

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

فناوری امروزه بشر همان‌طور که در صدد تخصصی‌تر کردن کارها و به‌کارگیری نیروی کار متخصص برای انجام امور است، به دنبال اختراع و تولید دستگاه‌ها و موادی است که قابلیت انجام کاری را به‌طور تخصصی و هوشمندانه داشته باشند. هم‌زمان با پیشرفت سایر شاخه‌های علم در این زمینه، دانشمندان پلیمر نیز به پیشرفت‌های قابل‌ملاحظه‌ای در زمینه پلیمرهای هوشمند با قابلیت‌ها و کاربردهای ویژه دست یافته‌اند. در طبیعت موارد متعددی از مواد پاسخ‌گو به محرک دیده می‌شود که طی سال‌ها الهام‌بخش پژوهشگران در زمینه‌های مختلف بوده است. نمونه‌های موجود در سامانه‌های طبیعی مانند گل آفتابگردان که به طرف خورشید می‌چرخد، میوه درخت کاج که پره‌های آن در اثر رطوبت محیط باز و در محیط‌های خشک جمع می‌شود، پوست آفتاب‌پرست که با تغییر محیط اطراف تغییر رنگ می‌دهد، بسته و باز شدن مردمک چشم در حضور و غیاب نور، خودترمیمی پوست بدن انسان یا قسمت‌های مختلف گیاهان و موارد مشابه دیگر، دانشمندان را به تلاش برای سنتز پلیمرهای هوشمند با کاربردهای گسترده، نوظهور و راه‌گشا در جهت شبیه‌سازی عملکرد این اندام‌واره‌ها واداشته است. پلیمرهای هوشمند دسته‌ای از پلیمرهای سنتزی با خواص منحصر به فرد فیزیکی-شیمیایی هستند که کاربردهای بسیاری در زمینه‌های تخصصی و تجاری دارند [۱]. در این مقاله پلیمرهای هوشمند زیست‌تخریب‌پذیر مورد مطالعه قرار می‌گیرند.

۱ پلیمرهای هوشمند (Smart Polymers)

پلیمرهای هوشمند دسته‌ای از پلیمرهای سنتزی با خواص منحصر به فرد فیزیکی-شیمیایی هستند که از زمان پیدایش کاربردهای بسیاری را در زمینه‌های تخصصی و تجاری پیدا کرده‌اند. پلیمر پاسخ‌گو به محرک (Stimuli-Responsive)، پلیمر حساس به محیط (Environmentally-Sensitive) و پلیمرهای هوشمند (Intelligent) نام‌های دیگری از این دسته مواد است. ویژگی منحصر به فرد این پلیمرها در ایجاد تغییرات ساختاری ماکروسکوپی سریع، ابعادی یا فیزیکی اغلب برگشت‌پذیر در رنگ، نفوذپذیری، شکل و امثال آن در اثر قرارگیری در معرض کوچک‌ترین اثر محرک معین در آن‌هاست.

طبق دسته‌بندی Cabane و همکاران، محرک‌ها به سه دسته فیزیکی، شیمیایی و زیستی زیر تقسیم می‌شوند:

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

می‌کنند.

- محرک‌های شیمیایی (حلال، قدرت یونی و الکتروشیمی یا pH) که برهم‌کنش‌های بین‌مولکولی، برای مثال میان پلیمر با حلال یا بین زنجیرهای پلیمر را کم و زیاد می‌کنند.

- محرک‌های زیستی (آنزیم‌ها یا گیرنده‌ها) که عملکرد واقعی مولکول‌ها، مانند واکنش‌های آنزیمی یا تشخیص گیرنده‌های مولکول‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهند [۲].

در پاسخ به محرک‌های محیطی، پلیمرهای هوشمند ممکن است تغییرات ساختاری چشمگیر و سریعی از خود نشان دهند. به بیان دیگر، این پلیمرهای هوشمند می‌توانند اندازه، شکل یا دیگر ویژگی‌های خود را در واکنش به محرک‌های خارجی تغییر دهند. این پلیمرها با تغییر ساختار فیزیکی یا ترکیب شیمیایی خود در برابر تغییرات جزئی محیط، خود را تطبیق می‌دهند. پلیمر تطبیق‌پذیر می‌تواند ورودی خارجی را به‌عنوان علامت دریافت کرده، شدت آن را ارزیابی کرده، در پاسخ ساختار خود را تغییر دهد.

پلیمرهای پاسخ‌پذیر ممکن است از منابع طبیعی یا به‌شکل مصنوعی تولید شوند. پلیمرهای طبیعی مانند کیتوسان و آلومین می‌توانند نسبت به دما و pH پاسخ دهند. مواد دیگری مانند متیل سلولز و ژلاتین نیز خواص دما-پاسخ‌پذیر دارند. یکی از روش‌های ساخت سامانه‌های مصنوعی پاسخ‌پذیر، استفاده از پلیمر پاسخ‌گو است. روش دیگر، ترکیب پلیمر با ترکیب پاسخ‌پذیر است که در این حالت، پلیمر بیشتر نقش حامل یا الگو را برای جزء پاسخ‌دهنده ایفا می‌کند [۳].

پلیمرهای هوشمند طبق دسته‌بندی Kumar بر اساس حالت فیزیکی خود به سه دسته تقسیم می‌شوند:

۱- زنجیرهای آزاد در محلول، که پلیمر در اثر محرک می‌تواند به‌طور برگشت‌پذیر دچار فروپاشی ساختار شود.

۲- ژل‌های دارای پیوند عرضی کووالانسی و ژل‌های برگشت‌پذیر یا فیزیکی با شبکه‌های میکروسکوپی یا ماکروسکوپی که رفتار تورم آن‌ها تحت تأثیر محیط اطراف آن‌ها قرار می‌گیرد.

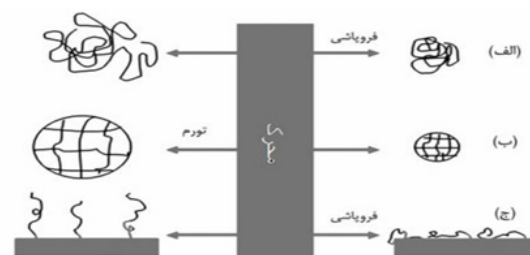
۳- حالت جذب سطحی زنجیر یا پیوندزنی به سطح، که پلیمرهای روی سطح به‌طور برگشت‌پذیر متورم شده یا فرو می‌پاشند و می‌توانند سطح مشترک را از حالت آب‌دوست به آب‌گریز و برعکس تبدیل کنند.

این تغییرات اغلب برگشت‌پذیر به سطوح انرژی در حالت‌های انتقالی مدنظر بستگی دارد. در حقیقت، تغییرات مزبور به‌طور ضمنی با حفظ ساختار اصلی شبکه در سطوح انرژی پایین‌تر از حالت تعادل اتفاق می‌افتد. با توجه به ماهیت ماده، محرک تنها به‌وسیله بخشی از ساختار مولکولی یا ابرمولکولی به‌طور

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



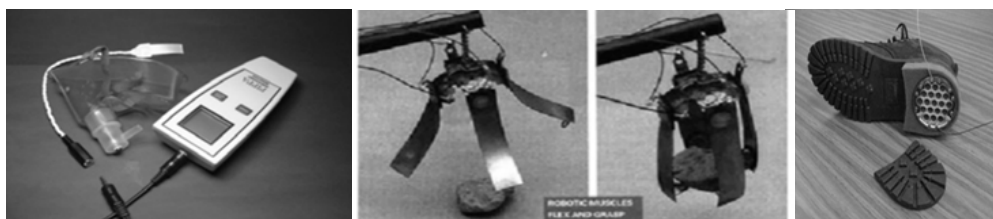
شکل ۱ سه حالت فیزیکی پلیمرهای هوشمند: (الف) زنجیر محلول، (ب) شبکه های میکرو یا ماکروسکوپی و (ج) زنجیرهای سطحی [۲].

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 القاشده 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

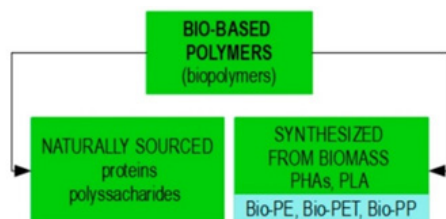


شکل ۲ نمونه کاربردهای پلیمرهای الکتروفعال: (الف) پاشنه کفش مولد انرژی الکتریکی از پلیمر پیزوالکتریک، (ب) بازوی مکانیکی از جنس پلیمر رسانا و (ج) حسگر تنفسی از جنس پلیمر پیزوالکتریک [۲].

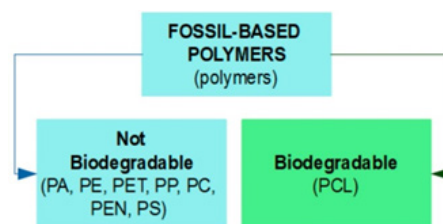
غیرزیست تخریب پذیر مزایایی مانند هزینه کم، قابلیت بازیافت، استفاده مجدد، سازگاری با محیط زیست و کاهش آلودگی در طبیعت دارند. مواد زیست تخریب پذیر نه تنها در بسته بندی مواد غذایی کاربرد دارند بلکه در زمینه زیست پزشکی و الکترونیک نیز کاربرد دارند. پلیمرهای زیست تخریب پذیر را می توان بر اساس نوع رسانایی، 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، چندی 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 شخصی‌سازی شده

تولید افزایشی (چاپ سه‌بعدی) 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

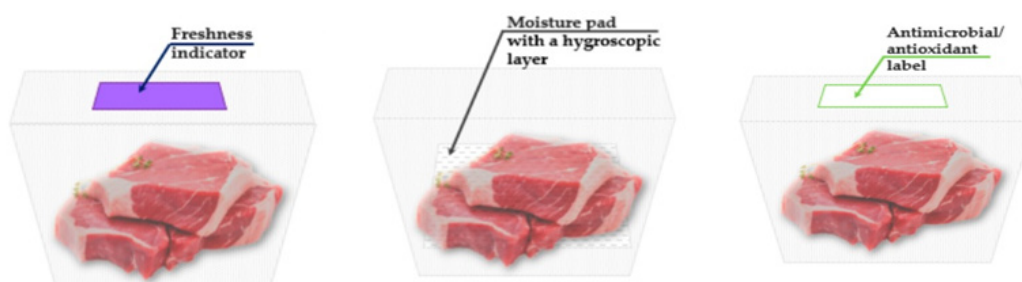
پلیمرهای الهام گرفته از طبیعت که از استخوان، غضروف یا پوست تقلید می‌کنند برای مطابقت با رفتار غیرخطی و وابسته به زمان بافت‌های طبیعی در حال بررسی هستند. ترکیب ستون فقرات زیست‌تخریب‌پذیر با قابلیت‌های خودترمیمی (به عنوان مثال، از طریق پیوند هیدروژنی، پل‌های دی‌سولفیدی یا واکنش‌های دیلز-آلدرد) می‌تواند 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 pH و TVB-N 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**.