلیمرهای زیست تخریب پذیر هوشمند هستند. در میان آنها، پلیمرهای پیزوالکتریک بیشترین تقاضا را در بازار دارند. پلی لاکتیک اسید (PLA) رایج ترین ماتریس پلیمری است که در ساخت پلیمرهای زیست تخریب پذیر هوشمند به کار رفته است. فنون اصلاح شامل هم پلیمر شدن، آمیخته سازی و ساخت کامپوزیت هستند. پلیمرهای حافظه دار (SMPs) در دو روش اول (هم پلیمر شدن و آمیخته سازی) غالب بودند، در حالی که روش سوم (ساخت کامپوزیت) برای تمامی مواد هوشمند مناسب بود [۹].

کاربردهای پلیمر هوشمند زیست تخریب پذیر

پیشرفت های اخیر در علم پلیمر، به ویژه از طریق توسعه پلیمرهای زیست تخریب پذیر و هوشمند، باعث ایجاد تغییر دگرگون کننده در مهندسی زیست پزشکی شده است. هم افزایی بین پلیمرهای طبیعی و مصنوعی که توسط فناوری نانو و تولید افزایشی تقویت شده است امکان ایجاد داربست های هوشمند و دستگاه های قابل کاشت متناسب با نیازهای بالینی خاص را فراهم می کند [۱۰]. ماده پاسخ دهنده به محرک به نوعی از ماده اشاره دارد که خواص فیزیکی و شیمیایی آن می تواند با قرار گرفتن در معرض علائم خارجی تغییر کند. برای دستیابی به عملکردهای خاص، انواع مواد زیستی پاسخ دهنده به محرک تهیه می شوند. به عنوان مثال، کیتوزان به دلیل پروتونه شدن و پروتون زدایی انتهای آمین خود به pH پاسخ می دهد. هیدروژل های کیتوزان می توانند با

تغییر pH و شدت یونی محیط خارجی، متورم یا متلاشی شوند. هیدروژل ها دارای خواص فیزیکوشیمیایی قابل تنظیمی هستند، به ویژه برای خواص مکانیکی (مانند کشسانی و گرانش کشسانی) که می توانند عملکردهای خاصی (مانند هدایت رفتار و سرنوشت سلول) را فراهم کنند. علاوه بر این، مولکول های داروی موجود در هیدروژل می توانند به دلیل تغییر حجم هیدروژل آزاد شوند. در مقایسه با مواد سنتی پاسخ گو به محرک، مزیت اصلی ماده زیستی پاسخ گو به محرک این است که می تواند شرایط فیزیکی و شیمیایی طبیعی را شبیه سازی کند و به مواد زیست سازگاری عالی ببخشد. بنابراین به طور گسترده در مواد غذایی، پزشکی، مهندسی بافت و سایر زمینه ها استفاده می شود [۱۱].

همگرایی فناوری های پلیمری هوشمند و زیست تخریب پذیر، پیشرفت قابل توجهی را در مهندسی بافت و پزشکی مداخله ای تسریع کرده است. این مواد زیستی پیشرفته، کنترل بی سابقه ای بر خواص مکانیکی، شیمیایی و زیستی ارائه می دهند و آنها را برای داربست ها، سکوها دارورسانی و دستگاه های قابل کاشت ایده آل می کنند. پلیمرهای هوشمند با تقلید از ماتریس خارج سلولی و پاسخ به محرک های فیزیولوژیکی، درمان هدفمند، بازسازی بافت و مداخلات کم تهاجمی را تسهیل می کنند. این بررسی، پیشرفت های اخیر در طراحی، ساخت و کاربرد بالینی سامانه های پلیمری را با تأکید بر نقش حیاتی آنها در پزشکی شخصی، راهبردهای احیا کننده و دستگاه های پزشکی نسل بعدی، ترکیب می کند [۱۰].

بحث همگرایی پلیمرهای هوشمند و زیست تخریب پذیر، جهشی تحول آفرین در مهندسی زیست پزشکی است که عملکرد پویا، زیست سازگاری و تطبیق پذیری بالینی را ارائه می دهد. یکی از جذاب ترین پیشرفت ها در این حوزه، توسعه پلیمرهای حافظه دار شکلی (SMP) است که امکان استقرار دستگاه ها در پیکربندی های کم تهاجمی و فعال سازی درجا با استفاده از محرک های خارجی مانند گرما، نور و یا تغییر pH را فراهم می کند. در مقایسه با آلیاژهای حافظه دار شکلی سنتی مانند نیتینول، SMPها انعطاف پذیری بیشتر، تغییر شکل قابل بازیابی بالاتر (تا ۸۰۰٪) و قابلیت فعال سازی از راه دور را ارائه می دهند. این خواص، SMPها را به ویژه برای کاربردهایی مانند بخیه های خودسفت شونده و داربست های دارویی مناسب می کند. مسیرها و چشم اندازهای آینده همگرایی فناوری های پلیمری هوشمند و زیست تخریب پذیر، مهندسی پزشکی را به ویژه در زمینه های پزشکی ترمیمی، دستگاه های کم تهاجمی و درمان های شخصی سازی شده متحول خواهد کرد. در حالی که پیشرفت های قابل توجهی حاصل شده است، چندین مسیر برای

تحقیقات و نوآوری‌های آینده باز است:

۵. بهبود کاربرد بالینی

باوجود داده‌های آزمایشگاهی قوی، تعداد کمی از پلیمرهای هوشمند زیست‌تخریب‌پذیر به کاربرد بالینی رسیده‌اند. تلاش‌های آینده باید بر مطالعات زیست‌سازگاری بلندمدت، استانداردسازی معیارهای تخریب و تولید مقرون‌به‌صرفه تأکید داشته باشند. راهبردهای نظارتی باید با رفتار دینامیکی این مواد که سامانه‌های طبقه‌بندی تجهیزات پزشکی موجود را به چالش می‌کشند، هماهنگ شوند [۱۰]. باوجود توسعه سریع الاستومرهای بخیه برای رفع نیازهای جراحی عملی، استفاده از عملکرد خودترمیمی الاستومرها به عنوان بخیه جراحی برای تسهیل بهبود زخم‌ها مورد بررسی قرار نگرفته است. در تحقیقاتی توسط پژوهشگران الاستومر هوشمند پلی‌کربنات آلیفاتیک زیست‌تخریب‌پذیر، mPEG113-b-PMBCn، از مونومر پلی‌کربنات آلیفاتیک با متوکسی پلی‌اتیلن گلیکول (mPEG113، 5.0kDa) به عنوان آغازگر سنتز شد که خواص مکانیکی عالی، خودترمیمی بسیار کارآمد و رفتار حافظه‌شکلی قابل توجهی را نشان داد. این پلیمرها به مدت ۱۵۰ دقیقه توانایی خودترمیمی برجسته‌ای دارند. در همین حال، پس از $46/33 \pm 1/18$ ثانیه، شکل موقت پلیمر به دست آمده بازیابی شد. نتایج آزمایش‌های زیست‌سازگاری نشان می‌دهد که این پلیمرها زیست‌سازگاری عالی دارند و می‌توانند به عنوان مواد زیست‌پزشکی خوب در نظر گرفته شوند. سپس آزمایش‌های درون تنی (In-Vivo) برای اثبات توانایی خودترمیمی پلیمرها در گره‌زدن و بستن سریع سطح زخم با استفاده از شکل برنامه‌ریزی شده در دمای فیزیولوژیکی انجام شد. نتایج نشان داد که زخم ناشی از جراحی می‌تواند در مقایسه با بخیه‌های سنتی به طور موثری بهبود یابد، که این امر پیشنهادهاى مطالعاتی جدیدی را برای نواحی بهبودیافته بعدی ارائه می‌دهد [۱۲].

به دلیل اهمیت بسته‌بندی ایمن مواد غذایی، محققان و تولیدکنندگان به دنبال راه کارهای مناسب برای این نوع بسته‌بندی هستند. بسته‌بندی هوشمند مواد غذایی نشان‌دهنده سلامت یا فساد ماده غذایی داخل بسته‌بندی است. استفاده از مواد زیست‌تخریب‌پذیر در بسته‌بندی مواد غذایی نیز به دلیل عدم تولید آلودگی در محیط زیست، از اهمیت زیادی برخوردار هستند. در آزمایش‌های انجام شده توسط پژوهشگران در ابتدا خمیر کاغذ خشک اکالیپتوس با استفاده از آسیاب دیسکی ماسکو به ریز لیفچه‌های سلولزی سلولز تبدیل شد. برای تهیه ژل ریز لیفچه‌های سلولزی سلولز / عصاره گیاهی، محلول عصاره یربامات به میزان ۱۰ و ۲۰ درصد (حجمی / حجمی) به جای آب

۱. چندمنظوره بودن از طریق ادغام مواد

مواد آینده به طور فزاینده‌ای چندین کارکرد مانند حافظه‌شکلی، رسانایی، فعالیت ضد میکروبی و تخریب کنترل شده را در سکویی واحد ترکیب خواهند کرد. به عنوان مثال، پلیمرهای حافظه‌شکلی (SMPs) با محرک‌های نور گرمایی یا مغناطیس گرمایی یکپارچه می‌توانند تحریک از راه دور را بدون نیاز به روش‌های تهاجمی امکان‌پذیر کنند. به طور مشابه، ترکیب مستقیم عوامل زیست‌فعال یا تعدیل‌کننده سامانه ایمنی در داربست‌های زیست‌تخریب‌پذیر می‌تواند از بازسازی هم‌زمان بافت و کنترل التهاب پشتیبانی کند.

۲. سامانه‌های پویا و پاسخگو به محرک‌ها

پلیمرهای هوشمندی که به نشانه‌های زیستی پیچیده (مانند فعالیت آنزیمی، تنش اکسایشی، سطح گلوکز) و نه فقط محرک‌های خارجی مانند دما یا pH پاسخ می‌دهند، جهت‌گیری امیدوارکننده‌ای هستند. این مواد می‌توانند داروها را تحویل دهند. به عنوان مثال، پلیمرهای پاسخگو به ROS یا MMP برای کاربردهایی در درمان سرطان و بهبود زخم در حال بررسی هستند.

۳. چاپ چهاربعدی و کاشتینه‌های شخصی سازی شده

تولید افزایشی (چاپ سه بعدی) به چاپ چهاربعدی تکامل خواهد یافت، جایی که پلیمرهای هوشمند به صورت سازه‌هایی چاپ می‌شوند که در پاسخ به محرک‌ها به مرور زمان شکل یا عملکرد خود را تغییر می‌دهند. این امر امکان ساخت کاشتینه‌ها، داربست‌ها و داربست‌های بافتی خود استقراری مخصوص بیمار با خواص مکانیکی و تخریبی متناسب را فراهم می‌کند. مسدودکننده‌ها و بخیه‌های عروقی چاپ چهاربعدی نویدبخش بوده‌اند.

۴. مواد الهام گرفته از زیست و خودترمیم‌شونده

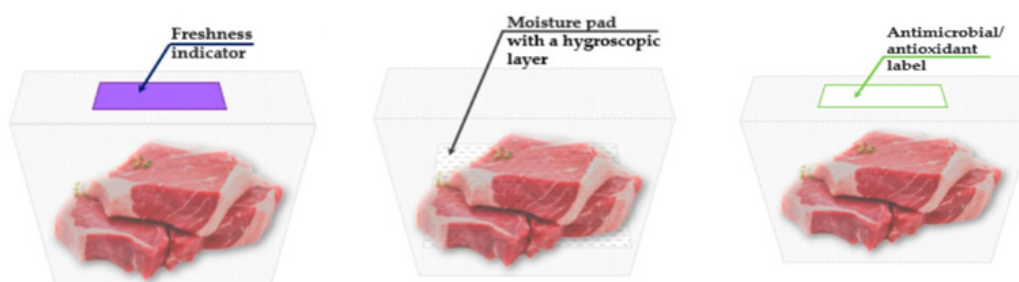
پلیمرهای الهام گرفته از طبیعت که از استخوان، غضروف یا پوست تقلید می‌کنند برای مطابقت با رفتار غیرخطی و وابسته به زمان بافت‌های طبیعی در حال بررسی هستند. ترکیب ستون فقرات زیست‌تخریب‌پذیر با قابلیت‌های خودترمیمی (به عنوان مثال، از طریق پیوند هیدروژنی، پل‌های دی‌سولفیدی یا واکنش‌های دیلز-آلدِر) می‌تواند طول عمر دستگاه را افزایش داده و پاسخ‌های جسم خارجی را کاهش دهد.

شدند و به مدت ۴۸ ساعت در دمای اتاق (به منظور تسریع در فساد) نگهداری شدند. در فواصل زمانی هر ۶ ساعت، آزمون های pH، TVB-N و رنگ سنجی فیلم ها انجام شد تا تغییر رنگ پلیمر تهیه شده در هر مرحله از نگهداری مشخص شود. نتایج حاکی از این بود که فیلم کاراژینان حاوی عصاره کلم در ابتدا بی رنگ است و با گذشت زمان نگهداری و پیشروی فساد در فیلم های بسته بندی شده و رسیدن فاکتورهای TVB-N و pH به میزان بیشتر از حد مجاز، رنگ فیلم دودی تیره می شود. این امر مصرف کننده را از کیفیت و تازگی ماهی بسته بندی شده مطلع می سازد. بنابراین می توان از فیلم کاراژینان حاوی عصاره کلم به عنوان نشانگر با شاخص فساد ماهی و سایر غذاهای گوشتی با ارزش اقتصادی بالا استفاده کرد [۱۴].

بسته بندی هوشمند، به عنوان فناوری نسل بعدی، به عنوان پاسخی به نگرانی های روزافزون مصرف کنندگان توسعه یافته است. با این حال مصرف گسترده پلاستیک های مشتق شده از نفت به دلیل مشکلات زیست محیطی در تولید این بسته بندی ها به نگرانی جهانی تبدیل شده است. بنابراین علاقه روزافزونی به استفاده از مواد بسته بندی زیست تخریب پذیر و خوراکی (مانند پروتئین ها، پلی ساکاریدها و لیپیدها) به عنوان مواد خام حاصل از منابع طبیعی ایجاد شده است. بنابراین سامانه های بسته بندی هوشمند مجهز به شاخص های رنگ سنجی مبتنی بر رنگ های طبیعی (مانند آنتوسیانین، بتاسیانین و...) به دلیل فراوانی، هزینه کم، دسترسی و ظرفیت هالوکرومیک قابل اعتماد (حساس به تغییرات pH) به عنوان جایگزین مناسب در بسته بندی مورد توجه قرار گرفته اند. بر همین اساس بسته بندی هوشمند همراه با رنگ های طبیعی، ویژگی های کیفی غذاها از جمله رشد میکروبی، تازگی و تغییرات شیمیایی در محصول را از طریق تغییرات بصری ناشی از تغییرات pH در غذا نظارت می کند که ارزیابی سریع و قابل اعتمادی را از ایمنی و کیفیت مواد غذایی، ارائه می دهد [۱۵].

به خمیر خشک اکالیپتوس افزوده و از آسیاب ماسکو عبور داده شد. از گلیسرول نیز به عنوان عامل نرم کننده به میزان ۳۷ درصد وزن خشک خمیر استفاده شد. سپس فیلم ها با ترکیبات مختلف با استفاده از روش قالب گیری تهیه شدند و با طیف سنجی تبدیل فوریه فروسرخ (FTIR) مورد بررسی قرار گرفتند. همچنین مقاومت کششی فیلم ها نیز مورد ارزیابی قرار گرفت. آزمون زیست تخریب پذیری نیز با استفاده از روش دفن در خاک انجام شد. در پایان، هوشمندی فیلم ها با استفاده از محلول بافر از pH یک تا سیزده، مورد سنجش قرار گرفت. نتایج این تحقیق نشان داد که فیلم های حاصل کاملاً دوستدار محیط زیست هستند و پس از حدود یک ماه تقریباً به طور کامل از بین می روند. فیلم های حاوی عصاره به دلیل وجود مواد ضد میکروب در آن، کمی دیرتر تخریب می شوند. نتایج آزمون هوشمندی فیلم ها نیز نشان داد که می توان از عصاره یربامات به عنوان عامل نشانگر در تعیین فساد مواد غذایی در بسته بندی استفاده کرد [۱۳].

ماهی و سایر غذاهای دریایی دارای فواید بسیاری برای سلامتی انسان ها هستند و از سوی دیگر سرعت فساد آن نسبت به سایر غذاهای گوشتی بالاست. بدین منظور برای عرضه ماهی با کیفیت به مصرف کننده، بسته بندی مطلوب الزامی به نظر می رسد و هدف تولید پلیمری برای بسته بندی مواد غذایی (خصوصاً گوشتی) است که بتواند مصرف کننده را با تغییر رنگ خود از فساد ماده غذایی مطلع کند و علاوه بر آن زیست تخریب پذیر نیز باشد. به این منظور فیلم های زیست تخریب پذیر بر پایه کاراژینان در ترکیب با عصاره کلم قرمز (Oleraceae Brassica) تهیه شد. پس از تولید فیلم های مذکور خواص کاربردی آن ها اعم از مقاومت کششی و استحکام، حلالیت، نفوذپذیری به بخار آب و بررسی ریزساختارها با آزمون FTIR مورد بررسی پژوهشگران قرار گرفتند. سپس برای بررسی رابطه بین روند فساد ماهی و تغییر رنگ فیلم ها، فیلم های ماهی قزل آلا رنگین کمان (Onco-rhynchus Mykiss) با استفاده از فیلم های تهیه شده بسته بندی



شکل ۵ سامانه های بسته بندی هوشمند برای محصولات گوشتی [۸].

جدول ۲ شرکت‌های ایرانی تولیدکننده پلیمر زیست‌تخریب‌پذیر.

نام شرکت	کشور	محصول تولیدی
پادنا	ایران	صنایع خودروسازی، فیلم، بسته‌بندی، پوشش لوله‌های فلزی و...
زیست‌پلیمر شریف	ایران	صنایع فیلم دمشی، تزریق و شکل‌دهی گرمایی
پیشگامان گیتی سبز	ایران	پلی‌اتیلن بازیافتی، ترکیب‌های گیاهی گرید تزریق و شکل‌دهی، ترکیب پلی‌اتیلن 3840، ترکیب پلی‌اتیلن 62n07
زیست‌سبزپلیمر	ایران	پلیمرهای زیست‌تخریب‌پذیر (PBAT پلی‌بوتیلن سوکسیانات) و ترکیب آلی BDO (1.4 بوتاندیول)

پایداری عملیاتی، مقیاس‌پذیری و مدیریت چرخه عمر مورد بحث قرار می‌گیرند که بر نیاز به راهبردهای سطح مولکولی در سامانه تاکید می‌کند. رویکرد جامع که طراحی مولکولی و چارچوب‌های اقتصاد دایره‌ای را ترکیب می‌کند، تبدیل پلیمرهای هوشمند به فناوری‌های پایدار با کارایی بالا را تسریع خواهد کرد [۱۶].

در ادامه به معرفی شرکت‌های داخلی که پلیمر زیست‌تخریب‌پذیر تولید می‌کنند (جدول ۲) و همچنین برخی شرکت‌های خارجی که تولیدکننده پلیمر هوشمند زیست‌تخریب‌پذیر هستند (جدول ۳) اشاره شده است.

نتیجه‌گیری

پلیمرهای هوشمند زیست‌تخریب‌پذیر به دلیل ویژگی‌های چندکاره خود جایگاه مهمی در توسعه فناوری‌های نوین یافته‌اند. این دسته از مواد به‌عنوان نسل جدید پلیمرهای چندمنظوره،

توسعه پلیمرهای هوشمند پایدار، موادی را به وجود آورده است که قادر به پاسخ‌گویی به محرک‌های شیمیایی، زیستی و فیزیکی متنوع باشند. طبق بررسی‌هایی پیشرفت‌های اخیر در فنون پلیمری‌شدن کنترل‌شده از جمله روش‌های PDRP، RAFT، ATRP و روش‌های القای نوری را با تأکید بر سنتز بی‌خطر برای محیط‌زیست از طریق حلال‌های سبز و مسیرهای بدون حلال نشان داده شده است. ادغام مونومرهای مبتنی بر زیست، کاتالیزورهای سبز و اصول طراحی دایره‌ای، قابلیت بازیافت، تجزیه‌پذیری زیستی و تأثیر سمی کم را تسهیل می‌کند. به‌دلیل رفتار چندمنظوره خود این پلیمرها توانایی قابل‌توجهی در دارورسانی، مهندسی بافت، الکترونیک انعطاف‌پذیر، ذخیره انرژی، تبدیل انرژی و اصلاح محیط زیست از خود نشان می‌دهند. نمونه‌های معروف شامل هیدروژل‌های حساس به گرما، شبکه‌های پلیمری رسانا، الاستومرهای خودترمیم‌شونده و غشاهای جداسازی تطبیقی هستند. چالش‌های کلیدی مانند

جدول ۳ برخی شرکت‌های خارجی تولیدکننده پلیمرهای هوشمند زیست‌تخریب‌پذیر.

نام شرکت	کشور	محصول
Evonik	آلمان	مواد کارآمد برای سامانه‌های سازگار با محیط‌زیست و بخش‌های خودرو، رنگ، روکش و چسب
DSM Biomedical	هلندی و چندملیتی	انواع مواد و مکمل‌های غذایی، مواد دارویی و پزشکی، انواع رنگ
Shape Memory Medical	کالیفرنیا	راه‌حل‌های درمانی نوآورانه با استفاده از فناوری پلیمرحافظه شکلی تمرکز دارد
Amsilk	آلمان	الیاف و نخ، هیدروژل‌ها و پودر ابریشم
Biome Bioplastics	بریتانیا	پلاستیک‌های هوشمند و طبیعی
Chempilots	دانمارک	چاپ زیستی سه‌بعدی، جوهرها، پلیمرهای زیست‌فرسایش‌پذیر برای رهایش کنترل‌شده

ترکیبی از قابلیت پاسخ گویی به محرک های محیطی مانند دما، نور و رطوبت و همچنین توانایی تجزیه زیستی کنترل شده را در اختیار دارند. چنین ویژگی هایی موجب شده است تا در حوزه هایی نظیر پزشکی، بسته بندی هوشمند، دارورسانی، کشاورزی نوین و مهندسی بافت کاربرد گسترده ای پیدا کنند. این پلیمرها علاوه بر امکان پاسخگویی هوشمند و تطبیقی به تغییرات محیطی، به دلیل قابلیت تجزیه پس از مصرف از سازگاری بالایی با محیط زیست برخوردارند و نقش موثری در حفاظت از محیط، ساخت داربست های پزشکی، توسعه حسگرها و سامانه های دارورسانی ایفا می کنند. استفاده از نشانگرهای تغییر رنگ در بسته بندی مواد غذایی نیز از جمله مزایای عملی این پلیمرها به شمار می رود. با این وجود، کنترل دقیق نرخ تخریب همواره با چالش هایی همراه است و گاهی این فرایند سریع تر یا کندتر از حد مطلوب رخ می دهد. همچنین نیاز به افزایش مقاومت مکانیکی، اطمینان از زیست سازگاری بلندمدت، هزینه های بالای تولید و پیچیدگی فرایند سنتز از

دیگر محدودیت های آن به شمار می روند. در ایران نیز فعالیت برخی شرکت ها مانند پادنا، پیشگامان گیتی سبز و زیست پلیمر نشان دهنده گام های اولیه در زمینه تولید این مواد و فیلم های زیست تخریب پذیر است که می تواند به کاهش هزینه ها، اشتغال زایی و حرکت در مسیر فناوری های سبز کمک کند. با این حال، چالش هایی همچون نیاز به سرمایه گذاری در تحقیق و توسعه، فراهم سازی زیرساخت های نوین، استاندارد سازی و تضمین مقرون به صرفه بودن همچنان وجود دارد. از این رو موفقیت تجاری و صنعتی سازی این فناوری در ایران وابسته به حمایت های سازمانی، ارتقای فناوری و سرمایه گذاری های گسترده است. در مجموع، پلیمرهای هوشمند زیست تخریب پذیر موادی بسیار امیدبخش برای توسعه پایدار، حفاظت محیط زیست و کاربردهای پیشرفته پزشکی به شمار می آیند، اما رفع موانع موجود و بهبود مسیر انتقال از تحقیقات آزمایشگاهی به صنعت، شرط دستیابی به جایگاهی پایدار و سودآور در آینده خواهد بود.

مراجع

1. Asadi-Zahraei A., Rabiei-Far A., and Taevighi M., A Review On Smart Polymeric Materials: Types and Their Applications In Various Industries (Persian), Proceedings of the 13th International Conference On Materials and Metallurgical Engineering, Karaj, Iran, **2024**.
2. Khakzad Esfeghan F., Ali Nezhad Z., Rezaei Shirinabadi A., and Mahdavian A., Smart Polymers: Introduction and Application (Persian), *Baspareh*, 2, 10–17, **2012**.
3. Mohamed A.L., Gaffer H., and Elmansy M.F., A Survey Of Conventional and Smart Polymers, with an Emphasis on Their Novel Uses in the Textile Industry, *J. Text. Color. Polym. Sci.*, 21, 239–251, **2024**.
4. Mohamed R.R., Elshiekh A.O., Mohamed A.M., Abdul M.M., Hamid Kamal H.A., and Heikal A.M., Smart Polymers And Their Different Sustainable Applications, in: Uddin I. (Ed.), Sustainable Nanomaterials: Synthesis and Environmental Applications, Springer, *Singapore*, 271–300, **2024**.
5. Dewang Y., Sharma V., Baliyan V.K., Soundappan T., and Singla Y.K., Research Progress in Electroactive Polymers for Soft Robotics and Artificial Muscle Applications, *Polymers*, 17, 746, **2025**.
6. Patwary S., Maraz K.M., Shahida S., Ahmed A., and Khan R.A., A Review on the Properties and Applications of Biodegradable Polymers, *GSC Advanced Research and Reviews*, 9, 13–27, 2021.
7. Kulshrestha N., Biodegradable Polymers in Electronic Devices, in: Inamuddin and Altalhi T. (Eds.), Biodegradable Materials and their Applications, Wiley, Hoboken, NJ, USA, 773–788, **2022**.
8. Stoica M., Bichescu C.I., Crețu C.M., Dragomir M., Ivan A.S., Podaru G., Crețu M.-M., and Stuparu M., Review Of Bio-Based Biodegradable Smart Polymers: Sustainable Solutions for Food Packaging, *Foods*, 13, 3027, **2024**.
9. Chan Q.H., Alias S.A., Quek S.W., Ng C.Y., and Ku Marsilla K.I., A Review of the Preparations, Properties, and Applications of Smart Biodegradable Polymers, *Polymer-Plastics Technology and Materials*, 62, 1273–1289, **2023**.
10. Dallaev R., Smart and Biodegradable Polymers in Tissue Engineering and Interventional Devices: A Brief Review, *Polymers*, 17, 1976, **2025**.
11. Ma W., Hua D., Xiong R., and Huang C., Bio-Based Stimuli-Responsive Materials for Biomedical Applications, *Materials Advances*, 4, 458–475, **2023**.
12. Sun S., Chen C., Zhang J., and Hu J., Biodegradable Smart Materials With Self-Healing and Shape Memory Function for Wound Healing, *RSC Advances*, 13, 3155–3163, **2023**.
13. Aliabadi M., Dehghani Firoozabadi M.R., Afra E., Magalhães W.L.E., and Lima G.G., Evaluation of Biodegradable Smart Films Obtained from Cellulose Microfibril Gel and Yerbamat Plant Extract (Persian), *Iranian Journal Of Wood and Paper Industries*, 15, 55–66, **2024**.
14. Rostamzad H., Kamali-Sabeti N., and Babakhani A., Production and Evaluation of Biodegradable Smart Films Based on Carrageenan for Packaging Fish Fillet (Persian), *Shilat Journal*, 72, 85–95, **2019**.
15. Abedi-Firoozjah R. and Yousefi M., A Review of Smart Packaging Based on Biodegradable Polymer Films Containing Natural Pigments and Its Importance in the Food Industry (Persian), Proceedings of the 10th International Conference on Food Science, Organic Agriculture and Food Safety, Iran, **2022**.
16. Mahata K., Paul S., Kaushik A.K., and Banerjee S., Smart and Functional Polymers for Sustainable Applications in Health, Energy and Environment: Polymer Science, *Innovation of Chemistry and Materials for Sustainability*, 2, 177–195, **2025**.