

واژه‌های کلیدی:

پلیمر، هوشمند،
زیست‌تخریب‌پذیر،
پلیمرهای طبیعی،
پلیمرهای مصنوعی.

پلیمرهای هوشمند زیست‌تخریب‌پذیر

دنیا نمادی وثوقی*، فاطمه زین الدینی، مهرانوش محمدی
تهران، گروه دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، گروه مهندسی شیمی

چکیده ...

پلیمرهای هوشمند زیست‌تخریب‌پذیر، به‌عنوان نسل نوینی از مواد پیشرفته، به‌دلیل ترکیب منحصربه‌فرد دو ویژگی کلیدی یعنی توانایی پاسخ‌دهی به محرک‌های بیرونی و قابلیت تجزیه زیستی کنترل‌شده، توجه زیادی را در تحقیقات اخیر به خود جلب کرده‌اند. این پلیمرها به محرک‌هایی همچون تغییرات دما، pH، نور و میدان‌های مغناطیسی واکنش نشان می‌دهند و در انواع مختلفی از جمله حافظه‌دار، خودترمیم‌شونده، پیزوالکتریک و کروموزنیک توسعه یافته‌اند. مزایای چشمگیر این مواد، در زیست‌سازگاری بالا، ایمنی زیست‌محیطی و پایداری به همراه قابلیت تنظیم دقیق نرخ تخریب، آن‌ها را برای کاربردهای گسترده‌ای مناسب ساخته است. حوزه‌هایی نظیر سامانه‌های پیشرفته دارورسانی، مهندسی بافت، بسته‌بندی هوشمند مواد غذایی، حسگرهای زیستی، نانوفناوری و کشاورزی هوشمند از مهم‌ترین زمینه‌های کاربردی این پلیمرها به‌شمار می‌روند. پژوهش‌های جدید بر فناوری‌های نوظهوری همچون چاپ چهاربعدی، مواد الهام‌گرفته از طبیعت با خاصیت خودترمیمی و کاربردهای پزشکی پیشرفته تمرکز کرده‌اند. با این حال، توسعه و تجاری‌سازی این پلیمرها با چالش‌هایی نظیر هزینه بالای تولید، پیچیدگی‌های فرایند سنتز و دشواری در کنترل دقیق نرخ تجزیه روبرو است. در ایران نیز فعالیت‌هایی در زمینه تولید این مواد صورت گرفته است که نیازمند پشتیبانی فناورانه، سیاست‌گذاری‌های کارآمد و سرمایه‌گذاری هدفمند برای پیشرفت و گسترش است. این مواد با قابلیت فراوان نویدبخش آینده‌ای روشن در صنایع مختلف هستند.

*پست الکترونیکی مسئول مکاتبات:
donyavosough1384@gmail.com

۱ مقدمه

می‌کنند.

- محرک‌های شیمیایی (حلال، قدرت یونی و الکتروشیمی با 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 تحت‌تأثیر 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 علائم 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 آلبومین 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 تحت‌تأثیر محیط اطراف آن‌ها قرار می‌گیرد.
- ۳- حالت جذب سطحی زنجیر یا پیوندزنی به سطح، که پلیمرهای روی سطح به‌طور برگشت‌پذیر متورم شده یا فرو می‌باشند 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

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 منحصربه‌فرد 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 منحصربه‌فرد 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 منحصربه‌فرد 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.

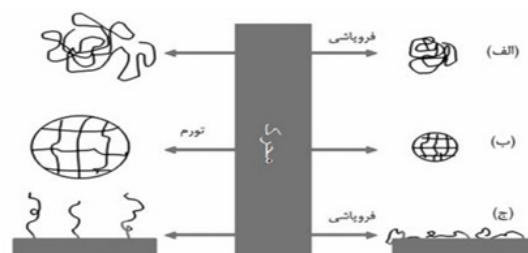
طبق دسته‌بندی Cabane و همکاران، محرک‌ها به سه دسته فیزیکی، شیمیایی و زیستی زیر تقسیم می‌شوند:

- 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

مزایای قابل توجهی نسبت به ربات‌های سفت و سخت ارائه می‌دهند. محرک‌های پلیمری الکتروفعال (EAP) در مرکز این ربات‌ها قرار دارند که امکان تغییر شکل‌های بزرگ در پاسخ به محرک‌های خارجی را فراهم می‌کنند. EAPها به‌ویژه انواع یونی و الکترونیکی، به دلیل کرنش تحریک بالا، انعطاف پذیری، ماهیت سبک و بهره‌وری انرژی مورد توجه قرار گرفته‌اند که آن‌ها را برای کاربردهایی در مکاترونیک، رباتیک و مهندسی زیست پزشکی ایده‌آل می‌کنند. پلیمرهای پیژوالکتریک مانند پلی وینیلیدین فلورید (PVDF) به دلیل انعطاف پذیری، زیست سازگاری و سهولت ساخت شناخته می‌شوند و به سنجش فشار و حس لامسه در سامانه‌های رباتیک کمک می‌کنند. پلیمرهای رسانا، با سرعت تحریک سریع و قابلیت‌های کرنش بالا، در کنار کامپوزیت‌های 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]. جذاب‌ترین جنبه پلیمرهای هوشمند در توانایی آن‌ها برای سفارشی‌سازی و حساسیت سازگار آن‌ها نهفته است. همه این محرک‌های خارجی برای پلیمرهای هوشمند به دلیل نقص اصلی خود، زمان واکنش آهسته دارند. به دلیل سازگاری پلیمری منابع و ساخت ترکیبی آن‌ها، می‌توان 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 می‌شوند. منظور از زیست تخریب پذیر، تجزیه به زیست توده و گازها (مانند CO_2 و CH_4) در حضور



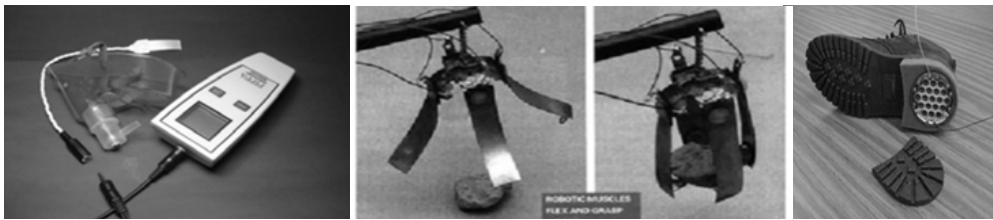
شکل ۱ سه حالت فیزیکی پلیمرهای هوشمند: (الف) زنجیر محلول، (ب) شبکه‌های میکرو یا ماکروسکوپی و (ج) زنجیرهای سطحی [۲].

جزئی جذب می‌شود. اما با جمع شدن بازتاب این پاسخ‌ها از هر بخش، پاسخ مورد نظر شدت می‌یابد و به شکل علائمی قوی مشاهده می‌شود. انتقال بین این دو حالت که در حالت اعمال انرژی مناسب اتفاق می‌افتد، می‌تواند نوآرایی بین دو حالت سیس-ترانس یا سایر تغییرات صورت بندی باشد. نوآرایی‌های 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 برنامه‌های 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]. ربات‌های نرم که از مواد تغییر شکل پذیر ساخته شده‌اند، با تقلید از بافت‌های زیستی و ارائه سازگاری، ایمنی و عملکرد در کاربردهای مختلف،

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

ویژگی‌ها	پلیمرهای هوشمند	پلیمرهای غیرهوشمند (معمولی)
پاسخ به محیط	پاسخ‌گو به محرک‌های بیرونی مانند دما، pH، نور	فاقد توانایی پاسخ به تغییرات محیطی
ساختار مولکولی	ساختار تطبیق پذیر، قابلیت تغییر در واکنش به علائم	ساختار پایدار و بدون تغییر
کاربردها	زیست مواد، پزشکی، نساجی هوشمند	بسته بندی، الیاف، ظروف پلاستیکی
رفتار مکانیکی مثال‌ها	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 شده‌اند
منبع	طبیعی یا مصنوعی، اغلب با طراحی مولکولی پیشرفته	طبیعی، مصنوعی یا نیمه مصنوعی

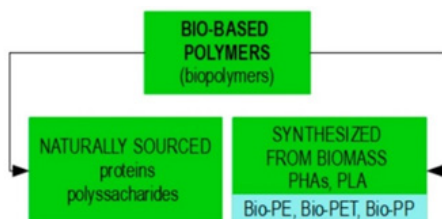


شکل ۲ نمونه کاربردهای پلیمرهای الکتروفعال: (الف) پاشنه کفش مولد انرژی الکتریکی از پلیمر پیزوالکتریک، (ب) بازوی مکانیکی از جنس پلیمر رسانا و (ج) حسگر تنفسی از جنس پلیمر پیزوالکتریک [۲].

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 آن ها 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 میکروبها (عمدتاً قارچها و باکتریها) 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 آنها 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 مولکولها، 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 انتهایی پایدار ایجاد نکنند، (ج) شامل نفوذ پذیری و فرایند پذیری 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 آنها 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

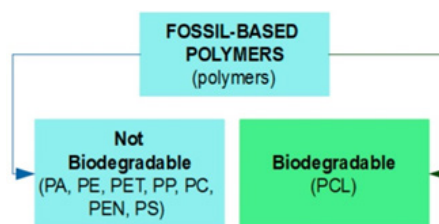


شکل ۳ پلیمرهای زیست-پایه [۸].

تغییر pH و شدت یونی محیط خارجی، متورم یا متلاشی شوند. هیدروژل‌ها دارای خواص فیزیکوشیمیایی قابل تنظیمی هستند، به‌ویژه برای خواص مکانیکی (مانند کشسانی و گرانبه‌کشسانی) که می‌تواند عملکردهای خاصی (مانند هدایت رفتار و سرنوشت سلول) را فراهم کنند. علاوه بر این، مولکول‌های داروی موجود در هیدروژل می‌توانند به دلیل تغییر حجم هیدروژل آزاد شوند. در مقایسه با مواد سنتی پاسخ‌گو به محرک، مزیت اصلی ماده زیستی پاسخ‌گو به محرک این است که می‌تواند شرایط فیزیکی و شیمیایی طبیعی را شبیه‌سازی کند و به مواد زیست‌سازگاری عالی ببخشد. بنابراین به‌طور گسترده در مواد غذایی، پزشکی، مهندسی بافت و سایر زمینه‌ها استفاده می‌شود [۱۱].

همگرایی فناوری‌های پلیمری هوشمند و زیست‌تخریب‌پذیر، پیشرفت قابل توجهی را در مهندسی بافت و پزشکی مداخله‌ای تسریع کرده است. این مواد زیستی پیشرفته، کنترل بی‌سابقه‌ای بر خواص مکانیکی، شیمیایی و زیستی ارائه می‌دهند و آن‌ها را برای داربست‌ها، سکوهای دارورسانی و دستگاه‌های قابل کاشت ایده‌آل می‌کنند. پلیمرهای هوشمند با تقلید از ماتریس خارج سلولی و پاسخ به محرک‌های فیزیولوژیکی، درمان هدفمند، بازسازی بافت و مداخلات کم‌تهاجمی را تسهیل می‌کنند. این بررسی، پیشرفت‌های اخیر در طراحی، ساخت و کاربرد بالینی سامانه‌های پلیمری را با تأکید بر نقش حیاتی آن‌ها در پزشکی شخصی، راهبردهای احیاکننده و دستگاه‌های پزشکی نسل بعدی، ترکیب می‌کند [۱۰].

بحث همگرایی پلیمرهای هوشمند و زیست‌تخریب‌پذیر، جهشی تحول‌آفرین در مهندسی زیست‌پزشکی است که عملکرد پویا، زیست‌سازگاری و تطبیق‌پذیری بالینی را ارائه می‌دهد. یکی از جذاب‌ترین پیشرفت‌ها در این حوزه، توسعه پلیمرهای حافظه‌دار شکلی (SMP) است که امکان استقرار دستگاه‌ها در پیکربندی‌های کم‌تهاجمی و فعال‌سازی درجا با استفاده از محرک‌های خارجی مانند گرما، نور و یا تغییر pH را فراهم می‌کند. در مقایسه با آلیاژهای حافظه‌دار شکلی سنتی مانند نیتینول، SMPها انعطاف‌پذیری بیشتر، تغییر شکل قابل‌بازیابی بالاتر (تا ۸۰۰٪) و قابلیت فعال‌سازی از راه دور را ارائه می‌دهند. این خواص، SMPها را به‌ویژه برای کاربردهایی مانند بخیه‌های خودسفت‌شونده و داربست‌های دارویی مناسب می‌کند. مسیرها و چشم‌اندازهای آینده همگرایی فناوری‌های پلیمری هوشمند و زیست‌تخریب‌پذیر، مهندسی پزشکی را به‌ویژه در زمینه‌های پزشکی ترمیمی، دستگاه‌های کم‌تهاجمی و درمان‌های شخصی‌سازی‌شده متحول خواهد کرد. در حالی که پیشرفت‌های قابل توجهی حاصل شده است، چندین مسیر برای



شکل ۴ پلیمرهای فسیل-پایه [۸].

بسته‌بندی زیست‌تخریب‌پذیر توجه فزاینده‌ای را به خود جلب کرده است. پلیمرهای زیست‌تخریب‌پذیر به‌عنوان ماتریس‌های قابل کاشت برای آزادسازی کنترل‌شده داروها در داخل بدن یا به‌عنوان بخیه‌های قابل جذب استفاده می‌شوند [۶].

۳ پلیمر هوشمند زیست‌تخریب‌پذیر

در سال‌های اخیر، پیشرفت‌های چشم‌گیری در توسعه پلیمرهای زیست‌تخریب‌پذیر هوشمند توسط پژوهشگران سراسر جهان حاصل شده است. پلیمرهای حافظه‌دار، خودترمیم‌شونده، پیزوالکتریک، کروموزنیک و الاستومرهای مغناطیسی-رئولوژیکی از دسته‌های شناخته‌شده پلیمرهای زیست‌تخریب‌پذیر هوشمند هستند. در میان آن‌ها، پلیمرهای پیزوالکتریک بیشترین تقاضا را در بازار دارند. پلی‌لاکتیک‌اسید (PLA) رایج‌ترین ماتریس پلیمری است که در ساخت پلیمرهای زیست‌تخریب‌پذیر هوشمند به کار رفته است. فنون اصلاح شامل هم‌پلیمرشدن، آمیخته‌سازی و ساخت کامپوزیت هستند. پلیمرهای حافظه‌دار (SMPs) در دو روش اول (هم‌پلیمرشدن و آمیخته‌سازی) غالب بودند، در حالی که روش سوم (ساخت کامپوزیت) برای تمامی مواد هوشمند مناسب بود [۹].

کاربردهای پلیمر هوشمند زیست‌تخریب‌پذیر

پیشرفت‌های اخیر در علم پلیمر، به‌ویژه از طریق توسعه پلیمرهای زیست‌تخریب‌پذیر و هوشمند، باعث ایجاد تغییر دگرگون‌کننده در مهندسی زیست‌پزشکی شده است. هم‌افزایی بین پلیمرهای طبیعی و مصنوعی که توسط فناوری نانو و تولید افزایشی تقویت شده است امکان ایجاد داربست‌های هوشمند و دستگاه‌های قابل کاشت متناسب با نیازهای بالینی خاص را فراهم می‌کند [۱۰]. ماده پاسخ‌دهنده به محرک به نوعی از ماده اشاره دارد که خواص فیزیکی و شیمیایی آن می‌تواند با قرار گرفتن در معرض علائم خارجی تغییر کند. برای دستیابی به عملکردهای خاص، انواع مواد زیستی پاسخ‌دهنده به محرک تهیه می‌شوند. به‌عنوان مثال، کیتوزان به دلیل پروتونه‌شدن و پروتون‌زدایی انتهای آمین خود به pH پاسخ می‌دهد. هیدروژل‌های کیتوزان می‌توانند با

تحقیقات و نوآوری‌های آینده باز است:

۵. بهبود کاربرد بالینی

با وجود داده‌های آزمایشگاهی قوی، تعداد کمی از پلیمرهای هوشمند زیست‌تخریب‌پذیر به کاربرد بالینی رسیده‌اند. تلاش‌های آینده باید بر مطالعات زیست‌سازگاری بلندمدت، استانداردهای 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]. با وجود توسعه سریع الاستومرهای بخیه برای رفع نیازهای جراحی عملی، استفاده از عملکرد خودترمیمی الاستومرها به‌عنوان 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) به‌عنوان آغازگر سنتز شد که خواص مکانیکی عالی، خودترمیمی بسیار کارآمد و رفتار حافظه‌شکلی قابل‌توجهی 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 به‌دست‌آمده بازیابی شد. نتایج آزمایش‌های زیست‌سازگاری نشان می‌دهد که این پلیمرها زیست‌سازگاری عالی دارند و می‌توانند به‌عنوان مواد زیست‌پزشکی خوب در نظر گرفته شوند. سپس آزمایش‌های درون‌تنی (In-Vivo) برای اثبات توانایی خودترمیمی پلیمرها در گره‌زدن و بستن سریع سطح زخم با استفاده از شکل برنامه‌ریزی‌شده در دمای فیزیولوژیکی انجام شد. نتایج نشان داد که زخم ناشی از جراحی می‌تواند در مقایسه با بخیه‌های سنتی به‌طور موثری بهبود یابد، که این امر پیشنهادهاى مطالعاتی جدیدی را برای نواحی بهبودیافته بعدی ارائه می‌دهد [۱۲].

به‌دلیل اهمیت بسته‌بندی ایمن مواد غذایی، محققان و تولیدکنندگان به دنبال راه‌کارهای 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 به‌دلیل عدم تولید آلودگی در محیط زیست، از اهمیت زیادی برخوردار هستند. در آزمایش‌های انجام‌شده توسط پژوهشگران در ابتدا خمیر کاغذ خشک اکالیپتوس با استفاده از آسیاب دیسکی ماسکو به ریز لیفجه‌های سلولزی سلولز تبدیل شد. برای تهیه ژل ریز لیفجه‌های سلولزی سلولز / عصاره گیاهی، محلول عصاره یربامات به میزان ۱۰ و ۲۰ درصد (حجمی / حجمی) به جای آب

۱. چندمنظوره‌بودن از طریق ادغام مواد

مواد آینده به‌طور فزاینده‌ای چندین کارکرد مانند حافظه‌شکلی، رسانایی، فعالیت ضد میکروبی و تخریب کنترل‌شده را در سکویی واحد ترکیب خواهند کرد. به‌عنوان مثال، پلیمرهای حافظه‌شکلی (SMPS) با محرک‌های نورگرمایی یا مغناطیس گرمایی یکپارچه می‌توانند تحریک از راه دور را بدون نیاز به روش‌های تهاجمی امکان‌پذیر کنند. به‌طور 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. به‌عنوان مثال، پلیمرهای پاسخگو به ROS یا MMP برای کاربردهایی در درمان سرطان و بهبود زخم در حال بررسی هستند.

۳. چاپ چهاربعدی و کاشتینه‌های شخصی‌سازی‌شده

تولید افزایشی (چاپ سه‌بعدی) به چاپ چهاربعدی تکامل خواهد یافت، جایی که پلیمرهای هوشمند به‌صورت 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 الهام‌گرفته از زیست و خودترمیم‌شونده

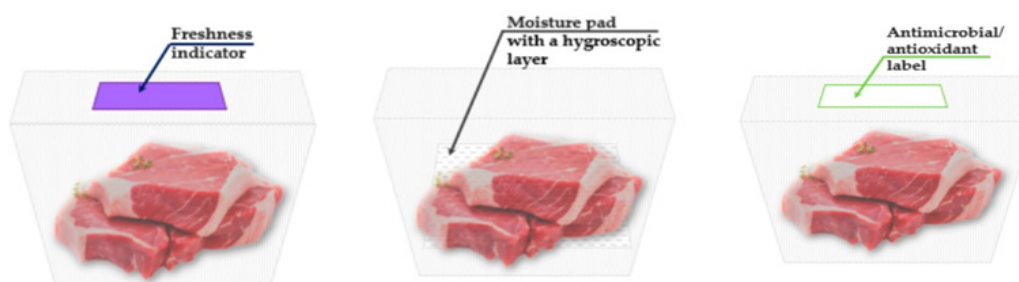
پلیمرهای الهام‌گرفته از طبیعت که از استخوان، غضروف یا پوست تقلید می‌کنند برای مطابقت با رفتار غیرخطی و وابسته به زمان بافت‌های طبیعی در حال بررسی هستند. ترکیب ستون فقرات زیست‌تخریب‌پذیر با قابلیت‌های خودترمیمی (به‌عنوان مثال، از طریق پیوند هیدروژنی، پل‌های دی‌سولفیدی یا واکنش‌های دیلز-آلدر) می‌تواند 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، آزمون‌های pH، TVB-N و رنگ‌سنجی فیلم‌ها 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 بی‌رنگ است و با گذشت زمان نگهداری و پیشروی فساد در فیلم‌های بسته‌بندی شده و رسیدن فاکتورهای TVB-N و pH به میزان بیشتر از حد مجاز، رنگ فیلم دودی تیره می‌شود. این امر مصرف‌کننده را از کیفیت و تازگی ماهی بسته‌بندی شده مطلع می‌سازد. بنابراین می‌توان از فیلم کاراژینان حاوی عصاره کلم به عنوان نشانگر با شاخص فساد ماهی و سایر غذاهای گوشتی با ارزش اقتصادی بالا استفاده کرد [۱۴].

بسته‌بندی هوشمند، به عنوان فناوری نسل بعدی، به عنوان پاسخی به نگرانی‌های روزافزون مصرف‌کنندگان توسعه یافته است. با این حال مصرف گسترده پلاستیک‌های مشتق شده از نفت به دلیل مشکلات زیست‌محیطی در تولید این بسته‌بندی‌ها به نگرانی جهانی تبدیل شده است. بنابراین علاقه روزافزونی به استفاده از مواد بسته‌بندی زیست تخریب پذیر و خوراکی (مانند پروتئین‌ها، پلی ساکاریدها و لیپیدها) به عنوان مواد خام حاصل از منابع طبیعی ایجاد شده است. بنابراین سامانه‌های بسته‌بندی هوشمند مجهز به شاخص‌های رنگ‌سنجی مبتنی بر رنگ‌های 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 بسته‌بندی مورد توجه قرار گرفته‌اند. بر همین اساس بسته‌بندی هوشمند همراه با رنگ‌های طبیعی، ویژگی‌های کیفی غذاها از جمله رشد میکروبی، تازگی و تغییرات شیمیایی در محصول را از طریق تغییرات بصری ناشی از تغییرات pH در غذا نظارت می‌کند که ارزیابی سریع و قابل اعتمادی را از ایمنی و کیفیت مواد غذایی، ارائه می‌دهد [۱۵].

به خمیر خشک اکالیپتوس افزوده و از آسیاب ماسکو عبور داده شد. از گلیسرول نیز به عنوان عامل نرم‌کننده به میزان ۳۷ درصد وزن خشک خمیر استفاده شد. سپس فیلم‌ها با ترکیبات مختلف با استفاده از روش قالب‌گیری تهیه شدند و با طیف‌سنجی تبدیل فوریه فروسرخ (FTIR) مورد بررسی قرار گرفتند. همچنین مقاومت کششی فیلم‌ها نیز مورد ارزیابی قرار گرفت. آزمون زیست تخریب پذیری نیز با استفاده از روش دفن در خاک انجام شد. در پایان، هوشمندی فیلم‌ها با استفاده از محلول بافر از pH یک تا سیزده، مورد سنجش قرار گرفت. نتایج این تحقیق نشان داد که فیلم‌های حاصل کاملاً دوستدار محیط زیست هستند و پس از حدود یک ماه تقریباً به طور کامل از بین می‌روند. فیلم‌های حاوی عصاره به دلیل وجود مواد ضد میکروب در آن، کمی دیرتر تخریب می‌شوند. نتایج آزمون هوشمندی فیلم‌ها نیز نشان داد که می‌توان از عصاره بریامات به عنوان عامل نشانگر در تعیین فساد مواد غذایی در بسته‌بندی استفاده کرد [۱۳].

ماهی و سایر غذاهای دریایی دارای فواید بسیاری برای سلامتی انسان‌ها هستند و از سوی دیگر سرعت فساد آن نسبت به سایر غذاهای گوشتی بالاست. بدین منظور برای عرضه ماهی با کیفیت به مصرف‌کننده، بسته‌بندی مطلوب الزامی به نظر می‌رسد و هدف تولید پلیمری برای بسته‌بندی مواد غذایی (خصوصاً گوشتی) است که بتواند مصرف‌کننده را با تغییر رنگ خود از فساد ماده غذایی مطلع کند و علاوه بر آن زیست تخریب پذیر نیز باشد. به این منظور فیلم‌های زیست تخریب پذیر بر پایه کاراژینان در ترکیب با عصاره کلم قرمز (*Oleraceae Brassica*) تهیه شد. پس از تولید فیلم‌های مذکور خواص کاربردی آن‌ها 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 فیلم‌ها، فیلم‌های ماهی قزل‌آلا رنگین کمان (Onco-rhynchus Mykiss) با استفاده از فیلم‌های تهیه شده بسته‌بندی



شکل ۵ سامانه‌های بسته‌بندی 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 پلیمری شدن کنترل‌شده از جمله روش‌های PDRP، ATRP، RAFT و روش‌های القای نوری را با تأکید بر سنتز بی‌خطر برای محیط‌زیست از طریق حلال‌های سبز و مسیره‌های 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 قابل توجهی 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 پلیمرحافظه‌شکلی 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

دیگر محدودیت‌های آن به‌شمار می‌روند. در ایران نیز فعالیت برخی شرکت‌ها مانند پادنا، پیشگامان گیتی سبز و زیست پلیمر نشان‌دهنده گام‌های اولیه در زمینه تولید این مواد و فیلم‌های زیست تخریب پذیر است که می‌تواند به کاهش هزینه‌ها، اشتغال‌زایی و حرکت در مسیر فناوری‌های سبز کمک کند. با این حال، چالش‌هایی همچون نیاز به سرمایه‌گذاری در تحقیق و توسعه، فراهم‌سازی زیرساخت‌های نوین، استانداردسازی و تضمین مقرون‌به‌صرفه بودن همچنان وجود دارد. از این رو موفقیت تجاری و صنعتی‌سازی این فناوری در ایران وابسته به حمایت‌های سازمانی، ارتقای فناوری و سرمایه‌گذاری‌های گسترده است. در مجموع، پلیمرهای هوشمند زیست تخریب پذیر موادی بسیار امیدبخش برای توسعه پایدار، حفاظت محیط زیست و کاربردهای پیشرفته پزشکی به‌شمار می‌آیند، اما رفع موانع موجود و بهبود مسیر انتقال از تحقیقات آزمایشگاهی به صنعت، شرط دستیابی به جایگاهی پایدار و سودآور در آینده خواهد بود.

ترکیبی از قابلیت پاسخ‌گویی به محرک‌های محیطی مانند دما، نور و رطوبت و همچنین توانایی تجزیه زیستی کنترل‌شده را در اختیار دارند. چنین ویژگی‌هایی موجب شده است تا در حوزه‌هایی نظیر پزشکی، بسته‌بندی هوشمند، دارورسانی، کشاورزی نوین و مهندسی بافت کاربرد گسترده‌ای 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 داربست‌های پزشکی، توسعه حسگرها و سامانه‌های دارورسانی ایفا می‌کنند. استفاده از نشانگرهای تغییر رنگ در بسته‌بندی مواد غذایی نیز از جمله مزایای عملی این پلیمرها به‌شمار می‌رود. با این وجود، کنترل دقیق نرخ تخریب همواره با چالش‌هایی همراه است و گاهی این فرایند سریع‌تر یا کندتر از حد مطلوب رخ می‌دهد. همچنین نیاز به افزایش مقاومت مکانیکی، اطمینان از زیست‌سازگاری بلندمدت، هزینه‌های بالای تولید و پیچیدگی فرایند سنتز از

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 Esfehlan F., Ali Nezhad Z., Rezaei Shirinabadi A., and Mahdavian A., Smart Polymers: Introduction and Application (Persian), *Basparesh*, 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**.