Biodegradable polymers

Zeinab Amanollahnejad Kalkhoran[1], **Alireza Shahab Lavasani[2]***, Maryam Mousavi[1], Mohammad Rasouli[3]

1. Department of Food Science and Technology, Faculty of Biological Sciences, North Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.
2. Department of Food Science and Technology, VaP.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran
3. Department of Plant Breeding, Tak. C., Islamic Azad University, Takestan, Iran

Received Date:2026.05.22 Accepted Date:2026.10.27

Abstract

Amidst growing environmental concerns stemming from non-biodegradable plastics, there has been a significant surge in interest towards producing biodegradable polymers through methods such as chemical treatment, and the utilization of microorganisms and enzymes. These polymers hold substantial potential for mitigating adverse environmental impacts by facilitating safe disposal after their end-of-life. Chemical recycling is one of the most promising technologies that could contribute to circular economy targets by providing solutions to plastic waste; however, it is still at an early stage of development. Furthermore, innovative approaches to enhance barrier properties for food packaging applications and the role of Life Cycle Assessment (LCA) in elucidating environmental benefits have undergone critical discussion and review. Despite considerable advancements, fundamental challenges, including limitations in mechanical performance, industrial scalability, and ensuring degradation efficacy under real-world environmental conditions, continue to represent key obstacles in fully realizing the potential of these materials. Although offering environmental advantages, the development and widespread application of biodegradable polymers face several challenges. Beyond reducing reliance on fossil fuels, these materials play a significant role in waste management and the development of a circular economy. However, their environmental compatibility, particularly within composting processes, has attracted considerable scientific and industrial attention.

Keywords: Biodegradable polymers, Chemical degradation, Microorganisms, Circular economy, Environmental sustainability

* alireza_shahablavasani@iau.ac.ir

[Downloaded from amfi.ir on 2026-11-07]

EXTENDED ABSTRACT

Introduction: The increasing accumulation of non-biodegradable plastic waste has intensified interest in biodegradable polymers as potential alternatives to conventional plastics. These materials can be derived from renewable biological resources or produced through synthetic processes and offer potential environmental and industrial benefits. Their applications include food packaging, agriculture, medicine, and cosmetics. However, their environmental performance depends on their composition, functional properties, degradation conditions, and end-of-life management.

Objective: This review aims to summarize the main sources, production methods, physicochemical properties, degradation mechanisms, and applications of biodegradable polymers, with particular emphasis on their potential role in sustainable food packaging and environmental protection.

Materials and Methods: A narrative literature review was conducted using Google Scholar and ScienceDirect to identify relevant publications considered between April 2025 and April 2026. The review focused on the sources, production methods, physicochemical properties, degradation behavior, and applications of biodegradable polymers, including starch, cellulose and its derivatives, soybean-derived materials, polyhydroxyalkanoates (PHAs), polylactic acid (PLA), and polycaprolactone (PCL). Polymer blending, chemical recycling, food-packaging applications, and environmental sustainability were also considered.

Results: Biodegradable polymers exhibit diverse properties and potential applications. Starch and cellulose are attractive because of their availability and potential use in packaging materials, while soybean-derived biopolymers provide renewable alternatives for selected applications. PHAs offer biodegradability and useful functional properties, whereas PLA and PCL have distinct thermal, mechanical, and processing characteristics. Agricultural wastes represent valuable feedstocks for producing biopolymers and related additives, potentially supporting waste valorization and resource efficiency. In food packaging, these materials can be used in primary packaging, edible coatings, and active and smart packaging systems. Nevertheless, limitations related to mechanical strength, moisture and gas barrier properties, production costs, and industrial scalability remain important challenges. Polymer blending and material modification may improve performance, while chemical recycling can provide additional opportunities for material recovery. Life-cycle assessment and evaluation under appropriate degradation or composting conditions are essential to determine whether these materials deliver genuine environmental benefits.

[Downloaded from amfi.ir on 2026-11-07]

پلیمرهای زیست تخریب‌پذیر

زینب امان اله نژاد کلخوران[۱]، **علیرضا شهاب لواسانی[۲]***، مریم موسوی[۱]، محمد رسولی[۳]

۱. گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده علوم زیستی، واحد تهران شمال، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

۲. گروه علوم و صنایع غذایی، واحد ورامین-پیشوا، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۳. گروه اصلاح نباتات، واحد تاکستان، دانشگاه آزاد اسلامی، تاکستان، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۳/۰۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۸/۰۵

چکیده

با توجه به نگرانی‌های فزاینده زیست‌محیطی ناشی از پلاستیک‌های غیرقابل تجزیه، علاقه به تولید پلیمرهای زیست‌تخریب‌پذیر از طریق روش‌هایی نظیر تصفیه شیمیایی، استفاده از میکروارگانیسم‌ها و آنزیم‌ها به طور چشمگیری افزایش یافته است. این پلیمرها با هدف تسهیل دفع ایمن پس از پایان عمر مفید، پتانسیل بالایی برای کاهش اثرات مخرب زیست‌محیطی دارند. . در سال‌های اخیر، بازیافت شیمیایی به‌عنوان یکی از امیدوارکننده‌ترین فناوری‌ها برای تحقق اهداف اقتصاد چرخشی مطرح شده است، زیرا می‌تواند راهکارهایی برای مدیریت پسماندهای پلاستیکی ارائه دهد؛ با این حال، این فناوری همچنان در مراحل اولیه توسعه قرار دارد. همچنین، رویکردهای نوین در بهبود خواص ممانعت کنندگی (Barrier properties) برای کاربرد در بسته‌بندی مواد غذایی و نقش ارزیابی چرخه عمر (LCA) در تبیین مزایای زیست‌محیطی مورد بحث و بررسی انتقادی قرار گرفته‌اند. علی‌رغم پیشرفت‌های قابل‌توجه، چالش‌های اساسی همچون محدودیت‌های عملکرد مکانیکی، مقیاس‌پذیری صنعتی و اطمینان از کارایی تخریب در شرایط واقعی محیطی همچنان موانع کلیدی در تحقق پتانسیل کامل این مواد محسوب می‌شوند. علی‌رغم مزایای زیست‌محیطی، توسعه و کاربرد گسترده پلیمرهای زیست‌تخریب‌پذیر با چالش‌هایی روبرو است. این مواد علاوه بر کاهش وابستگی به منابع فسیلی، در مدیریت پسماند و توسعه اقتصاد چرخشی نقش مهمی ایفا می‌کنند. با این حال، سازگاری آن‌ها با محیط زیست، به‌ویژه در فرآیندهای کمپوست، موضوع توجهات علمی و صنعتی قابل توجهی را به خود جلب کرده است.

کلمات کلیدی: پلیمرهای زیست‌تخریب‌پذیر، تجزیه شیمیایی، میکروارگانیسم‌ها، اقتصاد چرخشی، چرخه عمر (LCA)، پایداری زیست محیطی

* alireza_shahablavasani@iau.ac.ir

[Downloaded from amfi.ir on 2026-11-07]

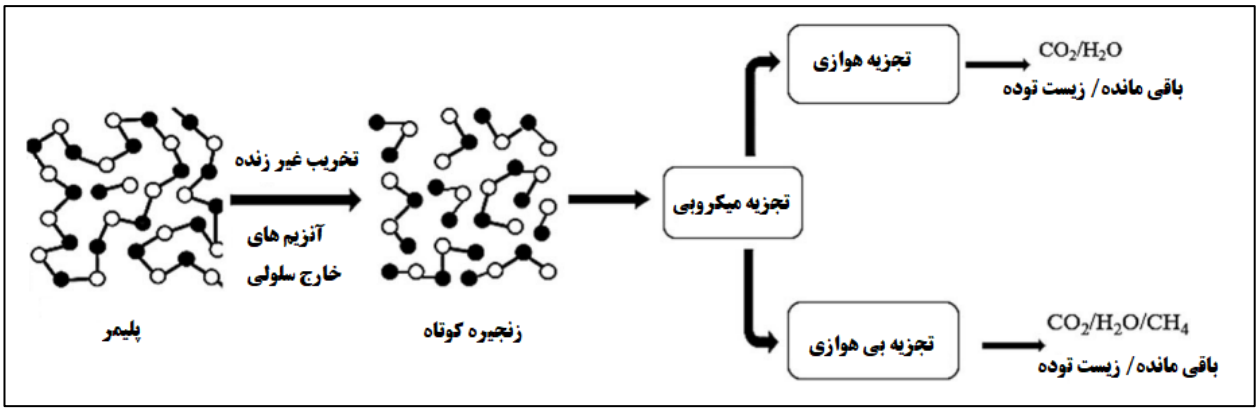
مقدمه

پلیمرهای زیست‌تخریب‌پذیر به عنوان جایگزین‌های پایدار برای مواد پلیمری سنتی و غیرقابل تجزیه زیستی در حال توسعه و به‌کارگیری در طیف وسیعی از کاربردها هستند. با توجه به چالش‌های مدیریتی پسماندهای پلاستیکی تجزیه‌ناپذیر، استفاده از پلیمرهای زیست‌تخریب‌پذیر که سازگاری بالایی با محیط زیست دارند، یک راهکار اقتصادی و زیست‌محیطی مطلوب محسوب می‌شود. افزایش روزافزون آلودگی‌های زیست‌محیطی ناشی از مواد تجزیه‌ناپذیر، انگیزه پژوهش‌ها و توسعه‌ها در زمینه مواد زیست‌تخریب‌پذیر را دوچندان کرده است (۱). این پلیمرها می‌توانند از منابع تجدیدپذیر متنوعی از جمله ضایعات کشاورزی، مواد غذایی، منابع سلولزی و نشاسته تولید شوند. پلاستیک‌های زیستی حاصل از منابع تجدیدپذیر، اغلب از نظر اقتصادی مقرون‌به‌صرفه‌تر از انواع تولید شده از منابع میکروبی هستند، که این امر تولیدکنندگان را به سمت بهره‌برداری از منابع تجدیدپذیر سوق می‌دهد (۲) .

کاربرد پلیمرهای زیست تخریب پذیر مزایای متعددی از جمله احیای مواد خام، قابلیت تجزیه زیستی کامل و کاهش انتشار دی‌اکسید کربن (CO_2) را به همراه دارد که به نوبه خود در مقابله با پدیده گرمایش جهانی مؤثر است. تجزیه این پلیمرها توسط میکروارگانیسم‌هایی نظیر باکتری‌ها و قارچ‌ها به ترکیبات ساده‌تری مانند آب (H_2O)، دی‌اکسید کربن (CO_2) و متان (CH_4) صورت می‌گیرد. فرایند تجزیه زیستی تحت تأثیر عوامل متعددی از جمله ساختار مولکولی، مورفولوژی، وزن مولکولی پلیمر، و همچنین تیمارهای شیمیایی و تابشی قرار دارد (۳).

به پلیمرهای زیست تخریب پذیر بیوپلیمر نیز گفته می‌شود. به طور کلی، دو دلیل عمده برای توجه به پلیمرهای حاصل از منابع تجدیدپذیر وجود دارد: اول، نگرانی‌های زیست‌محیطی مرتبط با انباشت زباله‌های پلاستیکی و انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از سوزاندن آن‌ها؛ و دوم، محدودیت منابع فسیلی و پایان‌پذیر بودن آن‌ها (۲).

فرایند تجزیه زیستی پلیمرها، که در شکل ۱ نشان داده شده است، شامل دو مرحله اصلی است. در مرحله اول، آنزیم‌های خارج سلولی و عوامل غیرزیستی مانند اکسیداسیون، فتولیز و هیدرولیز، زنجیره‌های پلیمری بلند را به الیگومرهای کوتاه‌تر تجزیه می‌کنند. مرحله دوم شامل فرایند کانی‌سازی زیستی است، که در آن الیگومرها توسط میکروارگانیسم‌ها جذب شده و سپس به ترکیبات معدنی تبدیل می‌شوند. این تجزیه می‌تواند به صورت هوازی (در حضور اکسیژن) با تولید CO_2، H_2O، زیست‌توده و باقیمانده، یا به صورت بی‌هوازی (در غیاب اکسیژن) با تولید CO_2، H_2O، CH_4، زیست‌توده و باقیمانده صورت پذیرد (۴).



شکل ۱- مراحل تجزیه زیستی پلیمرها (٤)

[Downloaded from amfi.ir on 2026-11-07]

در حالت کلی پلیمرهای سنتزی به ویژه پلی استیرن، پلی اتیلن و پلی پروپیلن از لحاظ ساختاری پایدار هستند و تخریب آنها در محیط زیست مشکل است (۵).دلیل این امر ساختار هیدروکربنی و وزن مولکولی بالای این پلیمرها است که مانع از تخریب آنها توسط آنزیمهای موجود در محیط زیست شده و تجدیدپذیری آنها را بسیار دشوار کرده است (۶).

معایب اصلی پلیمرهای مصنوعی، فرآیند تجزیه طولانی و تولید مبتنی بر مواد اولیه تجدیدناپذیر است .طبق تخمین کارشناسان، تا ۷ درصد از ذخایر نفت و گاز جهان برای تولید پلیمرها استفاده می‌شود. یک گزینه جایگزین، پلیمرهایی هستند که زیست تخریب‌پذیر بوده یا از منابع تجدیدپذیر ساخته می‌شوند(۷). بنابراین، تولید و استفاده از مواد پلیمری زیست‌پایه و زیست‌تخریب‌پذیر به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد و در نتیجه می‌تواند به کاهش مشکلات زیست‌محیطی مربوط به مواد پلیمری زائد کمک کند. تحقیقات در مورد منابع تجدیدپذیر بر استفاده از ذرت، سویا، نیشکر، سیب‌زمینی، برنج یا گندم و دانه‌های غنی از روغن یا محصولات تخمیری به عنوان مواد اولیه برای تولید مواد بیوپلیمری متمرکز شده است استفاده از زیست‌توده برای تولید بیوپلیمرها مزیت بزرگی دارد، زیرا پلیمرهای مشتق شده از زیست‌توده زیست‌تخریب‌پذیر هستند و بازیافت آنها نسبتاً آسان است. یکی از معایب اصلی پلیمرهای زیست تخریب‌پذیر حاصل از منابع تجدیدپذیر، سرعت بالای تخریب است که به دلیل ویژگی غالب آب‌دوستی آنها و در برخی موارد، خواص مکانیکی ناکافی، به ویژه در محیط‌های مرطوب است .با وجود این معایب، پلیمرهای زیست تخریب‌پذیر طیف گسترده‌ای از مزایا را ارائه می‌دهند، زیرا از بسیاری از مواد گیاهی برای ساخت آنها استفاده می‌شود . این بدان معناست که دیگر نیازی به استفاده از پرکننده‌های شیمیایی موجود در محصولات پلاستیکی مصنوعی نیست . علاوه بر این، در طول چرخه تولید پلاستیک‌های زیست تخریب‌پذیر، مصرف انرژی کاهش می‌یابد در حالی که تجزیه منجر به انتشار غیرضروری CO_2 به محیط زیست نمی‌شود(۷). استفاده از محصولات زیست تخریب‌پذیر می‌تواند وابستگی به سوخت‌های فسیلی را کاهش دهد و در نتیجه به ایجاد محیطی پاک‌تر کمک کند و بنابراین تحقیقات بیشتری در زمینه پلیمرهای جدید زیست تخریب‌پذیر و خواص بهبود یافته آنها انجام می‌شود.

روشهای مختلفی برای حل این مساله ارائه شده است که بهترین آنها اصلاح پلیمرهای سنتزی و جایگزینی آنها با پلیمرهای زیست تخریب پذیر مانند سلولز و نشاسته هستند (۸). در این میان، آمیخته سازی یا اضافه کردن یک پلیمر زیست تخریب پذیر به درون ماتریس پلیمر سنتزی مانند پلی استیرن یکی از مؤثرترین روشها است زیرا باعث زیست تخریب پذیری مناسب محصول نهایی میگردد (۹).

تقسیم‌بندی پلیمرهای زیست‌تخریب‌پذیر

پلیمرهای زیست تخریب پذیر را می‌توان بر اساس منشاء و روش سنتز، ترکیب شیمیایی، اهمیت اقتصادی، روش فرآوری و کاربردها تقسیم‌بندی کرد. از نظر منشاء تولید بیوپلیمرها به دو گروه بیوپلیمرهای طبیعی و بیوپلیمرهای مصنوعی که به ترتیب از منابع طبیعی و نفت ساخته می‌شوند، تقسیم می‌شوند. پلیمرهای زیستی طبیعی از منابع تجدیدپذیر یا بیولوژیکی مانند منابع حیوانی، گیاهی، دریایی و میکروبی مشتق می‌شوند، درحالیکه پلیمرهای زیست تخریب‌پذیر مصنوعی به صورت شیمیایی تولید می‌شوند (۱۰).

پلیمرهای زیست‌تخریب‌پذیر طبیعی

تمام چرخه‌های رشد موجودات منجر به تشکیل پلیمرهای زیستی در طبیعت می‌شود. واکنش‌های پلیمریزاسیون با زنجیره‌ای از رشد کاتالیز شده توسط آنزیم از مونومرهای فعال تولید شده در سلول‌ها از طریق فرآیندهای متابولیکی پیچیده در تولید آن گنجانده شده است. آن‌ها به طور طبیعی زیست تخریب پذیر هستند و زیست سازگاری خوبی دارند (۱۱). ضایعات کشاورزی منبع اصلی برای تولید پلاستیک‌های زیستی، نرم کننده‌ها و افزودنی‌های آنتی‌اکسیدانی هستند. منبع اصلی پلی‌ساکاریدها ضایعات کشاورزی مبتنی بر گیاه است که در آن بیوپلیمرهایی مانند سلولز، نشاسته و پکتین تولید می‌شوند. استفاده از ضایعات کشاورزی به عنوان ماده اولیه برای سنتز پلیمرهای زیست تخریب‌پذیر می‌تواند هم هزینه تولید پلیمرهای زیست

[Downloaded from amfi.ir on 2026-11-07]

تخریب‌پذیر و هم هزینه تصفیه زباله را کاهش دهد. بیوپلیمرها از روش‌های میکروبی، اختلاط بیوپلیمرها و روش‌های شیمیایی تولید می شوند (۱۲). بیوپلیمرهای تولید شده از ضایعات گیاهان کشاورزی دارای قابلیت تجزیه زیستی، زیست عملکردی، زیست پایداری و زیست سازگاری هستند. آن‌ها دارای طیف گسترده‌ای از خواص شیمیایی و مکانیکی هستند که ممکن است در کاربردهای مختلف مانند بسته‌بندی مواد غذایی، کاربردهای زیست پزشکی، مراقبت از پوست، الکترونیک الکتریکی، وسایل نقلیه و تصفیه فاضلاب مورد استفاده قرار گیرند (۱۱).

پلیمرهای زیست‌تخریب‌پذیر مصنوعی

پلیمرهای زیست تخریب‌پذیر مصنوعی با روش‌های پلیمریزاسیون مرسوم مانند پلی‌استرهای آلیفاتیک، پلی‌لاکتید، کوپلیمر آلیفاتیک تولید می‌شوند. با توجه به زمان تخریب مناسب و تولید آن‌ها در مقیاس صنعتی، پلی‌استرهای تجزیه پذیر به عنوان بالقوه‌ترین مواد مورد استفاده در مقایسه با پلاستیک‌های معمولی در نظر گرفته می‌شوند. آن‌ها به اشکال مختلفی مانند پلی‌لاکتیک اسید، پلی‌کاپرولاکتون و پلی‌بوتیلن سوکسینات تولید می‌شوند. این گروه آلودگی اکولوژیکی کمی دارند. بیش از ۹۰ درصد از پلیمرهای زیستی پلی‌استر هستند زیرا حاوی پیوندهای استرهای قابل هیدرولیز هستند. پلیمرهای زیست تخریب پذیر مصنوعی ممکن است به پلیمرهای زیستی مانند پلی‌لاکتیک اسید و مونومرهای مبتنی بر روغن مانند پلی‌کاپرولاکتون طبقه‌بندی شوند (۱۳).

بیوپلاستیک - پلیمرهای زیست تخریب پذیر

مواد بیوپلاستیک خانواده‌ای از مواد با خواص و کاربردهای مختلف هستند که می‌توانند زیستی، زیست تخریب پذیر یا هر دو باشند .پلاستیک‌های زیست تخریب پذیر از منابع تجدیدپذیر یا تجدیدناپذیر ساخته می‌شوند که از طریق یک فرآیند ترموشیمیایی به طور کامل در محیط زیست به CO_2 ، متان، آب، زیست توده و ترکیبات معدنی تجزیه می‌شوند که میکروارگانیسم‌ها می‌توانند به راحتی آنها را معدنی کنند. در حالی که پلیمرهای زیستی حاوی کربن آلی از مواد اولیه تجدیدپذیر هستند و لزوماً زیست تخریب پذیر نیستند .علاوه بر این، پلیمر زیستی را می‌توان از مواد طبیعی و همچنین از مواد طبیعی که با روش‌های شیمیایی و/یا بیولوژیکی به مواد با وزن مولکولی بالا پلیمریزه شده‌اند، سنتز کرد. مواد زیستی ساختار مولکولی مشابهی با پلیمرهای پتروشیمی دارند .مهم‌تر از همه، زیست‌تخریب‌پذیری مواد پلاستیکی به ساختار شیمیایی آنها بستگی دارد و نه به منبع کربن پلیمر. طبق پیش‌بینی ، ظرفیت تولید جهانی بیوپلاستیک‌ها از حدود ۲ میلیون تن در سال ۲۰۱۸ به تقریباً ۲/۶ میلیون تن در سال ۲۰۲۳ افزایش خواهد یافت. در حال حاضر، بیوپلاستیک‌ها حدود ۱٪ از ۳۳۵ میلیون تن پلاستیک تولید شده سالانه را تشکیل می‌دهند .بیوپلاستیک‌ها یک صنعت رو به رشد و نوآورانه هستند که راه‌حل‌هایی برای اقتصاد پایدار پلاستیک ارائه می‌دهند و نقش کلیدی در گذار به اقتصاد چرخشی مبتنی بر زیست‌محیطی ایفا می‌کنند. با این حال، علیرغم این مزایا، داده‌ها نشان می‌دهد که رشد کلی صنعت جهانی بیوپلاستیک در حال حاضر به دلیل قیمت پایین نفت و عدم حمایت سیاسی از اقتصاد زیستی، کند شده است(۷).

پلیمرهای به‌دست‌آمده از زیست‌توده

نشاسته

نشاسته شکل اصلی ذخیره‌سازی کربوهیدرات در گیاهان سبز است و به عنوان دومین زیست‌توده بزرگ تولید شده روی زمین در نظر گرفته می‌شود .نشاسته یک ماده اولیه ارزان و به‌راحتی در دسترس است که به مقدار زیادی در سیب‌زمینی، ذرت، برنج و گندم وجود دارد. نشاسته در حالت طبیعی قابل ذوب نیست و نمی‌توان آن را به عنوان ترموپلاستیک فرآوری کرد .گرانول‌های نشاسته را می‌توان از طریق فرآیند ژلاتینه شدن، ترموپلاستیک کرد، که در آن گرانول‌ها از هم می‌پاشند و ساختار کریستالی منظم آنها تحت تأثیر نرم‌کننده‌ها، برش‌ها و گرما از بین می‌رود(۷). نشاسته حاصل که قابل ذوب شدن است، نشاسته ترموپلاستیک (TPS)نامیده می‌شود. بیوپلاستیک‌های مبتنی بر نشاسته برای تولید بسته‌بندی، در کشاورزی، برای کاربردهای پزشکی و آرایشی مناسب هستند .نشاسته به دلیل هزینه پایین و دسترسی بالا ، توجه و علاقه روزافزون محققان و صنایع در سراسر جهان را به خود جلب کرده است .

[Downloaded from amfi.ir on 2026-11-07]

برنج و ذرت یکی دیگر از مواد اولیه رایج در ساخت فیلم‌های زیست‌تخریب‌پذیر هستند .فیلم‌های زیست‌تخریب‌پذیر حاصل از نشاسته برنج هیدروکسی‌پروپیله‌شده (HPRS) افزایش در ازدیاد طول در نقطه پارگی، نفوذپذیری بخار آب، حلالیت و شفافیت فیلم را فراهم کردند، در حالی که با افزایش نسبت اکسید پروپیلن، مقدار استحکام کششی کاهش یافت (۱۴). لوپز و همکارانش در سال ۲۰۱۵ ، خواص مکانیکی، نفوذپذیری اکسیژن و بخار آب و همچنین ظرفیت آب‌بندی حرارتی فیلم‌های کامپوزیتی حاصل از فیلم‌های ترمو-فشرده‌شده TPS با نانوذرات تالک را بررسی کردند .با افزودن تالک (۳٪ وزنی/وزنی) به TPC ، نفوذپذیری بخار آب و اکسیژن کاهش یافت (۱۵).

سلولز

سلولز رایج‌ترین پلیمر آلی طبیعی است که حدود $۱/۵ \times ۱۰^{۱۲}$ تن از کل تولید زیست‌توده سالانه را تشکیل می‌دهد و به عنوان یک منبع تقریباً نامحدود از مواد خام برای افزایش نیاز به محصولات سازگار با محیط زیست در نظر گرفته می‌شود. منبع اصلی سلولز، منابع لیگنوسلولزی موجود در جنگل‌ها است .تولید تجاری سلولز بر منابعی مانند چوب و پنبه طبیعی بسیار خالص متمرکز است .الیاف سلولز برای تولید مواد بسته‌بندی زیست‌تخریب‌پذیر، در محصولات آرایشی بدون پلیمرهای مصنوعی یا کامپوزیت‌های قوی همراه با پلاستیک‌های زیست‌تخریب‌پذیر استفاده می‌شوند .مشتقات سلولزی که در سنتز بیوپلاستیک استفاده شده‌اند، نانوکریستال‌های سلولز (CNC) ، سلولز نانوفیبریله شده (NFC)، سلولز استات بوتیرات، سلولز استات و بیو-پلی‌اتیلن بوده‌اند(۷). مشتق سلولز با ماتریس بیوپلیمرهای دیگر به منظور بهبود خواص فیزیکی یا به عنوان پرکننده، مانند نشاسته و PLA مخلوط شد NFC . پتانسیل فوق‌العاده‌ای به عنوان ماده تقویت‌کننده در نانوکامپوزیت‌ها برای کاربردهای مختلف، مانند فوم‌ها و چسب‌ها دارد .

پروتئین‌های سویا

سویا منبع ارزان و تجدیدپذیری از بیوپلیمرها است که پتانسیل بالایی برای جایگزینی پلیمرهای پتروشیمی در بسیاری از کاربردها دارد .پروتئین سویا به صورت تجاری در سه غلظت مختلف SP موجود است: آرد سویا (۵۴٪)، کنسانتره سویا (۷۲٪-۶۵) و ایزوله سویا(۹۰٪).مولکول‌های پروتئین سویا شامل ۲۰ اسید آمینه مختلف با برهمکنش‌های قوی بین و درون مولکولی هستند .چنین برهمکنش‌هایی پروتئین سویا را غیرقابل ذوب می‌کنند و بنابراین پردازش پروتئین سویا به شکل یک پلیمر ترموپلاستیک غیرممکن است، مگر اینکه مقدار کافی از نرم‌کننده استفاده شود .استفاده از مقدار قابل توجهی از نرم‌کننده‌ها منجر به خواص مکانیکی پایین پلاستیک‌های پروتئین سویا می‌شود .از سوی دیگر، هنگامی که نرم‌کننده‌ها در طول ذخیره‌سازی یا سرویس از پلاستیک‌های پروتئین سویا مهاجرت می‌کنند، مواد بسیار شکننده می‌شوند .علاوه بر این، آبدوستی پروتئین سویا و نرم‌کننده‌ها منجر به مقاومت کم پلاستیک‌های پروتئین سویا در برابر رطوبت می‌شود .ترکیب پلیمرهای پروتئین سویا با پلیمرهای زیست‌تخریب‌پذیر یک انتخاب طبیعی برای غلبه بر کمبود پلیمرهای مبتنی بر پروتئین سویا است . پلیمرهای مورد استفاده برای مخلوط کردن با پروتئین سویا آبگریز هستند و بنابراین نمی‌توانند پیوند محکمی با پروتئین سویا ایجاد کنند و یک سازگارکننده مانند انیدرید مالئیک در مخلوط مورد نیاز است . با افزودن آن در مقادیر کمتر، می‌توان خواص مکانیکی، مقاومت در برابر رطوبت و قابلیت زیست‌پذیری را به دلیل افزایش فعل و انفعالات درون ترکیبات آنها بهبود بخشید(۷).

پلیمرهای زیست تخریب پذیر حاصل از تولید میکروبی

پلی هیدروکسی آلکانوات هاPHAs

پلی هیدروکسی آلکانوات ها به عنوان بیوپلی استرهای آلیفاتیک طبیعی طبقه بندی می شوند که توسط بسیاری از باکتری های مختلف به عنوان مواد ذخیره کربن و انرژی درون سلولی سنتز می شوند. پلی هیدروکسی آلکانوات ها توانایی ترکیب بیش از ۱۵۰ مونومر را برای تولید موادی با خواص و عملکردهای بسیار متفاوت دارند. سازگاری مکانیکی و بیولوژیکی را می‌توان با مخلوط کردن، تغییر سطح یا ترکیب پلی هیدروکسی آلکانوات با سایر پلیمرها، آنزیم‌ها یا مواد معدنی تغییر داد و طیف وسیع‌تری از کاربردها

[Downloaded from amfi.ir on 2026-11-07]

را برای آنها فراهم کرد. زمینه‌های اصلی استفاده از پلی هیدروکسی آلکانوات شامل بسته‌بندی (ظروف و فیلم‌ها)، پوشش‌ها، کاربردهای دارویی و پزشکی (پانسمان زخم، تجهیزات پزشکی، پین‌های ارتوپدی، استنت‌ها، راهنماهای عصبی و داربست‌های مغز استخوان) است .علاوه بر این، پلی هیدروکسی آلکانوات ها به عنوان سخت‌کننده در محصولات آرایشی، بهداشتی، تونرها و چسب‌ها، قطعات الکترونیکی و توپ‌های گلف استفاده می‌شوند(۷). پلاستیک‌های پلی هیدروکسی آلکانوات برخلاف سایر انواع بیوپلاستیک‌ها مانند پلی لاکتیک اسید، در برابر اشعه ماوراء بنفش پایدار هستند، می‌توانند تا دمای ۱۸۰ درجه سانتیگراد را تحمل کنند و نفوذپذیری کمی در برابر آب دارند. برخی از اشکال خاص پلی هیدروکسی آلکانوات نه تنها در میکروارگانیسم‌ها وجود دارند، بلکه در گیاهان، حیوانات و حتی در انسان‌ها نیز به عنوان جزئی از بافت‌های غشایی به شکل پلی‌هیدروکسی‌بوتیرات یافت می‌شوند. پلی‌هیدروکسی‌بوتیرات یک نمونه نادر از پلیمر آبگریز است که زیست سازگار و زیست تخریب پذیر است .این پلیمر دارای نقطه ذوب بالا (۱۷۰-۱۸۰ درجه سانتیگراد) و درجه کریستالی نزدیک به ۸۰٪ است(۷).

پلی‌هیدروکسی‌بوتیرات سفت و شکننده است و درجه شکنندگی آن به تبلور مجدد، دمای انتقال شیشه و ریزساختار پلیمر بستگی دارد .هرچه مدت زمان نگهداری آن بیشتر باشد، شکننده‌تر می‌شود .ناپایداری حرارتی در طول پردازش مداوم پلیمر در دماهای بالا و تمایل به ترک خوردن و شکستگی، کاربرد گسترده‌تر آن را محدود می‌کند .ترکیبی از کریستالی بودن بالا و چگالی کم مکان‌های هسته‌زایی، در تشکیل کریستال‌های بزرگ کروی منعکس می‌شود که بر گسترش ترک‌ها و شکنندگی ماده تأثیر می‌گذارند .به منظور بهبود خواص مکانیکی و حرارتی، عوامل هسته‌زایی مختلفی اضافه می‌شوند .در میان روش‌های رایج برای اصلاح خواص اولیه پلی‌هیدروکسی‌بوتیرات ، قطعاً مخلوط کردن جزء پلیمری پایه با سایر پلیمرها یا با افزودنی‌ها رایج‌ترین روش است .پلی‌هیدروکسی‌بوتیرات را می‌توان با استفاده از فرآیندهای تکنولوژیکی مرسوم برای فرآوری پلاستیک‌ها فرآوری کرد، که استفاده از آن را به طور گسترده امکان‌پذیر می‌سازد(۱۶).

پلیمرهای زیست‌تخریب‌پذیر که به صورت شیمیایی سنتز می‌شوند و با استفاده از مونومرهای به‌دست‌آمده از منابع کشاورزی تهیه می‌شوند.

پلی‌لاکتیک اسید(PLA)

یک پلی‌استر زیست‌تخریب‌پذیر مصنوعی با مونومر اسید لاکتیک (LA) است که از منابع طبیعی مشتق شده است . پرکاربردترین ماده اولیه ذرت یا سایر گیاهان صنعتی با محتوای نشاسته بالا است .در فرآیندهای تخمیر هیدروکربن‌ها، از باکتری‌های اسید لاکتیک لاکتوباسیلوس یا قارچ‌های ریزوپوس اوریزا استفاده می‌شود .فرآیند تخمیر برای عملکرد فعال خود به حضور سویه‌های باکتریایی و مقادیر کافی کربن (گلوکز، ساکارز یا لاکتوز)، نیتروژن (عصاره مخمر، پپتیدها) و عناصر معدنی نیاز دارد. محصول نهایی سنتز باکتریایی یک ایزومر نوری اسید لاکتیک (+)-L است که می‌تواند در واکنش‌های پلی‌کاندنسینگ بعدی به شکل پلیمری پلی-L-لاکتیک اسید (PLLA) با وزن مولکولی کم تبدیل شود .خواص پلی لاکتیک اسید به ساختار مولکولی، بلورینگی، اندازه بلورهای اسفرولیتی، مورفولوژی و میزان آرایش زنجیره‌های پلیمری آن بستگی دارد .ساختار استریوشیمیایی پلی لاکتیک اسید ، آرایش بلوری آن را تعیین می‌کند .بسته به فرآیند سنتز و پلیمریزاسیون انتخاب شده، شکل نهایی پلی لاکتیک اسید می‌تواند کاملاً آمورف) با ۵۰ تا ۹۳ درصد محتوای-L لاکتیک اسید(یا نیمه بلوری)(با بیش از ۹۳ درصد محتوای -Lلاکتیک اسید) باشد(۱۷).

دمای تغییر شیشه‌ای هموپلیمر پلی لاکتیک اسید ، ۵۵ درجه سانتی‌گراد و دمای ذوب آن حدود ۱۷۵ درجه سانتی‌گراد است .تحت شرایط کمپوست کنترل‌شده، این ماده کاملاً زیست‌تخریب‌پذیر است و می‌توان آن را با استفاده از تکنیک‌های استاندارد پردازش پلاستیک پردازش کرد .برای بهبود خواص فرآیند، لاکتید اغلب با یک انانتیومر با پیکربندی مخالف کوپلیمر می‌شود .این نشان دهنده یک

[Downloaded from amfi.ir on 2026-11-07]

شکل کوپلیمریزه شده از پلی لاکتیک اسید است که به آن پلی-(DL)-لاکتید (PDLLA) گفته می‌شود(۱۸).

پلیمرهای زیست تخریب پذیر مشتق شده از نفت

پلی کاپرولاکتون PCL[1]

یک پلی استر آلیفاتیک نیمه بلوری است که به دلیل سرعت تجزیه زیستی آهسته و زیست سازگاری بالای خود شناخته شده است .پلی کاپرولاکتون با پلیمریزاسیون حلقه باز شونده ε-کاپرولاکتون در حضور کاتالیزورهای آنیونی و کاتیونی مختلف تولید می‌شود (۱۹). به دلیل تجزیه زیستی آهسته، برای تولید سیستم‌های دارورسانی با رهایش طولانی مدت مناسب است .تجزیه در دو مرحله انجام می‌شود .ابتدا، تجزیه هیدرولیتیک پیوند استر انجام می‌شود و در مرحله دوم، تجزیه درون سلولی به متابولیت‌های غیرسمی رخ می‌دهد که مستقیماً از بدن دفع می‌شوند یا پس از تغییر متابولیکی در چرخه کربس(۱۹).

برخلاف اکثر پلی‌استرهای زیست‌تخریب‌پذیر دیگر، پلی کاپرولاکتون به صورت موضعی pH را در ناحیه تخریب خود کاهش نمی‌دهد(۱۹). مشکل اصلی آبگریزی آن است که می‌توان آن را با ترکیب با سایر پلیمرهای طبیعی یا مصنوعی حل کرد و در نتیجه خواص مکانیکی و زیست‌سازگاری آن را بهبود بخشید(۲۰).علاوه بر این، پلی کاپرولاکتون دمای انتقال شیشه‌ای پایین (۶۰-درجه سانتیگراد) و نقطه ذوب پایینی (۶۰ درجه سانتیگراد) دارد، اما یک ماتریس زیست‌تخریب‌پذیر ایده‌آل برای عوامل ضدمیکروبی طبیعی ارائه می‌دهد زیرا می‌توان آن را در دمای پایین فرآوری کرد .علاوه بر این، چقرمگی پلی کاپرولاکتون از اکثر پلیمرهای زیست‌تخریب‌پذیر برتر است .از سوی دیگر، مدول و سفتی پایین‌تر پلی کاپرولاکتون کاربردهای فراوان آن را محدود می‌کند(۲۱). پلی کاپرولاکتون با وزن مولکولی بالا به عنوان یک ماده مانع اکسیژن مناسب نیست .با وجود خواص جذاب فراوان (نرخ تخریب آهسته، نفوذپذیری بالا، دسترسی آسان و خواص مکانیکی خوب)، کاربردهای پلی کاپرولاکتون به دلیل هزینه نسبتاً بالای آن محدود شده است (۷). با این وجود، پلی کاپرولاکتون در تولید بسته‌بندی مواد غذایی بسیار رایج است و به دلیل زیست‌سازگاری عالی، به عنوان یک ماده ساختاری در مهندسی بافت مورد بررسی قرار می‌گیرد به عنوان مثال، فوم‌های پلی کاپرولاکتون میکرواستاتیک برای بازسازی بافت و پیوند سلول‌های بنیادی استفاده می‌شوند(۷).

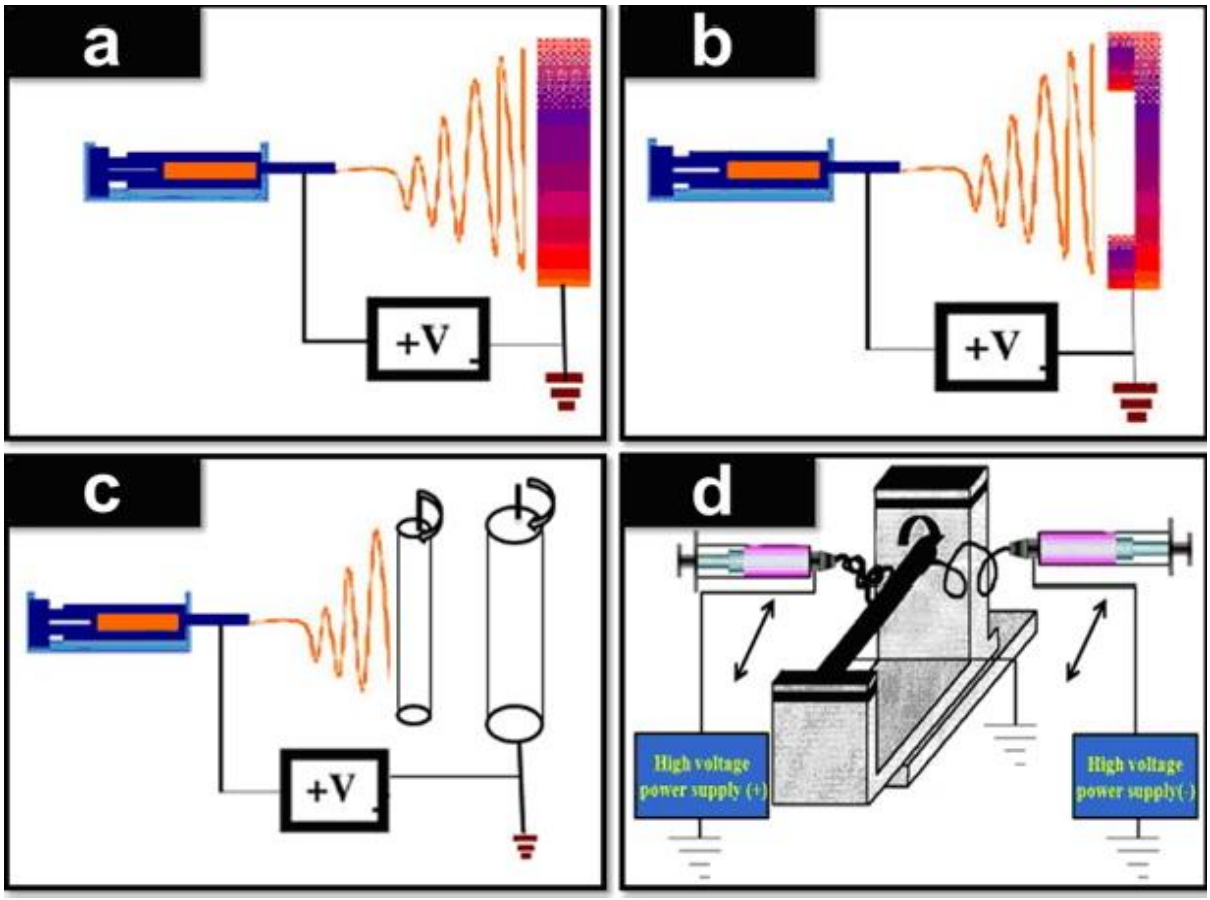
فناوری الکتروریسی[2]

گروه‌های تحقیقاتی زیادی وجود دارند که نانوالیاف الکتروریسی را با استفاده از انواع مختلف پلیمرها برای کاربردهای مختلف تولید کرده‌اند .کاربردهای زیست‌پزشکی یکی از کاربردهای اصلی فناوری الکتروریسی است. پلی-اپسیلون-کاپرولاکتون[3] را می‌توان با استفاده از فناوری الکتروریسی به غشاهای نبافته و داربست سه‌بعدی تبدیل کرد که با اصلاح جمع‌کننده الکتروریسی مرسوم توسط جمع‌کننده جدید، همانطور که در شکل‌های ۲ (a و b)دیده می‌شود، به دست آمده است.لکتروریسی برای ساخت مواد نانوکامپوزیتی، متشکل از پلی-اپسیلون-کاپرولاکتون و سایر مواد سرامیکی مانند اکسید آلومینیوم (Al_2O_3)برای داربست نانولیفی استفاده شده است .علاوه بر این، الکتروریسی برای ساخت ترکیب پلی-اپسیلون-کاپرولاکتون با سایر پلیمرها مانند (پروتئین ابریشم عنکبوت نوترکیب و ژلاتین)(pNSR32&Gt) ، پلی‌لاکتیک اسید ، فیبروئین ابریشم و پلی‌اورتان استفاده شده است(۲۰). به منظور ساخت ساختارهای مختلف برای کاربردهای زیست پزشکی، الکتروریسی به کار گرفته شده است. برخی از محققان یک جمع‌کننده جدید همانطور که در شکل ۲ (c) نشان داده شده است برای الکتروریسی پلیمرهای مختلف به داربست لوله‌ای بدون درز با نانوفیبرهای بسیار هم‌تراز در امتداد جهت محوری آنها توسعه دادند .(۲۰). در حالی که نگوین و لی (۲۰۱۲) از یک سیستم الکتروریسی با تزریق دوگانه برای ساخت صفحات چندلایه استفاده کردند. آنها نشان دادند که داربست رگ خونی مصنوعی کیتوزان-PCL gelatin/PLGA-gelatin/PLGAبا اتصالات عرضی،

[1] Polycaprolactone
[2] Electrospinning technology (ES)
[3] Poly –Epsilon-Caprolactone(PCL)

[Downloaded from amfi.ir on 2026-11-07]

انعطاف‌پذیری بسیار خوبی از خود نشان می‌دهد و قادر به تحمل فشارهای بالا و افزایش رشد سلولی است شکل۲(d)، (۲۲) بنابراین، این ماده جدید نویدبخش استفاده نهایی در رگ‌های خونی مصنوعی است.



شکل ۲- نمایش شماتیک برای توسعه در فناوری الکتروریسی(a) الکتروریسی مرسوم، (b)جمع‌کننده الکتروریسی جدید برای ساخت داربست سه‌بعدی، (c)جمع‌کننده الکتروریسی جدید برای ساخت لوله‌های نانولیفی، و (d)سیستم الکتروریسی با پرتاب دوگانه برای ساخت داربست چندلایه (۲۰).

ارزیابی چرخه حیات بیوپلیمرها (LCA)[1]

LCA ابزاری برای اندازه‌گیری پایداری و عملکرد یک ماده با محیط است. چرخه زندگی بیوپلیمر از LCA زیست توده تقلید می‌کند. مانند زیست توده، پلیمرهای زیستی پس از تجزیه توسط آنزیم‌ها و میکروب‌ها به کربن و آب تجزیه می‌شوند. نرخ تجزیه زیستی به عنوان CO_2 آزاد شده در طول تجزیه و تحلیل، تقسیم بر CO_2 نظری موجود در نمونه محاسبه می‌شود. K^{Ed}پارامتری است که برای ارزیابی کمی تجزیه پذیری زیستی بالقوه پلیمرهای زیست تخریب‌پذیر در محیط طبیعی استفاده می‌شود. نمونه‌های خاک طبیعی به بیوراکتورها تلقیح می‌شوند و نرخ‌های تجزیه زیستی مواد مرجع طی یک دوره ۲ هفته‌ای تعیین می‌شوند. نشاسته و پلی اتیلن به عنوان مواد مرجع برای تعیین مقادیر K^{Ed} به ترتیب ۱۰۰ و ۰ استفاده می‌شوند.مقادیر با استفاده از روش ISO 14852تعیین می‌شوند و CO_2 تکامل یافته را به عنوان یک پارامتر تحلیلی تشخیص می دهند (۱۳).

کاربرد پلیمرهای زیست تخریب‌پذیر

استفاده از پلیمرهای زیست تخریب‌پذیر با صنعت جهانی به ارزش میلیاردها دلار سالانه به سرعت در حال رشد است. پلیمرهای زیست تخریب‌پذیر در کاربردهای مختلفی از جمله

[1] Life Cycle Assessment

[Downloaded from amfi.ir on 2026-11-07]

بسته‌بندی مواد غذایی، صفحه کلید کامپیوتر، قطعات داخلی خودرو و کاربردهای پزشکی مانند دستگاه های بزرگ قابل کاشت، تحویل پزشکی و مهندسی بافت استفاده می‌شوند (۲۳).

بسته‌بندی مواد غذایی

علیرغم راحتی و ارزش بالایی که پلاستیک‌ها به ارمغان می‌آورد، نگرانی‌های زیست محیطی آلودگی پلاستیک توجه جهانی را به خود جلب کرده است. این ضایعات عمدتاً از محصولاتی با طول عمر «در حال استفاده» کوتاه، معمولاً حدود ۶ ماه یا کمتر، در مقایسه با استفاده در بخش‌های ساختمانی و ساخت‌وساز که میانگین عمر آن‌ها ۳۵ سال است، به دست می‌آید. اگرچه نرخ بازیافت پلاستیک از ۰ درصد در دهه ۱۹۸۰ به ۱۹/۵ درصد در پیش بینی‌های فعلی افزایش یافته است، مواد بسته بندی، به ویژه بسته‌بندی مواد غذایی انعطاف پذیر، تا حد زیادی غیرقابل بازیافت هستند (۲۴). تقریباً ۹۵ درصد از مواد بسته‌بندی پلاستیکی فعلی ساخته شده از پلی اولفین‌ها و پلی اتیلن ترفتالات بازیافت نمی‌شوند و پس از یک بار مصرف کوتاه به محل دفن زباله می‌روند و در نتیجه ضرر سالانه ۸۰ تا ۱۲۰ میلیارد دلاری را به اقتصاد جهانی وارد می‌کنند. این مسائل ناشی از خواص ذاتی مواد این پلاستیک‌ها است که شامل سبکی (ضخامت در مقیاس میکرو)، چقرمگی بالا، ساختارهای پیچیده (چند لایه) و آلودگی ناشی از تماس مستقیم با مواد غذایی است. پلیمرهای زیست تخریب‌پذیر راهی برای حل این مسائل از طریق کمپوست کردن این بسته‌بندی به CO_2، H_2O و زیست توده در کمتر از ۶ ماه پس از ماندگاری کوتاه آن، بر خلاف پلاستیک‌هایی که سوزانده یا دفن می‌شوند تا قرن‌ها باقی بمانند، فراهم می‌کند (۲۵).

بسته‌بندی پلاستیکی به دلیل گزینش‌پذیری گاز و ممانعت بالا، همراه با ایمنی و محافظت در حمل و نقل و ذخیره سازی، ماندگاری پایدار و طولانی مدت مواد غذایی را ارائه می‌دهد. به عنوان جایگزین های عالی برای جایگزینی بسته بندی‌های زیست تخریب ناپذیر، پلاستیک های زیست تخریب پذیر هستند که می‌توان آن‌ها را پس از استفاده نهایی تجزیه/کمپوست کرد. همچنین می‌تواند ویژگی‌هایی مانند به عنوان یک مانع یا غشای عملکردی انتخابی در برابر گاز، رطوبت و عطر ارائه دهد (۲۶).

علیرغم تلاش‌های تحقیقاتی متعدد دانشگاهی برای ترویج کاربرد پلیمرهای زیست تخریب‌پذیر در بسته‌بندی، تعداد کمی از پلیمرهای زیست تخریب‌پذیر در بازار وجود دارد که بتواند تقاضای بالا برای بسته‌بندی مواد غذایی را در جامعه مدرن برآورده کندکه این ناشی از چالش‌ها در به دست آوردن عملکرد مانع اکسیژن/بخار آب در سطوح قابل مقایسه با پلاستیک‌های سنتی مبتنی بر نفت یا ترکیبات آن‌ها است(۲۷).

کاربرد پزشکی

پلیمرهای زیست تخریب‌پذیر در خط مقدم تحقیقات برای کاربردهای زیست پزشکی در ۵۰ سال گذشته بوده‌اند. پیشرفت‌ها در زمینه استفاده از پلیمرهای زیست تخریب‌پذیر به‌عنوان وسیله‌ای برای انتقال کنترل‌شده دارو و توسعه ابزارهای درمانی، از جمله ایمپلنت‌ها و داربست‌های سه‌بعدی برای مهندسی بافت مشاهده شده است (۲۸).پلیمرهای زیست تخریب‌پذیر به عنوان سیستم‌های دارورسانی باید به گونه‌ای ساخته شوند که از پتانسیل آن‌ها برای خود مونتاژ شدن در نانوحامل‌هایی که می‌توانند با داروهای خاص بارگیری شوند، استفاده شود. این سیستم‌های پلیمری زیست تخریب پذیر باید دو الزام اصلی عملکرد و ایمنی را برآورده کند. علاوه بر این، باید قادر به حداکثر کارایی کپسولاسیون داروی هدف باشند، زمان ماندن در بافت هدف، حداکثر فراهمی زیستی برای دستیابی به اثر درمانی و تجزیه زیستی در یک بازه زمانی سازگار با بهبود بافت هدف را افزایش دهند. در عین حال این پلیمرهای زیست تخریب‌پذیر باید ایمن باشند. یعنی القاء سمیت در داخل بدن و پاسخ التهابی توسط سیستم ایمنی ایجاد نکنند. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی پلیمرهای زیست تخریب‌پذیر که موفقیت آنها را به عنوان نانوحامل تعیین می کند عبارتند از: ترکیب پلیمری، بار سطحی، وزن مولکولی پلیمر، تاکتیکی بودن مونومرها، پایداری کلوئیدی، توزیع

[Downloaded from amfi.ir on 2026-11-07]

اندازه نانوذرات، به حداقل رساندن تجمع نانوذرات و نسبت آب دوستی به آبگریزی (۲۹).

سایر کاربردها

پلی‌لاکتیک اسید یکی از محبوب‌ترین مواد مورد استفاده در پرینت سه بعدی است زیرا نقطه ذوب پایینی دارد، و در مقایسه با مواد دیگر، مانند اکریلونیتریل بوتادین استایرن و پلی‌آمیدها، انرژی کمتری برای چاپ نیاز دارد. تحقیقات نشان داده که استفاده از پلی‌لاکتیک اسید بازیافتی یک گزینه مناسب برای پرینت سه بعدی است که به ویژگی‌های مثبت این فناوری مانند صرفه جویی در مواد خام، هزینه کم انرژی و همچنین انتشار کم CO_2 می‌افزاید (۳۰).تریبوتیل سیترات به عنوان یک نرم کننده در غلظت‌های مختلف استفاده شده است و نشان داده شده که بسته به محتوای نرم کننده، بین استحکام کششی و خمشی بالا سازش دارد. استحکام و مقاومت در برابر ضربه؛ شکل‌پذیری؛ و نرخ تبلور و درجه تبلور، که برای کاربردهای خودرو مهم است را می‌توان به دست آورد.پلی هیدروکسی آلکانوات‌های زنجیره بلند (mclPHA) به عنوان منبعی از اسیدهای کایرال 3-(R)-هیدروکسی آلکانوئیک (R3HAs) استفاده می‌شوند که پیش‌سازهایی برای سنتز مواد شیمیایی با ارزش افزوده از جمله آنتی-بیوتیک ها، داروها، ویتامین‌ها هستند.اسید -(R)-3-هیدروکسیدکانوئیک به دست آمده از طریق پلیمریزاسیون پلیمری به پپتید DP18 و مشتقات آن حاوی اسیدهای آمینه D کونژوگه شد و فعالیت ضد تکثیر را بهبود بخشید. نشان داده شد که فعالیت پپتید DP18 وابسته به طول زنجیره R3HAهای مورد استفاده برای اصلاح پپتید است، با 3-(R)-هیدروکسینونانوئیک و 3-(R)-هیدروکسی دکانوئیک اسید موثرترین در بهبود فعالیت DP18 هستند (۳۱).

mclPHAهای کربوکسیله شده برای تهیه سوسپانسیون‌های نانوذرات پایدار با استفاده از مخلوطی از سورفکتانت‌های یونی و غیر یونی استفاده شدند. فرمولاسیون نانوذرات متراکم (<۰/۴ درصد مواد جامد) حاوی mclPHA های کربوکسیله را می‌توان برای ساخت تونرهای زیروگرافی، چسب‌های ذوب داغ و پوشش های محافظ و به عنوان دانه‌های میکرو در محصولات مراقبت شخصی مانند لوازم آرایشی و خمیر دندان استفاده کرد (۳۲).

نتیجه‌گیری کلی

پلاستیک‌ها به دلیل عملکرد و سهولت در تولید، به طور گسترده برای تولید مواد بسته‌بندی استفاده می‌شوند. افزایش استفاده از پلاستیک‌ها به دلیل مقاومت آن‌ها در برابر تخریب زیستی، مشکلات زیست محیطی جدی را برای محیط زیست ایجاد کرده است. پلیمرهای زیستی را می‌توان به عنوان راه حلی برای مشکلات ناشی از پلاستیک‌ها استفاده کرد زیرا به راحتی در محیط تجزیه می‌شوند و همچنین خواص پلیمرهای معمولی را تقلید می‌کنند. همچنین با بهبود خواص و افزایش ماندگاری این پلیمرها استفاده آنها در بسته بندی مواد غذایی گسترش یافته است. از جمله در بسته‌بندی اولیه، پوشش‌های خوراکی و بسته‌بندی فعال و هوشمند. بنابراین استفاده از پلیمرهای زیست تخریب پذیر می تواند به عنوان گزینه امیدوارکننده ای برای کاهش تجمع پلیمرهای سنتزی به ویژه پلی استیرن، پلی اتیلن و پلی پروپیلن در طبیعت مطرح شود.

منابع

[Downloaded from amfi.ir on 2026-11-07]

1-Zhong Y, Godwin P, Jin Y, Xiao H. Biodegradable polymers and green-based antimicrobial packaging materials: A mini-review. Advanced Industrial and Engineering Polymer Research, 2020; 3(1): 27-35.

2-Zhu J, Wang C. Biodegradable plastics: Green hope or greenwashing? Marine Pollution Bulletin, 2020; 161:111774.

3-Zhang L, Zhong J, Ren X. Natural fiber-based biocomposites. In Green Biocomposites 2017; (pp. 31-70). Springer, Cham.

4-Karthika M, Shaji N, Johnson A, Santhosh, NM, Gopakumar D, Thomas S. Biodegradation of green polymeric composites materials. Bio Monomers for Green Polymeric Composite Materials, 2019; 141-159.

5-Huang Z, Shanmugam M, Liu Z, Brookfield A, Bennett EL, Guan R, Xiao J. Chemical Recycling of Polystyrene to Valuable Chemicals via Selective Acid-Catalyzed Aerobic Oxidation under Visible Light, J. American Chemical Society, 2022; 144: 6532-6542.

6-Chandra RJ, Shivamurthy B, Kulkarni SD, Kumar M.S. Hybrid Polymer Composites for EMI Shielding Application-A Review. Material Research Express, 2019; 6(8):2008.

7-Čolnik M, Hrnčič MK, Škerget M, Knez Ž. Biodegradable Polymers, Current Polymer, Current trend of research and their applications, a review. Chemical Industry & Chemical Engineering, 2020; 26 (4): 401−418.

8-Li J, Liu H, Chen JP. Microplastics in Freshwater Systems: A Review on Occurrence, Environmental Effects, and Methods for Microplastics Detection, Water Research, 2018; 137: 362-374.

9-Acquavia MA, Pascale R, Martelli G, Bondoni M, Bianco G. Natural Polymeric Materials: A Solution to Plastic Pollution from the Agro-Food Sector. Polymers. (2013); 13(1): 158.

10-Jha K, Kataria R, Verma J, Pradhan, S. Potential biodegradable matrices and fiber treatment for green composites: A review. AIMS Materials Science, 2019; 6(1): 119-138.

11-Bassyouni M, Zoromba MS, Abdel-Aziz MH, Mosly I. Extraction of Nanocellulose for Eco-Friendly Biocomposite Adsorbent for Wastewater Treatment. Polymers, 2022; 14(9): 1852.

12-Maraveas C. Production of sustainable and biodegradable polymers from agricultural waste. Polymers, 2020; 12(5): 1127.

13-Mangaraj S, Yadav A, Bal L M, Dash S K, Mahanti NK. Application of biodegradable polymers in food packaging industry: A comprehensive review. Journal of Packaging Technology and Research, 2019; 3(1): 77-96.

14-Woggum T, Sirivongpaisal P, Wittaya T. Characteristics and properties of hydroxypropylated rice starch based biodegradable films. Food Hydrocolloids2015; 50: 54–64.

15-Lopez OV, Castillo LA, Garcia MA, Villar MA, Barbosa SE. Food Packaging Bags Based on Thermoplastic Corn Starch Reinforced with Talc Nanoparticles. Food Hydrocolloids, 2015; 43: 18-24.

16-Avella M, Martuscelli E, Raimo M. Review Properties of blends and composites based on poly (3-hydroxy) butyrate (PHB) and poly (3-hydroxybutyrate-hydroxyvalerate) (PHBV) copolymers. Journal of Materials Science. 2000; 35: 523-545.

17-Jiang L, Wolcott MP, Zhang J. Study of biodegradable polylactide/poly (butylene adipate-co-terephthalate) blends. Biomacromolecules, 2006; 7 (1): 199–207.

18-Madhavan Nampoothiri K, Nair NR, John RP. An overview of the recent developments in polylactide (PLA) research. Bioresource Technology, 2010; 101 (22): 8493–8501.

19-Woodruff MA, Hutmacher DW. The return of a forgotten polymer—Polycaprolactone in the 21st century Progress in Polymer Science, 2010; 35 (10): 1217–1256.

20-Abedalwafa M, Wang F, Wang L, Li Ch. Biodegradable poly-epsilon-caprolactone (PCL) for tissue engineering applications: a review. Reviews on Advanced Materials Science. (2013); 34(2): 123-140.

21-Khalid S, Ali, A. Development and characterization of biodegradable antimicrobial packaging films based on polycaprolactone,

[Downloaded from amfi.ir on 2026-11-07]

starch and pomegranate rind hybrids. Food Packaging and Shelf Life. 2018; 18: 71–79

22-Nguyen T-H, Lee B-T. The effect of cross-linking on the microstructure, mechanical properties and biocompatibility of electrospun polycaprolactone–gelatin/PLGA–gelatin/ PLGA–chitosan hybrid composite Science and Technology of Advanced Material. 2012; 13: 035002 1-11.

23-Yin GZ, Yang X M. Biodegradable polymers: a cure for the planet, but a long way to go. Journal of Polymer Research, 2020; 27(2): 1-14.

24-Barrowclough D, Birkbeck CD. Transforming the global plastics economy: The role of economic policies in the global governance of plastic pollution. Social Sciences, 2022; 11(1):26.

25-Geyer R, Jambeck JR, Law KL. Production, use, and fate of all plastics ever made. Science advances, 2017; 3(7): e1700782.

26-Defruyt S. Towards a new plastics economy. *Field Actions Science Reports.* The journal of field actions, 2019; (Special Issue 19), 78-81.

27-Mohanty AK, Vivekanandhan S, Pin JM, Misra M. Composites from renewable and sustainable resources: Challenges and innovations. Science, 2018; 362(6414): 536-542.

28- YC, Jin PR, Chu LA, Hsu FF, Wang MR, Chang CC, Chiou, SJ, Qiu JT, Gao DY, Lin CC, Chen YS, Hsu YC, Wang J, Wang FN, Yu PL, Chiang AS, Wu AYT, Ko JJS, Lai CPK, Lu TT, Chen, Y. Delivery of nitric oxide with a nanocarrier promotes tumour vessel normalization and potentiates anti-cancer therapies. Nature Nanotechnology, 2019; 14(12): 1160-1169.

29-Palanikumar L, Al-Hosani S, Kalmouni M, Nguyen VP, Ali L, Pasricha R, Barrera FN, Magzoub, M. pH-responsive high stability polymeric nanoparticles for targeted delivery of anticancer therapeutics. Communications Biology, 2020; 3(1): 1-17.

30-Lanzotti A, Martorelli M, Maietta S, Gerbino S, Penta F, Gloria A. A comparison between mechanical properties of specimens 3D printed with virgin and recycled PLA. Procedia CIRP, 2019; 79: 143-146.

31-Mozejko-Ciesielska J, Szacherska K, Marciniak P. Pseudomonas species as producers of eco-friendly polyhydroxyalkanoates. Journal of Polymers and the Environment, 2019; 27(6):1151-1166.

32-Peprah BA, Ramsay JA, Ramsay BA. Stabilization and characterization of carboxylated medium-chain-length poly (3-hydroxyalkanoate) nanosuspensions. International Journal of Biological Macromolecules, 2018; 108: 902-908.

[Downloaded from amfi.ir on 2026-11-07]