Review Article

Polymerization
Quarterly, 2026
Volume 16, Number 1
Pages 31-41
ISSN: 2252-0449

Applications, Emerging Technologies, and Commercialization Challenges of Biopolymers in the Food Packaging Industry

Nahid Davoudi and Mandana Zarei*

Department of Biological Science and Technology, Faculty of Nano and Bio Science and Technology, Persian Gulf University, Postal Code 7516913817, Bushehr, Iran

Received: 27 August 2025, Accepted: 24 February 2026

Abstract

With the increasing environmental concerns and the growing limitations associated with petroleum-based polymers, the development of sustainable food packaging systems has become a major priority in the food industry. In this context, biopolymers have attracted significant attention in recent research as biodegradable and safe alternatives to conventional synthetic materials. The present review focuses on the application of biopolymers in food packaging and provides a critical analysis of edible films and coatings, emerging active and intelligent packaging technologies, and the key challenges related to their commercialization. Based on the evaluation of previous studies, although biopolymer-based films and coatings offer notable advantages in terms of biocompatibility and food safety, their industrial application is still hindered by insufficient mechanical and barrier properties, high sensitivity to moisture, and limitations in processability. On the other hand, biopolymer-based active and intelligent packaging systems, by enabling the incorporation of bioactive compounds and real-time monitoring of food quality, have opened new opportunities for enhancing shelf life and ensuring food safety. Nevertheless, challenges such as large-scale production, cost-effectiveness, consumer acceptance, and compliance with safety regulations remain critical barriers to their widespread adoption. Finally, this review provides a critical synthesis of current research trends and highlights future directions for research and development in the field of biopolymer-based food packaging, aiming to facilitate the transition from laboratory-scale studies to practical and commercially viable packaging solutions.

Key Words

**biopolymer,
edible film and coating,
active packaging,
intelligent packaging,
food industry**

(*) To whom correspondence should be addressed.
E-mail: zarei.mandana@pgu.ac.ir

مقاله مروری

بسپارش
فصلنامه علمی
سال شانزدهم، شماره ۱،
صفحه ۴۱-۳۱، ۱۴۰۵
ISSN: 2252-0449

کاربردها، فناوری‌های نوین و چالش‌های تجاری‌سازی زیست‌پلیمرها در صنعت بسته‌بندی غذایی

ناهید داوودی و ماندانا زارعی*

بوشهر، دانشگاه خلیج فارس، دانشکده علوم و فناوری نانو و زیستی، گروه علوم و فناوری زیستی،

کد پستی ۷۵۱۶۹۱۳۸۱۷

دریافت: ۱۴۰۴/۶/۵، پذیرش: ۱۴۰۴/۱۲/۵

چکیده

با افزایش نگرانی‌های زیست‌محیطی و محدودیت‌های مرتبط با پلیمرهای نفت‌پایه، توسعه سامانه‌های بسته‌بندی پایدار به یکی از اولویت‌های اصلی صنعت غذا تبدیل شده است. دراین‌میان در پژوهش‌های اخیر، توجه گسترده‌ای به زیست‌پلیمرها به‌عنوان جایگزین‌های زیست‌تخریب‌پذیر و ایمن جلب شده است. در مقاله مروری حاضر با تمرکز بر کاربرد زیست‌پلیمرها در بسته‌بندی مواد غذایی، به بررسی تحلیلی فیلم‌ها و پوشش‌های خوراکی، فناوری‌های نوین بسته‌بندی فعال و هوشمند و چالش‌های کلیدی تجاری‌سازی این سامانه‌ها پرداخته می‌شود. براساس تحلیل مطالعات پیشین، اگرچه فیلم‌ها و پوشش‌های زیست‌پلیمری ازنظر زیست‌سازگاری و ایمنی مزایای درخور توجهی دارند، اما خواص مکانیکی و سدی ضعیف، حساسیت به رطوبت و محدودیت‌های فراورش‌پذیری، مانع اصلی توسعه صنعتی آن‌ها به‌شمار می‌رود. ازسوی‌دیگر، بسته‌بندی‌های فعال و هوشمند برپایه زیست‌پلیمرها با فراهم‌سازی امکان حمل ترکیبات زیست‌فعال و پایش کیفیت مواد غذایی، افق‌های جدیدی را برای افزایش ماندگاری و ایمنی محصولات غذایی ایجاد کرده‌اند. بااین‌حال، مسائلی نظیر مقیاس‌پذیری تولید، هزینه، پذیرش مصرف‌کننده و الزامات ایمنی، همچنان چالش‌برانگیز باقی مانده است. درنهایت، این مقاله با جمع‌بندی انتقادی از روندهای پژوهشی موجود، مسیرهای آینده پژوهش و توسعه در حوزه بسته‌بندی غذایی برپایه زیست‌پلیمرها را ارائه می‌کند.



ناهید داوودی



ماندانا زارعی

واژگان کلیدی

زیست‌پلیمر،
فیلم و پوشش خوراکی،
بسته‌بندی فعال،
بسته‌بندی هوشمند،
صنایع غذایی

* مسئول مکاتبات، پیام‌نگار:
zarei.mandana@pgu.ac.ir

مقدمه

صنعت بسته‌بندی مواد غذایی در سال‌های اخیر، تحت تأثیر هم‌زمان چالش‌های زیست‌محیطی، الزامات ایمنی مواد غذایی و سیاست‌های توسعه پایدار با تحولات ساختاری شایان توجهی مواجه شده است. وابستگی گسترده به پلیمرهای نفت‌پایه و انباشت پسماندهای تخریب‌ناپذیر، پیامدهای بلندمدتی برای بوم‌سازگان ایجاد کرده و به‌طور هم‌زمان، نگرانی‌هایی را در زمینه مهاجرت ترکیبات شیمیایی، سلامت مصرف‌کننده و مدیریت چرخه عمر مواد بسته‌بندی به‌دنبال داشته است [۱]. در پاسخ به این چالش‌ها، فشارهای قانونی و تغییر الگوی تقاضای بازار، توسعه و به‌کارگیری مواد بسته‌بندی با منشأ تجدیدپذیر و زیست‌تخریب‌پذیری را به یکی از اولویت‌های اصلی پژوهش و صنعت تبدیل کرده است [۲].

دراین‌میان، زیست‌پلیمرها به‌عنوان گزینه‌های پایدار و سازگار با محیط‌زیست، جایگاه ویژه‌ای در مطالعات بسته‌بندی غذایی یافته‌اند. این مواد، به‌ویژه در قالب فیلم‌ها و پوشش‌های خوراکی، قابلیت بالقوه کاهش آثار زیست‌محیطی و بهبود ایمنی مواد غذایی را دارند [۳،۴]. بااین‌حال، با وجود رشد درخور توجه پژوهش‌های آزمایشگاهی، انتقال این دستاوردها به مقیاس صنعتی و تجاری همچنان با محدودیت‌های جدی همراه است. ضعف خواص مکانیکی و گرمایی، نفوذپذیری بخار آب و گازهای زیاد، حساسیت به رطوبت و چالش‌های مرتبط با فراورش‌پذیری و تولید در مقیاس بزرگ از مهم‌ترین موانع توسعه کاربردی زیست‌پلیمرها در صنعت بسته‌بندی محسوب می‌شوند [۵-۷].

در پاسخ به این محدودیت‌ها، رویکردهای نوین بسته‌بندی، به‌ویژه بسته‌بندی‌های فعال و هوشمند، به‌عنوان راهکارهای کارآمد برای ارتقای عملکرد سامانه‌های زیست‌پلیمرمحور مطرح شده‌اند. در بسته‌بندی فعال، زیست‌پلیمرها به‌عنوان بستر یا حامل ترکیبات زیست‌فعال نظیر عوامل ضدمیکروب، ضداکسنده‌ها و جاذب‌های گازی، نقش فعالی در افزایش ماندگاری و حفظ کیفیت مواد غذایی ایفا می‌کنند [۸،۹]. درمقابل، بسته‌بندی‌های هوشمند با بهره‌گیری از نشانگرها، حسگرها و سامانه‌های انتقال داده، امکان پایش برخط کیفیت محصول و شرایط نگهداری را در طول زنجیره تأمین فراهم می‌سازند [۱۰،۱۱]. تلفیق این فناوری‌ها با زیست‌پلیمرها، زمینه‌ساز توسعه سامانه‌های بسته‌بندی پایدار، چندمنظوره و سازگار با نیازهای نوین بازار شده است.

با وجود پیشرفت‌های چشمگیر، بخش درخور توجهی از مطالعات موجود ماهیتی توصیفی داشته و اغلب به بررسی نوعی زیست‌پلیمر یا یک فناوری خاص محدود شده‌اند. نبود تحلیل یکپارچه از ارتباط میان نوع زیست‌پلیمر، راهبردهای بهبود عملکرد و چالش‌های فنی و اقتصادی تجاری‌سازی، خلأ شایان ملاحظه‌ای در ادبیات این حوزه ایجاد کرده است [۱۲،۱۳]. براین‌اساس هدف از مقاله مروری حاضر، ارائه مرور تحلیلی و ساختارمندی بر کاربرد زیست‌پلیمرها در بسته‌بندی غذایی با تمرکز بر بسته‌بندی‌های فعال و هوشمند، بررسی فناوری‌های نوین بهبود عملکرد و تبیین چالش‌های کلیدی در مسیر تولید صنعتی و تجاری‌سازی است. در این مقاله تلاش شده است تا با ارائه مقایسه‌های تحلیلی و جمع‌بندی انتقادی مطالعات پیشین، تصویر جامعی از وضعیت فعلی و مسیرهای آینده پژوهش و توسعه در این حوزه ارائه دهد.

زیست پلیمرها

در سال‌های اخیر، زیست‌پلیمرها به‌عنوان پلیمرهایی با منشأ تجدیدپذیر جایگاه مهمی در پژوهش‌های مرتبط با بسته‌بندی غذایی یافته و به‌عنوان جایگزین‌های بالقوه پلیمرهای نفت‌پایه مورد توجه قرار گرفته‌اند. ویژگی‌هایی نظیر زیست‌تخریب‌پذیری، زیست‌سازگاری و امکان استفاده در تماس مستقیم با مواد غذایی، این مواد را به گزینه‌های مناسبی برای توسعه سامانه‌های بسته‌بندی پایدار تبدیل کرده است. بااین‌حال، ماهیت غالباً آب‌دوست بسیاری از زیست‌پلیمرها به محدودیت‌هایی در خواص مکانیکی و ممانعتی منجر شده و کاربرد صنعتی آن‌ها را با چالش‌هایی مواجه ساخته است [۱،۱۴].

بیشترین سهم از مطالعات به زیست‌پلیمرهای برپایه پلی‌ساکاریدها و پروتئین‌ها در حوزه بسته‌بندی غذایی اختصاص یافته است. پلیمرهایی نظیر نشاسته، آلژینات، کاراگینان، کیتوسان، کلاژن و ژلاتین به‌دلیل دسترسی مناسب، ایمنی زیستی و قابلیت فیلم‌سازی، به‌طور گسترده در توسعه فیلم‌ها و پوشش‌های زیست‌تخریب‌پذیر استفاده شده‌اند [۱۵،۱۶].

نشاسته، به‌عنوان یکی از فراوان‌ترین زیست‌پلیمرها، به‌دلیل قابلیت تشکیل فیلم‌های شفاف و خوراکی، گزینه پرکاربردی در بسته‌بندی غذایی به‌شمار می‌رود. بااین‌حال، ساختار نیمه‌بلوری و حساسیت زیاد به رطوبت، موجب کاهش استحکام مکانیکی و افزایش نفوذپذیری بخار آب می‌شود. ازاین‌رو، اصلاحات شیمیایی، فیزیکی یا آنزیمی و نیز ترکیب نشاسته با سایر پلیمرها یا افزودنی‌ها، به‌عنوان راهکارهای مؤثری برای بهبود عملکرد آن در سامانه‌های بسته‌بندی پیشنهاد شده‌اند [۱۷،۱۸].

آلژینات استخراج‌شده از جلبک‌های قهوه‌ای، به‌سبب زیست‌سازگاری زیاد و قابلیت ژل‌شدن در مجاورت کاتیون‌های

دوظرفیتی، کاربرد گسترده‌ای در فیلم‌ها و پوشش‌های خوراکی دارد. این پلیمر سد مناسبی دربرابر اکسیژن ایجاد می‌کند، اما حساسیت زیاد به رطوبت و کاهش استحکام مکانیکی در شرایط مرطوب، استفاده مستقل از آن را در برخی کاربردهای بسته‌بندی محدود می‌سازد [۱۹،۲۰].

پلیمرهای پروتئینی نظیر کلاژن و ژلاتین نیز به‌واسطه قابلیت فیلم‌سازی، شفافیت و خواص چسبندگی مناسب در بسته‌بندی مواد غذایی مورد توجه قرار گرفته‌اند. ژلاتین به‌دلیل زیست‌تخریب‌پذیری و ایمنی زیاد، گزینه مناسبی برای تولید فیلم‌ها و پوشش‌های خوراکی محسوب می‌شود. بااین‌حال، نفوذپذیری بخار آب زیاد و پایداری محدود در شرایط مرطوب، نیاز به اصلاح ساختاری یا ترکیب با سایر زیست‌پلیمرها را اجتناب‌ناپذیر می‌سازد [۱۹،۲۰].

کیتوسان که از دی‌استیل‌دارکردن جزئی کیتین به‌دست می‌آید، به‌دلیل خاصیت ذاتی ضدمیکروب و قابلیت چسبندگی زیاد، جایگاه ویژه‌ای در بسته‌بندی فعال غذایی دارد. این زیست‌پلیمر، افزون‌بر قابلیت تشکیل فیلم، می‌تواند به‌عنوان حامل ترکیبات زیست‌فعال عمل کند. باوجوداین، حل‌پذیری محدود در محیط‌های خنثی و نفوذپذیری بخار آب از مهم‌ترین محدودیت‌های آن در کاربردهای بسته‌بندی به‌شمار می‌رود [۱۴،۲۱].

کاراگینان‌ها، به‌عنوان گالاکتان‌های سولفاتی استخراج‌شده از جلبک‌های قرمز، با دارابودن خواص ژل‌کنندگی، ضخامت‌دهی و امولسیون‌کنندگی، در صنایع غذایی و دارویی کاربرد گسترده‌ای دارند. تفاوت در رفتار ژل‌شدن انواع مختلف کاراگینان (کاپا، یوتا و لامبدا) امکان تنظیم ویژگی‌های بافتی و مکانیکی فیلم‌ها را فراهم می‌سازد، هرچند وابستگی شدید این خواص به شرایط یونی و دمایی، طراحی سامانه‌های پایدار بسته‌بندی را پیچیده می‌کند [۱۶].

به‌طورکلی، هر یک از زیست‌پلیمرهای استفاده‌شده در بسته‌بندی مواد غذایی مزایا و محدودیت‌های عملکردی خاصی دارند و انتخاب آن‌ها به نوع محصول غذایی، شرایط نگهداری و الزامات فنی بسته‌بندی وابسته است. درهمین‌راستا، توسعه سامانه‌های چندجزئی برپایه ترکیب زیست‌پلیمرها، اصلاح ساختاری و طراحی کامپوزیت‌ها و نانوکامپوزیت‌ها، به‌عنوان راهبردهای کلیدی برای ارتقای عملکرد و افزایش قابلیت تجاری‌سازی این مواد مطرح شده‌اند [۱۷].

کامپوزیت‌های زیست‌پلیمری و کاربردهای آن‌ها

کامپوزیت‌های زیست‌پلیمری، سامانه‌های چندجزئی هستند که با ترکیب زیست‌پلیمرها با فازهای تقویت‌کننده نظیر سایر زیست‌پلیمرها، نانوذرات معدنی یا الیاف طبیعی، به‌منظور بهبود خواص عملکردی توسعه می‌یابند. هدف اصلی از طراحی این سامانه‌ها، غلبه بر محدودیت‌های ذاتی زیست‌پلیمرهای خالص، به‌ویژه ضعف خواص مکانیکی، پایداری گرمایی و ویژگی‌های سدی است [۲۲].

روش‌های متعددی برای تهیه کامپوزیت‌های زیست‌پلیمری گزارش شده است که ازجمله آن‌ها می‌توان به آمیخته‌سازی محلولی و مذاب، ریخته‌گری با حلال، جداسازی فاز، قالب‌گیری، الکتروریسی و لایه‌نشانی اشاره کرد. انتخاب روش ساخت، اثر مستقیمی بر ریزساختار، یکنواختی فازها و درنهایت عملکرد نهایی کامپوزیت دارد و باید متناسب با کاربرد هدف و مقیاس تولید انجام شود [۱۹،۲۰].

در حوزه بسته‌بندی غذایی، کامپوزیت‌های زیست‌پلیمر عمدتاً به‌منظور بهبود استحکام مکانیکی، کاهش نفوذپذیری بخار آب و گازها و افزایش پایداری در شرایط مرطوب توسعه یافته‌اند. ترکیب زیست‌پلیمرهایی نظیر نشاسته، آلژینات، کیتوسان یا ژلاتین با نانوپرکننده‌هایی مانند نانوذرات اکسید فلزی، نانوالیاف سلولوزی و نانوخاک‌رس‌ها، به‌طور مؤثر به ارتقای عملکرد فیلم‌ها و پوشش‌های خوراکی منجر شده است [۱۳،۲۱].

فراتر از بسته‌بندی غذایی، کامپوزیت‌های زیست‌پلیمر در حوزه‌های دارویی، پزشکی و کشاورزی نیز کاربرد گسترده‌ای یافته‌اند. این مواد در ساخت هیدروژل‌ها، داربست‌های مهندسی بافت، سامانه‌های انتقال دارو، پانسمان‌های زخم و تجهیزات پزشکی کاشتنی استفاده شده‌اند. بااین‌حال، الزامات سخت‌گیرانه ایمنی، کنترل رهایش مواد فعال و پایداری بلندمدت، توسعه این سامانه‌ها را با چالش‌های فنی درخور توجهی همراه ساخته است [۱۸،۱۹].

به‌طورکلی، هرچند توسعه کامپوزیت‌های زیست‌پلیمر نقش مهمی در بهبود عملکرد و گسترش دامنه کاربرد زیست‌پلیمرها ایفا کرده است، اما چالش‌هایی نظیر پیچیدگی فرایند تولید، هزینه مواد تقویت‌کننده، سازگاری میان فازها و مقیاس‌پذیری صنعتی، همچنان موانعی جدی در مسیر تجاری‌سازی این سامانه‌ها به‌شمار می‌روند. ازاین‌رو، تمرکز پژوهش‌های اخیر بر طراحی کامپوزیت‌های ساده‌تر، کم‌هزینه و سازگار با زیرساخت‌های موجود صنعتی، به‌عنوان راهبرد کلیدی برای توسعه کاربردی این مواد مطرح شده است [۲۰].

انواع بسته‌بندی

بسته‌بندی فعال

بسته‌بندی فعال به‌عنوان یکی از رویکردهای نوین در صنعت بسته‌بندی مواد غذایی با هدف فراتر رفتن از نقش محافظتی غیرفعال و

مشارکت فعال در حفظ کیفیت و ایمنی مواد غذایی توسعه یافته است. در این سامانه‌ها، ماده بسته‌بندی یا پوشش خوراکی به‌گونه‌ای طراحی می‌شود که از طریق برهم‌کنش کنترل‌شده با ماده غذایی یا بسته‌بندی با جو اصلاح‌شده (MAP)، ماندگاری محصول را افزایش دهد و ویژگی‌های کیفی و حسی آن را در طول دوره نگهداری حفظ کند [۱۵،۱۶].

در بسته‌بندی‌های زیست‌تخریب‌پذیر خوراکی، فیلم‌ها و پوشش‌های خوراکی دو قالب اصلی به‌شمار می‌روند. فیلم‌های خوراکی معمولاً به‌شکل لایه‌های مستقل از زیست‌پلیمرها تولید شده و مشابه مواد بسته‌بندی متداول به‌کار گرفته می‌شوند. درحالی‌که پوشش‌های خوراکی مستقیماً بر سطح ماده غذایی اعمال شده و بخشی از محصول نهایی محسوب می‌شوند. هر دو سامانه بسته به ترکیب و ساختار، می‌توانند به‌عنوان سدهای نسبی دربرابر انتقال رطوبت، گازها و ترکیبات فرار عمل کرده و از رشد ریزاندامگان و آسیب‌های مکانیکی جلوگیری کنند [۱۶].

در مقایسه با پلیمرهای نفت‌پایه، فیلم‌ها و پوشش‌های خوراکی مزایایی نظیر زیست‌تخریب‌پذیری، زیست‌سازگاری و کاهش آثار زیست‌محیطی دارند. بااین‌حال، استحکام مکانیکی ضعیف، پایداری گرمایی محدود و نفوذپذیری بخار آب زیاد از مهم‌ترین محدودیت‌های عملکردی آن‌ها به‌شمار می‌رود. به‌منظور غلبه بر این چالش‌ها، راهبردهایی نظیر ترکیب زیست‌پلیمرها با یکدیگر، استفاده از افزودنی‌ها و طراحی سامانه‌های چندجزئی به‌طور گسترده بررسی شده‌اند [۱۷،۱۸].

از مهم‌ترین مزایای فیلم‌ها و پوشش‌های خوراکی، قابلیت استفاده از آن‌ها به‌عنوان حامل ترکیبات زیست‌فعال است. دراین‌حالت، بسته‌بندی افزون‌بر نقش بازدارندگی فیزیکی، عملکرد فعالی در کنترل فساد میکروبی، اکسایش و تغییرات نامطلوب کیفی ایفا می‌کند و تحت عنوان بسته‌بندی فعال شناخته می‌شود. ترکیباتی نظیر عوامل ضدمیکروب، ضداکسنده‌ها، جاذب‌های اکسیژن، پاک‌کننده‌های اتیلن و تنظیم‌کننده‌های رطوبت ازجمله افزودنی‌هایی هستند که در این سامانه‌ها به‌کار گرفته شده‌اند [۱۹،۲۰].

به‌طورکلی، بسته‌بندی فعال را می‌توان به دو دسته سامانه‌های جاذب و رهاساز تقسیم کرد. سامانه‌های جاذب با حذف ترکیبات نامطلوب نظیر اکسیژن، رطوبت یا اتیلن از فضای بسته، سرعت واکنش‌های فساد را کاهش می‌دهند. درحالی‌که سامانه‌های رهاساز با رهایش کنترل‌شده موادی مانند کربن دی‌اکسید، اتانول یا ترکیبات ضدمیکروب، محیط نگهداری مناسب‌تری برای محصول فراهم می‌سازند [۱۹].

در فیلم‌ها و پوشش‌های خوراکی، انتخاب ترکیبات فعال با محدودیت‌های ایمنی بیشتری همراه است، زیرا این مواد همراه با محصول مصرف می‌شوند. ازاین‌رو، تنها ترکیبات خوراکی و ایمن نظیر اسیدهای آلی، باکتریوسین‌ها، آنزیم‌ها، ترکیبات فنولی طبیعی و روغن‌های اسانسی مجاز به استفاده هستند. اگرچه این ترکیبات می‌توانند به‌طور مؤثر فعالیت ضدمیکروب و ضداکسنده ایجاد کنند، اما پایداری آن‌ها، کنترل رهایش و اثر احتمالی بر ویژگی‌های حسی محصول از چالش‌های مهم طراحی بسته‌بندی‌های فعال زیست‌پلیمرمحور محسوب می‌شوند [۷،۱۳].

ویژگی‌های اساسی فیلم و پوشش‌های زیست‌نانوکامپوزیتی برای میوه‌ها و سبزیجات

میوه‌ها و سبزیجات تازه به‌دلیل محتوای رطوبت و فعالیت متابولیکی زیاد ازجمله محصولات غذایی با ماندگاری کم محسوب می‌شوند. تداوم فرایندهای تنفس، تبادل گازها و رشد ریزاندامگان، موجب افت کیفیت، کاهش وزن و تغییرات نامطلوب ظاهری و حسی این محصولات می‌شود. دراین‌میان، طراحی سامانه‌های بسته‌بندی و پوشش‌های مناسب، نقش کلیدی در کنترل این فرایندها و افزایش ماندگاری پس از برداشت ایفا می‌کند [۲۲،۲۳].

از دیدگاه عملکردی، فیلم‌ها و پوشش‌های زیست‌نانوکامپوزیتی برای کاربرد در میوه‌ها و سبزیجات باید مجموعه‌ای از ویژگی‌های هم‌زمان را تأمین کنند. نفوذپذیری بخار آب کم برای کاهش فرایند تعرق و جلوگیری از کاهش وزن محصول ضروری است. همچنین، نفوذپذیری کنترل‌شده اکسیژن و کربن دی‌اکسید باید به‌گونه‌ای تنظیم شود که ضمن کاهش شدت تنفس، از ایجاد شرایط بی‌هوازی نامطلوب و تولید ترکیباتی مانند اتانول جلوگیری شود. افزون‌براین، استحکام مکانیکی مناسب برای تحمل تنش‌های حمل‌ونقل و توزیع و برخورداری از فعالیت ضدمیکروب، از الزامات اساسی این سامانه‌ها محسوب می‌شود [۲۴،۲۵].

دراین‌راستا، فیلم‌ها و پوشش‌های زیست‌نانوکامپوزیتی با بهره‌گیری از نانوپرکننده‌ها، به‌طور مؤثر قابلیت بهبود خواص سدی، مکانیکی و زیستی را دارند. وجود نانوذرات معدنی یا زیست‌نانوالیاف در ماتریس زیست‌پلیمری، مسیر نفوذ بخار آب و گازها را پیچیده‌تر می‌کند و ازدست‌رفتن رطوبت و کاهش وزن میوه‌ها و سبزیجات را محدود می‌سازد. افزون‌براین، پوشش‌های مزبور می‌توانند با ایجاد سد نیمه‌تراوا، بافت و ظاهر محصول را طی نگهداری حفظ کنند [۲۶]. امامی‌فر و باوایسی، نوعی پوشش زیست‌نانوکامپوزیتی برپایه سدیم آلژینات و نانوذرات روی اکسید را برای توت‌فرنگی توسعه دادند. نتایج نشان داد، وجود نانوذرات روی اکسید موجب بهبود

معنی‌دار خاصیت سدی دربرابر رطوبت می‌شود. همچنین، کاهش وزن میوه‌های پوشش‌یافته را در مقایسه با نمونه‌های شاهد به‌طور درخور ملاحظه کاهش می‌دهد، به‌طوری‌که پس از ۲۰ روز نگهداری، توت‌فرنگی‌های بی‌پوشش کاهش وزن بیشتری را نشان دادند [۲۷].

کنترل اکسیژن یکی از راهبردهای کلیدی در بسته‌بندی فعال میوه‌ها و سبزیجات است. زیرا وجود اکسیژن می‌تواند واکنش‌های اکسایشی، تغییر رنگ، کاهش مواد مغذی و تولید طعم‌های نامطلوب را شتاب دهد. ازاین‌رو، استفاده از فیلم‌ها و پوشش‌های خوراکی حاوی جاذب‌های اکسیژن یا سامانه‌های تنظیم‌کننده تبادل گازی، به‌طور گسترده مورد توجه قرار گرفته است [۲۶]. در این زمینه گزارش شده است، پوشش‌های نانوکامپوزیتی برپایه کیتوسان-نانولیفچه‌های سلولوز با کاهش نفوذپذیری اکسیژن، شدت تنفس و اکسایش را کاهش می‌دهند و کیفیت توت‌فرنگی را پس از برداشت به‌طور محسوسی بهبود می‌بخشند [۲۸].

همچنین مطالعات نشان داده‌اند، افزودن نانوذرات اکسید فلزی به فیلم‌های زیست‌پلیمری می‌تواند ضریب انتشار اکسیژن را کاهش دهد. به‌عنوان مثال، در فیلم‌های پلی‌لاکتیک اسید حاوی نانوذرات روی اکسید، کاهش نفوذپذیری اکسیژن موجب کاهش تنش اکسایشی و حفظ یکپارچگی غشای سلولی در میوه‌های تازه‌بریده شده است [۲۰]. مهار مؤثر اکسیژن، به‌طور غیرمستقیم از رشد باکتری‌های هوازی، رشد کپک و تخریب رنگ جلوگیری می‌کند [۱۴].

کنترل اتیلن نیز از دیگر جنبه‌های مهم در بسته‌بندی فعال میوه‌ها و سبزیجات به‌شمار می‌رود، زیرا این هورمون گیاهی نقش تعیین‌کننده‌ای در شتاب‌دهی رسیدگی، نرم‌شدگی و تخریب کلروفیل دارد. پوشش‌های نیمه‌تراوا و فیلم‌های نانوکامپوزیتی حاوی پاک‌کننده‌های اتیلن، قابلیت کاهش سطح این گاز را در اطراف محصول دارند و فرایند رسیدگی را به‌تأخیر می‌اندازند. دراین‌راستا گزارش شده است، فیلم‌های نانوکامپوزیتی حاوی نانوذرات مختلف، ضمن کاهش نفوذپذیری اکسیژن و بخار آب، رسیدگی کیوی عمل‌آوری‌شده با اتیلن را در طول نگهداری سرد به‌طور مؤثر به‌تأخیر انداخته‌اند [۱۵].

ازسوی‌دیگر، خواص ضدمیکروب از مهم‌ترین معیارهای ارزیابی فیلم‌ها و پوشش‌های زیست‌نانوکامپوزیتی برای میوه‌ها و سبزیجات است. نانوذرات به‌دلیل سطح ویژه زیاد و سازوکارهای مختلف مهار میکروبی، نقش مؤثری در کاهش رشد ریزاندامگان ایفا می‌کنند [۱۴،۱۶]. دراین‌زمینه، نتایج پژوهش امامی‌فر و باوایسی نشان داد، پوشش‌های حاوی ۱/۵٪ آلژینات سدیم و ۱/۲۵ g/L نانوذرات روی اکسید، کمترین رشد ریزاندامگان را در توت‌فرنگی نشان داده و ماندگاری محصول را تا ۲۰ روز افزایش داده‌اند [۲۷].

درمجموع، فیلم‌ها و پوشش‌های زیست‌نانوکامپوزیتی با فراهم‌سازی تعادل میان خواص سدی، مکانیکی و زیستی، گزینه کارآمدی برای افزایش ماندگاری و حفظ کیفیت میوه‌ها و سبزیجات تازه به‌شمار می‌روند. بااین‌حال، بهینه‌سازی ترکیب نانوپرکننده‌ها، کنترل ایمنی و ارزیابی آثار حسی ازجمله چالش‌هایی هستند که باید برای توسعه صنعتی این سامانه‌ها به آن‌ها توجه شود.

فیلم‌ها و پوشش‌های خوراکی برای بسته‌بندی فعال گوشت، ماهی و محصولات مشتق از آن‌ها

گوشت، ماهی و فراورده‌های مشتق از آن‌ها به‌دلیل محتوای زیاد آب، فعالیت آنزیمی و حساسیت زیاد به آلودگی میکروبی و اکسایش، ازجمله فسادپذیرترین محصولات غذایی محسوب می‌شوند. شرایط نگهداری نامناسب، به‌ویژه دمای بیشتر و زمان ذخیره‌سازی طولانی، می‌تواند به‌طور شایان توجهی سرعت فساد میکروبی و کاهش کیفیت این محصولات را افزایش دهد. ازاین‌رو، توسعه سامانه‌های بسته‌بندی فعال برپایه فیلم‌ها و پوشش‌های خوراکی، به‌عنوان راهکار مؤثری برای کنترل فساد و افزایش ماندگاری این محصولات مورد توجه گسترده قرار گرفته است [۱۷].

فیلم‌ها و پوشش‌های خوراکی استفاده‌شده در بسته‌بندی فعال گوشت و ماهی، معمولاً به‌گونه‌ای طراحی می‌شوند که دارای فعالیت‌های ضدمیکروب و ضداکسنده باشند یا به‌عنوان حامل ترکیباتی با این عملکردها عمل کنند. ترکیباتی نظیر روغن‌های اسانسی، عصاره‌های گیاهی، ترکیبات فنولی طبیعی و در برخی موارد پروبیوتیک‌ها، به‌طور گسترده در این سامانه‌ها به‌کار گرفته شده‌اند. این ترکیبات می‌توانند رشد ریزاندامگان بیماری‌زا و عوامل فساد را مهار کرده و هم‌زمان از واکنش‌های اکسایشی نامطلوب جلوگیری کنند [۱۶-۱۴].

اکسایش لیپیدها و پروتئین‌ها از مهم‌ترین سازوکارهای افت کیفیت در گوشت و ماهی است که به تغییرات نامطلوب در رنگ، عطر و طعم، بافت و ارزش تغذیه‌ای محصول منجر می‌شود. ضداکسنده‌های طبیعی استخراج‌شده از منابع گیاهی نظیر چای سبز، رزماری، آویشن، زنجبیل و دارچین به‌دلیل غنای زیاد ترکیبات فنولی به‌عنوان افزودنی‌های فعال در فیلم‌ها و پوشش‌های خوراکی بررسی شده‌اند. این ترکیبات عمدتاً ازطریق خنثی‌سازی رادیکال‌های آزاد و مهار گونه‌های فعال اکسیژن از پیشرفت واکنش‌های اکسایشی جلوگیری می‌کنند [۱۷].

حفظ ویژگی‌های حسی به‌ویژه رنگ و طعم، افزون‌بر کنترل

اکسایش و رشد میکروبی، نقش تعیین‌کننده‌ای در پذیرش مصرف‌کننده محصولات گوشتی و آبزیان دارد. رنگ گوشت به‌عنوان یکی از نخستین شاخص‌های ارزیابی کیفیت، ارتباط مستقیمی با تازگی محصول دارد و هرگونه تغییر نامطلوب آن می‌تواند موجب کاهش مقبولیت شود. فیلم‌ها و پوشش‌های خوراکی با نفوذپذیری گزینشی گازها، می‌توانند تعادل مناسبی بین اکسیژن و کربن دی‌اکسید ایجاد کرده و از تغییرات نامطلوب رنگ و طعم جلوگیری کنند [۲۹].

در سال‌های اخیر، استفاده از طعم‌دهنده‌ها و ترکیبات زیست‌فعال طبیعی در قالب بسته‌بندی فعال، به‌عنوان رویکردی چندمنظوره مطرح شده است. این ترکیبات افزون‌بر ایجاد یا حفظ طعم مطلوب، قابلیت نشان‌دادن فعالیت ضدمیکروب و ضداکسنده را به‌طور هم‌زمان دارند. بااین‌حال، پایداری این مواد دربرابر فرایندهای گرمایی و شرایط نگهداری و نیز کنترل رهایش آن‌ها از ماتریس فیلم، از چالش‌های مهم طراحی این سامانه‌ها محسوب می‌شود [۱۸].

به‌طورکلی، فیلم‌ها و پوشش‌های خوراکی فعال نقش مؤثری در مهار رشد میکروبی، کاهش اکسایش و حفظ کیفیت حسی گوشت، ماهی و فراورده‌های مشتق‌شده ایفا می‌کنند. بااین‌حال، ملاحظات ایمنی مصرف‌کننده، هزینه تولید و قابلیت پیاده‌سازی در مقیاس صنعتی، همچنان از عوامل محدودکننده توسعه تجاری این سامانه‌ها به‌شمار می‌روند. دراین‌راستا، طراحی فیلم‌های خوراکی برپایه منابع کم‌هزینه و محصولات جانبی صنایع غذایی، به‌ویژه سامانه‌های حاوی ترکیبات پروبیوتیک یا پری‌بیوتیک، به‌عنوان مسیرهای نویدبخش برای توسعه بسته‌بندی‌های فعال آینده مطرح شده‌اند [۱۹،۲۰].

بسته‌بندی هوشمند

بسته‌بندی هوشمند به سامانه‌هایی اطلاق می‌شود که قابلیت آن را دارند تا با پایش شرایط داخلی یا خارجی بسته، اطلاعاتی درباره کیفیت، ایمنی و وضعیت نگهداری ماده غذایی در طول زنجیره تأمین را ثبت کرده و به مصرف‌کننده یا توزیع‌کننده منتقل کنند. برخلاف بسته‌بندی‌های متداول، این سامانه‌ها نقش فعالی در اطلاع‌رسانی، تصمیم‌گیری و کاهش اتلاف مواد غذایی ایفا می‌کنند و می‌توانند تاریخچه‌ای از شرایط دما، زمان، ترکیب گازی و تازگی محصول را ارائه دهند [۱۰،۱۱].

از دیدگاه عملکردی، بسته‌بندی‌های هوشمند از سه مؤلفه اصلی شامل نشانگرها، حسگرها و حامل‌های داده تشکیل شده‌اند. نشانگرها معمولاً ازطریق تغییرات دیدنی مانند تغییر رنگ، اطلاعاتی درباره کیفیت یا فساد ماده غذایی ارائه می‌دهند، درحالی‌که حسگرها داده‌های کمّی‌تری از پارامترها نظیر دما، pH، گازها و متابولیت‌ها تولید می‌کنند. حامل‌های داده مانند بارکدهای دوبعدی و برچسب‌های تشخیص بسامد رادیویی (RFID) امکان ذخیره، انتقال و رهگیری اطلاعات محصول را در طول زنجیره تأمین فراهم می‌سازند [۱۳].

نشانگرهای دما و زمان–دما (TTI) از کاربردی‌ترین ابزارهای بسته‌بندی هوشمند به‌شمار می‌روند که برای غذاهای حساس به دما مانند گوشت، ماهی، فراورده‌های منجمد و لبنیات توسعه یافته‌اند. این نشانگرها تاریخچه دمایی محصول را در طول بسته‌بندی، ذخیره‌سازی، توزیع و خرده‌فروشی ثبت می‌کنند و ارزیابی ساده‌ای از ایمنی و کیفیت محصول در اختیار مصرف‌کننده قرار می‌دهند [۲۱]. بااین‌حال، استفاده از این سامانه‌ها در غذاهای مایع همچنان محدود بوده و نیازمند توسعه بیشتر است.

شاخص‌های شادابی و تازگی، به‌طور ویژه برای پایش فساد مواد غذایی طراحی شده‌اند و اغلب برپایه شناسایی متابولیت‌های حاصل از فعالیت میکروبی عمل می‌کنند. مقدار کل نیتروژن فرار پایه (total volatile basic nitrogen, TVB-N) برای محصولات پروتئینی، به‌ویژه ماهی، به‌عنوان شاخص اصلی فساد شناخته می‌شود. ازآنجاکه روش‌های تحلیلی کلاسیک برای اندازه‌گیری TVB-N زمان‌بر و پیچیده هستند، نشانگرهای رنگ‌سنج برپایه تغییر pH یا واکنش با ترکیبات فرار، به‌عنوان جایگزین‌های ساده و سریع درنظر گرفته شده‌اند [۱۳].

دراین‌راستا، استفاده از رنگ‌های حساس به pH و رنگ‌دانه‌های طبیعی مانند آنتوسیانین‌ها، کورکومین و عصاره‌های گیاهی در طراحی نشانگرهای شادابی گزارش شده است. این نشانگرها معمولاً با افزایش pH ناشی از فساد، تغییر رنگ مشخصی نشان می‌دهند و قابلیت استفاده به‌صورت برچسب‌های غیرتماسی درون بسته را دارند. چنین سامانه‌هایی در پایش تازگی میوه‌ها، سبزیجات، ماهی و گوشت کاربرد گسترده‌ای یافته‌اند [۱۳].

افزون‌بر نشانگرهای شادابی، حسگرهای رسیدگی نیز به‌عنوان ابزارهایی نوین در بسته‌بندی هوشمند معرفی شده‌اند. این حسگرها قابلیت نمایش وضعیت بلوغ میوه‌ها را با تشخیص ترکیبات فرار آزادشده در مراحل مختلف رسیدگی، دارند. نمونه تجاری RipeSense® یکی از شناخته‌شده‌ترین این سامانه‌هاست که با تغییر رنگ تدریجی برچسب، مراحل رسیدگی میوه را به مصرف‌کننده اطلاع می‌دهد [۱۳].

شاخص‌های نشتی نیز برای پایش یکپارچگی بسته‌بندی و حفظ ترکیب گازی مطلوب در بسته‌بندی با اتمسفر اصلاح‌شده (MAP) توسعه یافته‌اند. نقص در درزبندی می‌تواند موجب تغییرات ناخواسته

در غلظت گازها شود و بر کیفیت حسی و میکروبی محصول به‌طور جدی اثر بگذارد. ازاین‌رو، شاخص‌های نشتی نقش مهمی در تضمین عملکرد صحیح سامانه‌های بسته‌بندی ایفا می‌کنند [۲۰].

یکی از چالش‌های اصلی بسته‌بندی هوشمند، باوجود مزایای فراوان آن، نگرانی‌های ایمنی به‌ویژه در موارد تماس مستقیم اجزای هوشمند با ماده غذایی است. مهاجرت رنگ‌ها، نانوذرات یا ترکیبات شیمیایی به غذا، مانعی جدی در مسیر تجاری‌سازی این فناوری به‌شمار می‌رود. دراین‌زمینه، سازمان ایمنی غذایی اروپا (EFSA) دستورکارهایی برای ارزیابی ایمنی بسته‌بندی‌های هوشمند و فعال ارائه کرده است. همچنین، پژوهش‌های متعددی بر توسعه سامانه‌های چندلایه و غیرتماسی برای کاهش خطر مهاجرت متمرکز شده‌اند [۳۰].

پیشرفت‌های اخیر در حوزه نانوفناوری، نقش مهمی در توسعه بسته‌بندی‌های هوشمند ایفا کرده‌اند. نانومواد هوشمند با بهره‌گیری از نسبت سطح به حجم زیاد و قابلیت پاسخ‌دهی به محرک‌های محیطی، امکان طراحی سامانه‌هایی با حساسیت و دقت بیشتر را فراهم ساخته‌اند. تلفیق نانوفناوری با مواد هوشمند، افق‌های جدیدی را در پایش کیفیت، افزایش ایمنی و کاهش ضایعات مواد غذایی گشوده است. هرچند کنترل ایمنی، هزینه تولید و مقیاس‌پذیری صنعتی همچنان از چالش‌های کلیدی این حوزه به‌شمار می‌روند [۲۱].

مشکلات تولید انبوه فیلم‌های خوراکی

فیلم‌ها و پوشش‌های خوراکی برپایه زیست‌پلیمرها به‌عنوان گزینه‌های پایدار و ایمن برای بسته‌بندی مواد غذایی مطرح شده‌اند. اما با وجود مزایای زیست‌محیطی و عملکردی، استفاده از آن‌ها عمدتاً به مقیاس آزمایشگاهی محدود مانده است. چالش‌هایی نظیر ایمنی، هزینه تولید، پیچیدگی فرایند و عدم سازگاری کامل با زیرساخت‌های صنعتی موجود ازجمله موانع اصلی توسعه و تجاری‌سازی این سامانه‌ها محسوب می‌شوند [۱۳].

پلی‌ساکاریدها، ازمنظر ترکیب و ساختار، پروتئین‌ها و لیپیدها سه گروه اصلی زیست‌پلیمرهای استفاده‌شده در تولید فیلم‌های خوراکی هستند. فیلم‌های پلی‌ساکاریدی عموماً سدگری گازی مناسبی دارند، اما دربرابر بخار آب و تنش‌های مکانیکی عملکرد ضعیفی نشان می‌دهند. اگرچه فیلم‌های پروتئینی، استحکام مکانیکی بهتری را ارائه می‌کنند، اما همچنان نسبت به رطوبت حساس هستند. درمقابل، لیپیدها مقاومت زیادی دربرابر بخار آب دارند، اما به‌دلیل ناتوانی در تشکیل ساختارهای خودایستا، معمولاً به‌عنوان فاز مکمل در فیلم‌های ترکیبی به‌کار گرفته می‌شوند [۲۱].

برای دستیابی به عملکرد قابل‌قبول، یک فیلم خوراکی باید هم‌زمان ویژگی‌هایی نظیر استحکام مکانیکی مناسب، پایداری میکروبی، ایمنی زیستی، هزینه تولید کم و فراورش‌پذیری صنعتی را تأمین کند. بااین‌حال، در مقایسه با پلیمرهای نفت‌پایه، فیلم‌های خوراکی غالباً از ازدیاد طول تا پارگی و پایداری عملکردی کمتری برخوردارند و این موضوع استفاده گسترده آن‌ها را محدود می‌سازد [۲۱].

از چالش‌های اساسی در مسیر تولید انبوه، تعیین دقیق ویژگی‌های عملکردی فیلم‌هاست. خواصی نظیر استحکام کششی، مدول یانگ، کشیدگی در هنگام شکست، نفوذپذیری بخار آب و رنگ، شاخص‌های اصلی ارزیابی عملکرد فیلم‌های خوراکی به‌شمار می‌روند. درعین‌حال، این ویژگی‌ها باید به‌گونه‌ای بهینه شوند که ضمن حفاظت فیزیکی از محصول، مقبولیت مصرف‌کننده نیز حفظ شود [۱۳].

شکنندگی زیاد و انعطاف‌پذیری محدود از نقاط ضعف رایج فیلم‌های خوراکی است که عمدتاً به ماهیت آب‌دوست زیست‌پلیمرها بازمی‌گردد. افزودن نرم‌کننده‌ها یکی از راهکارهای متداول برای افزایش انعطاف‌پذیری این فیلم‌هاست. نرم‌کننده‌ها با کاهش برهم‌کنش‌های پلیمر-پلیمر و ایجاد پیوندهای پلیمر-نرم‌کننده، موجب افزایش تحرک زنجیرهای پلیمری می‌شوند. پلی‌ال‌ها، گلیکول‌ها، قندها و چربی‌ها ازجمله نرم‌کننده‌های رایج هستند که هریک اثر متفاوتی بر ریزساختار، شفافیت و خواص مکانیکی فیلم دارند [۷].

گرماپذیری و درزگیری گرمایی از دیگر الزامات مهم برای کاربرد صنعتی فیلم‌های خوراکی است. در این فرایند، فیلم‌ها تحت دما و فشار کنترل‌شده به یکدیگر متصل می‌شوند. دمای نامناسب می‌تواند موجب لایه‌لایه‌شدگی یا تغییرشکل فیلم شود. ازاین‌رو، تعیین دقیق شرایط گرمایی متناسب با ترکیب فیلم و نوع نرم‌کننده برای دستیابی به مهر و موم مؤثر و پایدار ضروری است [۲۲].

تولید فیلم‌های خوراکی در ابعاد بزرگ نیز از چالش‌های جدی مقیاس‌پذیری است. روش‌های متداول آزمایشگاهی مانند ریخته‌گری محلولی به زمان خشک‌شدن طولانی، مصرف انرژی زیاد و کنترل ضعیف ضخامت منجر می‌شوند. ناتوانی در تولید فیلم‌های یکنواخت با ابعاد بزرگ و زمان خشک شدن چندروزه، توسعه صنعتی این سامانه‌ها را با محدودیت مواجه کرده است [۲۳].

در این زمینه، روش‌های خشک‌سازی سریع‌تر نظیر خشک‌کردن ریزموجی، در خلأ، زیرقرمز و بخار داغ به‌عنوان گزینه‌های بالقوه برای کاهش زمان و مصرف انرژی مطرح شده‌اند. گزارش شده است، خشک‌کردن ریزموجی می‌تواند فیلم‌های خوراکی را در مدت چند دقیقه، بدون کاهش معنی‌دار در خواص سدی، تولید کند [۳۱].

عدم انطباق فرایندهای تولید فیلم‌های خوراکی با ماشین‌آلات متداول صنایع بسته‌بندی، یکی دیگر از موانع تجاری‌سازی است. درحالی‌که پلاستیک‌های سنتزی عمدتاً ازطریق فرایندهای ذوب و اکسترودکردن تولید می‌شوند، فیلم‌های خوراکی به فرایندهای ژلاتین‌سازی، پخش و خشک‌سازی وابسته‌اند. این تفاوت فرایندی، نیاز به تغییرات اساسی در تجهیزات صنعتی را مطرح می‌کند که معمولاً ازسوی صنعت با مقاومت مواجه می‌شود [۲۵].

ازمنظر دانش فنی، بیشتر مطالعات موجود بر اثر نوع زیست‌پلیمر، غلظت نرم‌کننده و رطوبت نسبی متمرکز بوده‌اند. درحالی‌که عوامل مهمی نظیر آرایش مولکولی، درجه تبلور، حجم آزاد، ضخامت فیلم و برهم‌کنش‌های میان اجزای فیلم، کمتر بررسی شده‌اند. همچنین، داده‌های مربوط به نفوذپذیری ترکیباتی مانند طعم‌دهنده‌ها، روغن‌ها و افزودنی‌ها بسیار محدود است [۳۲].

پذیرش مصرف‌کننده نیز از عوامل تعیین‌کننده در موفقیت تجاری فیلم‌های خوراکی محسوب می‌شود. نگرانی‌هایی نظیر ایمنی، قابلیت هضم، وجود مواد حساسیت‌زا و منشأ حیوانی برخی فیلم‌ها، می‌تواند مقبولیت این محصولات را کاهش دهد. اگرچه روغن‌های اسانسی و ترکیبات طبیعی اغلب به‌عنوان مواد ایمن معرفی می‌شوند، اما استفاده در غلظت‌های زیاد ممکن است به آثار سم‌شناختی یا واکنش‌های حساسیتی منجر شود [۳۳].

افزون‌بر ایمنی، ویژگی‌های ظاهری و حسی فیلم‌ها نظیر شفافیت، بی‌بو و بی‌مزه بودن و عدم تأثیر منفی بر ارزش تغذیه‌ای ماده غذایی، نقش مهمی در پذیرش مصرف‌کننده دارند. همچنین، برچسب‌گذاری شفاف مواد حساسیت‌زا و ترکیبات مشتق از منابع حیوانی به‌عنوان یکی از الزامات نظارتی، می‌تواند اعتماد مصرف‌کننده را افزایش دهد و پذیرش بازار را آسان سازد [۳۴].

درمجموع، تولید انبوه فیلم‌های خوراکی مستلزم رویکرد چندبعدی است که توسعه مواد، بهینه‌سازی فرایند، ارزیابی ایمنی و درک رفتار مصرف‌کننده را به‌طور هم‌زمان دربرمی‌گیرد. تنها با پاسخ‌گویی به این چالش‌ها می‌توان مسیر تجاری‌سازی پایدار فیلم‌های خوراکی را هموار ساخت.

نتیجه‌گیری

در سال‌های اخیر، فیلم‌ها و پوشش‌های خوراکی زیست‌پلیمرمحور به‌عنوان راهکارهای نوینی برای توسعه بسته‌بندی‌های پایدار و فعال مورد توجه گسترده قرار گرفته‌اند. بااین‌حال مرور نظام‌مند مطالعات نشان می‌دهد، بخش عمده پژوهش‌های انجام‌شده تنها بر مجموعه محدودی از ویژگی‌های عملکردی نظیر استحکام کششی، مدول یانگ و نفوذپذیری بخار آب متمرکز بوده و بسیاری از سایر پارامترهای تعیین‌کننده ازجمله پایداری بلندمدت، نفوذپذیری ترکیبات آروماتیک، مهاجرت افزودنی‌ها و برهم‌کنش فیلم با مواد غذایی، کمتر بررسی شده‌اند. این شکاف دانشی، مانع جدی در مسیر ارزیابی جامع عملکرد و ایمنی فیلم‌های خوراکی محسوب می‌شود. افزون‌براین، باوجود ادعای قابلیت مصرف فیلم‌های خوراکی همراه با مواد غذایی، شواهد تجربی مستند درباره زیست‌تخریب‌پذیری در شرایط واقعی مصرف، قابلیت هضم و ایمنی بلندمدت این سامانه‌ها محدود است. مطالعات مرتبط با ارزیابی سمیت، رفتار متابولیکی و آثار احتمالی ترکیبات فعال و نانومواد استفاده‌شده در فیلم‌های خوراکی، همچنان ناکافی بوده و نیازمند بررسی‌های سامانمندتر و استانداردشده هستند. ازمنظر تجاری‌سازی، پذیرش مصرف‌کننده از عوامل کلیدی موفقیت فیلم‌های خوراکی به‌شمار می‌رود. نتایج مطالعات نشان می‌دهد، مقبولیت این محصولات صرفاً به ویژگی‌های فنی و عملکردی محدود نمی‌شود، بلکه به عواملی نظیر ظاهر، شفافیت، خواص حسی، هزینه نهایی، سهولت استفاده و اعتماد مصرف‌کننده نیز وابسته است. فیلم‌های خوراکی باید بدون ایجاد تغییر نامطلوب در طعم، بو، رنگ و ارزش تغذیه‌ای ماده غذایی عمل کنند تا بتوانند در بازار رقابتی بسته‌بندی جایگاه مناسبی کسب کنند. دراین‌میان، نگرانی‌های مرتبط با وجود مواد حساسیت‌زا، ترکیبات مشتق از منابع حیوانی و استفاده از افزودنی‌های فعال با قابلیت بالقوه حساسیت‌زایی، می‌تواند پذیرش مصرف‌کننده را به‌طور درخور توجهی کاهش دهد. برچسب‌گذاری شفاف و دقیق مواد تشکیل‌دهنده، به‌ویژه برای حساسیت‌زاهای شناخته‌شده، نه‌تنها یک الزام نظارتی، بلکه ابزار مؤثری برای افزایش اعتماد مصرف‌کننده و پذیرش بازار محسوب می‌شود. درنهایت، توسعه فیلم‌های خوراکی کم‌هزینه با استفاده از محصولات جانبی صنایع غذایی و کشاورزی، به‌عنوان راهبرد امیدبخشی برای کاهش هزینه تولید و افزایش پایداری اقتصادی مطرح است. بااین‌حال، دستیابی به تجاری‌سازی موفق این فناوری، مستلزم رویکردی چندرشته‌ای است که توسعه مواد، بهینه‌سازی فرایندهای تولید، ارزیابی جامع ایمنی و درک رفتار مصرف‌کننده را به‌طور هم‌زمان دربرمی‌گیرد. تنها دراین‌صورت می‌توان انتظار داشت، فیلم‌ها و پوشش‌های خوراکی زیست‌پلیمرمحور از مرحله پژوهش آزمایشگاهی عبور کنند و به راهکارهای عملی و قابل‌اعتماد در صنعت بسته‌بندی مواد غذایی تبدیل شوند.

مراجع

1. Jiménez A., Fabra M.J., Talens P., and Chiralt A., Edible and Biodegradable Starch Films: A Review, *Food Bioproc. Technol.*, **5**, 2058–2076, 2012.
2. Otoni C.G., Avena-Bustillos R.J., Azeredo H.M.C. et al., Recent Advances on Edible Films and Coatings, *Compr. Rev. Food Sci. Food Saf.*, **16**, 1151–1169, 2017.
3. Miller K.S. and Krochta J.M., Oxygen and Aroma Barrier Properties of Edible Films, *Trends Food Sci. Technol.*, **8**, 228–237, 1997.
4. Rhim J.W. and Ng P.K.W., Natural Biopolymer-Based Nanocomposite Films, *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.*, **47**, 411–433, 2007.
5. Jeya Jeevahan J., Chandrasekaran M., Venkatesan S.P. et al., Scaling Up Difficulties and Commercial Aspects of Edible Films, *Trends Food Sci. Technol.*, **100**, 210–222, 2020.
6. Labuza T.P. and Breene W.M., Applications of Active Packaging, *J. Food Proc. Preserv.*, **13**, 1–69, 1989.
7. Han J.H., Antimicrobial Food Packaging, *Food Technol.*, **54**, 56–65, 2000.
8. Yildirim S., Röcker B., Pettersen M.K., Nilsen-Nygaard J., and Ayhan Z., Active Packaging Applications for Food, *Compr. Rev. Food Sci. Food Saf.*, **17**, 165–199, 2018. doi: 10.1111/1541-4337.12322.
9. Umaraw P., Munekata P.E., Verma A.K. et al., Edible Films/Coating with Tailored Properties for Active Packaging of Meat, Fish and Derived Products, *Trends Food Sci. Technol.*, **98**, 10–24, 2020.
10. Kalpana S., Priyadarshini S.R., Leena M.M., Moses J.A., and Anandharamakrishnan C., Intelligent Packaging: Trends and Applications in Food Systems, *Trends Food Sci. Technol.*, **93**, 145–157, 2019. doi: 10.1016/j.tifs.2019.09.008.
11. Biji K.B., Ravishankar C.N., Mohan C.O., and Srinivasa Gopal T.K., Smart Packaging Systems for Food Applications: A Review, *J. Food Sci. Technol.*, **52**, 6125–6135, 2015. doi: 10.1007/s13197-015-1766-7.
12. Nilsen-Nygaard J., Fernández E.N., Radusin T. et al., Current Status of Biobased and Biodegradable Food Packaging Materials: Impact on Food Quality and Effect of Innovative Processing Technologies, *Compr. Rev. Food Sci. Food Saf.*, **20**, 1333–1380, 2021. doi: 10.1111/1541-4337.12715.
13. Prajapati S.K., Jain A., Jain A., and Jain S., Biodegradable Polymers and Constructs, *Eur. Polym. J.*, **120**, 109191, 2019.
14. Elsabee M.Z. and Abdou E.S., Chitosan-Based Edible Films and Coatings: A Review, *Mater. Sci. Eng.: C*, **33**, 1819–1841, 2013. doi: 10.1016/j.msec.2013.01.010.
15. Hassan B., Chatha S.A.S., Hussain A.I., Zia K.M., and Akhtar N., Recent Advances on Polysaccharides, Lipids and Protein-Based Edible Films and Coatings: A Review, *Int. J. Biol. Macromol.*, **109**, 1095–1107, 2018. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2017.11.097.
16. Jayakody M.M., Vanniarachchy M.P.G., and Wijesekara I., Seaweed-Derived Alginate, Agar, and Carrageenan-Based Edible Coatings and Films for the Food Industry: A Review, *J. Food Meas. Charact.*, **16**, 1195–1227, 2022. doi: 10.1007/s11694-021-01277-y.
17. Sikareepaisan P., Ruktanonchai U., and Supaphol P., Alginate-Based Films for Food Packaging Applications, *Carbohydr. Polym.*, **83**, 1457–1469, 2011.
18. Pacheco M.S., Barbieri D., da Silva C.F., and de Moraes MA., A Review on Orally Disintegrating Films (ODFs) Made from Natural Polymers such as Pullulan, Maltodextrin, Starch, and Others, *Int. J. Biol. Macromol.*, **178**, 504–513, 2021.
19. León-López A., Morales-Peñaloza A., Martínez-Juárez V.M., Vargas-Torres A., Zeugolis D.I., and Aguirre-Álvarez G., Hydrolyzed Collagen—Sources and Applications, *Molecules*, **24**, 4031, 2019.
20. Garcia V.A.S. et al., Gelatin/Starch Orally Disintegrating Films as a Promising System for Vitamin C Delivery, *Food Hydrocoll.*, **79**, 127–135, 2018.
21. Campo V.L., Kawano D.F., Silva D.B., and Carvalho I., Carrageenans: Biological Properties, Chemical Modifications and Structural Analysis, *Carbohydr. Polym.*, **77**, 167–180, 2009.
22. Rhim J.W., Park H.M., and Ha C.S., Bio-Nanocomposites for Food Packaging Applications, *Prog. Polym. Sci.*, **38**, 1629–1652, 2013.
23. Sorrentino A., Gorrasi G., and Vittoria V., Potential Perspectives of Bio-Nanocomposites for Food Packaging Applications, *Trends Food Sci. Technol.*, **18**, 84–95, 2007.
24. Azeredo H.M.C., Nanocomposites for Food Packaging Applications, *Food Res. Int.*, **42**, 1240–1253, 2009.
25. Al-Tayyar N.A., Youssef A.M., and Al-Hindi R.R., Antimicrobial Food Packaging Based on Sustainable Materials, *Food Chem.*, **310**, 125915, 2020.
26. Ghanbarzadeh B. and Oromiehie A., Edible Films and Coatings in Food Packaging Applications, *J. Appl. Polym. Sci.*, **109**, 2848–2854, 2008.
27. Emamifar A. and Bavaisi S., Nanocomposite Coating Based on Sodium Alginate and Nano-ZnO for Extending the Storage Life of Fresh Strawberries (Fragaria × ananassa Duch.), *J. Food Meas. Charact.*, **14**, 1012–1024, 2020. doi:10.1007/s11694-019-00350-x
28. Costa S.M., Ferreira D.P., Teixeira P., Ballesteros L.F., Teixeira

of Whey Protein Isolate Edible Films, *J. Food Eng*., **43**(2), 91–96, 2000.

32. Bhardwaj N. and Kundu S.C., Electrospinning of Polymer Nanofibers for Tissue Engineering Applications, *Biotechnol. Adv.*, **28**, 325–347, 2010.
33. Atarés L. and Chiralt A., Essential Oils as Additives in Biodegradable Films and Coatings for Active Food Packaging, *Trends Food Sci. Technol.*, **48**, 51–62, 2016. doi: 10.1016/j.tifs. 2015.12.001.
34. Regulation (EU) No 1169/2011 of the European Parliament and of the Council on the Provision of Food Information to Consumers. Available at: https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2011/1169/oj.

J.A., and Fangueiro R., Active Natural-Based Films for Food Packaging Applications: The Combined Effect of Chitosan and Nanocellulose, *Inter. J. Biol. Macromol.*, **177**, 241–251, 2021. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2021.02.105
29. Kerry J.P., O'Grady M.N., and Hogan S.A., Past, Current and Potential Utilisation of Active and Intelligent Packaging Systems for Meat and Muscle-Based Products: A Review, *Meat Sci.*, **74**, 113–130, 2006.
30. European Food Safety Authority (EFSA), Guidelines on Submission of a Dossier for Safety Evaluation by EFSA of Active or Intelligent Substances Present in Active and Intelligent Materials, *EFSA J.*, **7**, 1208, 2009. doi: 10.2903/j.efsa.2009.1208.
31. Kaya S. and Kaya A., Microwave Drying Effects on Properties