

Polymerization
Quarterly, 2024
Volume 14, Number 3
Pages 58-69
ISSN: 2252-0449

Self-Healing of Polymeric Food Packaging

Reza Bagheri-Renani¹, Fatemeh Arabgol^{1*}, and Azin Paydayesh²

1. Department of Materials, Chemical and Polymer Engineering, Buein Zahra Technical University, Buein Zahra, Postal Code 3451866391, Qazvin, Iran

2. Department of Chemical Engineering, Mahshahr Branch, Islamic Azad University, Mahshahr, Iran

Received: 10 March 2024, Accepted: 5 August 2024

Abstract

The use of self-healing polymer materials in the form of film or coating in the food packaging industry can be very promising, because in case of damage, they can automatically repair and restore the integrity of their surface and characteristics by themselves. Packages are usually inevitably and imperceptibly damaged during transportation, handling and storage. In this case, the damaged parts of common packages, which lack self-healing ability, become susceptible to microbial growth due to exposure to the environment. This may endanger the quality and safety of food products. Within the realm of food packaging research, self-healing films and coatings have been developed using both intrinsic and non-intrinsic mechanisms. The former involves non-automatic self-healing in the presence of an external stimulus, while the latter mechanism enables automatic self-repair. In this study, self-healing mechanisms and the associated films and coatings have been explored and the feasibility and benefits of incorporating these materials into the realm of food packaging have been investigated. It should be mentioned that so far self-healing films and coatings have primarily been developed and examined mainly on a laboratory scale in order to conduct scientific studies. Moreover, recent review articles have rarely considered the real limitations of the industry in relation to improving the practical application of these films and coatings in the food packaging sector. Therefore, unlike previous studies, the present study has also examined the specific challenges of the industry in the field of self-healing packaging development and emphasized their importance.

Key Words

self-healing,
mechanism,
food packaging,
film,
coating

(*) To whom correspondence should be addressed.
E-mail: f.arabgol@bzte.ac.ir

خودترمیمی بسته‌بندی پلیمری مواد غذایی

رضا باقری رنانی^۱، فاطمه عربگل^{۲*}، آذین پیدایش^۲

۱- قزوین، بوئین زهرا، مرکز آموزش عالی فنی و مهندسی بوئین زهرا، گروه مهندسی مواد، شیمی و پلیمر،

کدپستی ۳۴۵۱۸۶۶۳۹۱

۲- ماهشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد ماهشهر، گروه مهندسی شیمی

دریافت: ۱۴۰۲/۱۲/۲۰، پذیرش: ۱۴۰۳/۵/۱۵

کاربرد مواد پلیمری خودترمیم به شکل فیلم یا پوشش در صنعت بسته‌بندی مواد غذایی می‌تواند بسیار امیدوارکننده باشد. زیرا این بسته‌بندی‌ها در صورت آسیب‌دیدگی می‌توانند خودبه‌خود یکپارچگی سطح و ویژگی‌های خود را ترمیم و بازیابی کنند. بسته‌بندی‌ها معمولاً به‌طور اجتناب‌ناپذیر و نامحسوس طی حمل‌ونقل، جابه‌جایی و ذخیره‌سازی آسیب می‌بینند. در این صورت، بخش‌های آسیب‌دیده بسته‌بندی‌های رایج، که فاقد قابلیت خودترمیمی هستند، به دلیل قرارگیری در معرض محیط، مستعد رشد میکروبی می‌شوند. این موضوع ممکن است، کیفیت و امنیت ماده غذایی را به‌خطر اندازد. در حال حاضر، در مطالعات مربوط به بسته‌بندی مواد غذایی، فیلم‌ها و پوشش‌های خودترمیم براساس سازوکارهای ذاتی و غیرذاتی توسعه یافته‌اند. به‌طور خلاصه، خودترمیمی در سازوکار اول با وجود محرک خارجی به‌طور غیرخودکار و در سازوکار دوم به‌طور خودکار رخ می‌دهد. در این مطالعه، به سازوکارهای خودترمیمی، فیلم‌ها و پوشش‌های برپایه آن‌ها پرداخته شده و کاربرد آن‌ها در زمینه بسته‌بندی مواد غذایی بررسی شده است. گفتنی است، تاکنون فیلم‌ها و پوشش‌های خودترمیم، عمدتاً در مقیاس آزمایشگاهی به‌منظور انجام مطالعات علمی ساخته و بررسی شده‌اند. مقالات مروری اخیر نیز به‌ندرت به محدودیت‌های واقعی صنعت در ارتباط با بهبود کاربرد عملی این فیلم‌ها و پوشش‌ها در بخش بسته‌بندی مواد غذایی پرداخته‌اند. از این رو، مطالعه حاضر برخلاف مطالعات پیشین، چالش‌های خاص صنعت در زمینه توسعه بسته‌بندی‌های خودترمیم را نیز بررسی و بر اهمیت آن‌ها تأکید کرده است.

بسپارش
فصلنامه علمی
سال چهاردهم، شماره ۳،
صفحه ۶۹-۵۸، ۱۴۰۳
ISSN: 2252-0449

چکیده



رضا باقری رنانی



فاطمه عربگل



آذین پیدایش

واژگان کلیدی

خودترمیمی،
سازوکار،
بسته‌بندی مواد غذایی،
فیلم،
پوشش

مقدمه

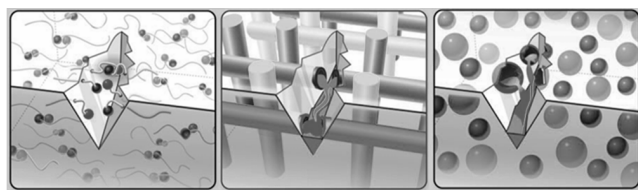
هر ساله، هزاران نفر به دلیل بیماری‌های منتقل شده از غذا آسیب می‌بینند. شیوع این بیماری‌ها، هزینه‌های زیادی بر جامعه تحمیل می‌کنند و بنابراین اهمیت جهانی دارند. بیش از ۲۵۰ بیماری مختلف منتقل شده از غذا تعریف شده است که بیشتر آن‌ها ناشی از بیماری‌زاهای غذایی هستند. این بیماری‌زها می‌توانند از طریق غذا منتقل شوند و گاهی پیامدهای شدید و کشنده‌ای داشته باشند. دسته دیگر بیماری‌های منتقل شده از غذا، مسمومیت‌های ناشی از اثر سموم مضر یا مواد شیمیایی آلاینده غذا مانند قارچ‌های سمی هستند. از راه‌های جلوگیری از بروز این مشکلات، بسته‌بندی کردن مواد غذایی است. وظیفه اصلی بسته‌بندی مواد غذایی در درجه اول، محافظت از مواد غذایی در برابر آلودگی‌های محیطی و تضمین ایمنی آن‌هاست. امروزه با پیشرفت صنعت بسته‌بندی، این مواد قابلیت محافظت از مواد غذایی در برابر سایر آثار محیطی مانند بو، ضربه، گرد و غبار، دما، آسیب‌های فیزیکی، نور، ریزاندامگان و رطوبت را دارند که بدین ترتیب، عمر مفید مواد غذایی را نیز افزایش می‌دهند [۱-۳].

پیشینه بسته‌بندی مواد غذایی به دوران ماقبل تاریخ بازمی‌گردد. با توجه به اهمیت این موضوع، کاربرد صنعتی آن از قرن هجدهم میلادی آغاز شد و در قرن بیستم نیز پیشرفت‌های بسیاری در فناوری بسته‌بندی به وجود آمد. تاکنون مواد مختلفی برای بسته‌بندی مواد غذایی به کار گرفته شده‌اند. به عنوان مثال، می‌توان فلزات، شیشه و پلیمرها را نام برد که گسترده‌ترین مطالعات درباره این مواد با پیشرفت فناوری بسته‌بندی درباره پلیمرها انجام شده است. زیرا پلیمرها، انعطاف‌پذیری ساختاری زیادی دارند که قابلیت اصلاح ویژگی‌های آن‌ها را فراهم می‌کند. پلیمرها در کاربرد بسته‌بندی می‌توانند به شکل فیلم یا پوشش استفاده شوند. گفتنی است، فیلم‌ها با پوشش‌ها از این جهت متفاوت‌اند که فیلم‌ها ساختارهای مستقلی هستند که به‌طور جداگانه تشکیل شده‌اند، در حالی که پوشش‌ها مستقیماً روی سطح غذا تشکیل می‌شوند و می‌توانند عملکردهای مناسبی نیز ارائه دهند [۴، ۵]. به عنوان مثال، پژوهشگران پوشش‌هایی بر پایه آلزینات و تقویت‌کننده‌های روغن سیر و ژل آلئوئورا تهیه و خواص و قابلیت آن‌ها را برای افزایش زمان ماندگاری گوجه‌فرنگی مطالعه کردند. آن‌ها دریافتند، پوشش‌های تهیه‌شده، خواص سدگری و ضد میکروب خوبی دارند و حفاظت مناسبی را در برابر تابش فرابنفش نشان می‌دهند. فاسد شدن سطح گوجه‌هایی که به روش غوطه‌وری پوشش یافتند نیز در طول ۱۶ روز نگهداری در دمای محیط، درخور توجه نبود و تنها

۸ درصد از جرم آن‌ها از دست رفته بود. این در حالی است که فاسد شدن سطح گوجه‌های بی‌پوشش از روز ششم آغاز شد و در طول دوره نگهداری و انبارش، ۴۷ درصد از جرم آن‌ها از دست رفته بود [۶]. در مطالعه دیگر، کارایی فیلم‌های کامپوزیتی تهیه‌شده بر پایه کربوکسی متیل کیتوسان و پکتین و تقویت‌کننده‌های روغن میخک و آنتوسیانین بلوبری، برای بسته‌بندی میوه توت‌فرنگی بررسی شده است. این فیلم‌ها که قابلیت سدگری در برابر بخار آب و ویژگی‌های ضد اکسندگی و ضد میکروب خوبی را نشان دادند، عملکرد مناسب آن‌ها در بسته‌بندی نیز تأیید شد. زیرا توت‌فرنگی‌های بسته‌بندی شده در طول ۷ روز نگهداری و انبارش عاری از رشد باکتری‌های فاسدکننده بوده و مقدار کمی از جرم آن‌ها از دست رفته بود. در حالی که کپک‌هایی روی سطح توت‌فرنگی‌های بدون بسته‌بندی در روز پنجم نگهداری و انبارش، مشاهده شد و در روز هفتم، به وضوح فاسد شدند. همچنین، کاهش جرم شایان توجهی را نیز نشان دادند [۷].

با وجود پیشرفت‌های رخ داده در صنعت بسته‌بندی مواد غذایی، این بسته‌بندی‌ها تنها زمانی می‌توانند کیفیت و ایمنی مواد غذایی را تضمین کنند که بدون آسیب باقی بمانند. با توجه به اینکه بسته‌بندی‌ها در زمان حمل و نقل، جابه‌جایی و انبارش آسیب‌پذیرند، در صورت صدمه دیدن آن‌ها، قابلیت محافظت از مواد غذایی در برابر آثار خارجی آن‌ها کاهش می‌یابد. از سوی دیگر، به دلیل پرهزینه و زمان‌بر بودن پوشش‌دهی مجدد مواد غذایی یا تعمیر و تعویض بسته‌بندی آن‌ها و همچنین قابل مشاهده نبودن حفره‌ها و ترک‌های ریز در بسته‌بندی برای چشم انسان، نیاز است تا راهبرد دیگری برای پاسخ به این مشکل به کار گرفته شود. راهکار مناسب این است که بسته‌بندی‌های مواد غذایی قابلیت خودترمیمی داشته باشند. در سال ۱۹۷۰، Malinsky و همکاران برای نخستین بار مواد خودترمیم را روی چند لایه‌های ورق آلومینیم و پلی‌وینیل استات مطالعه کردند. اما از آن زمان تاکنون، تلاش‌های اندکی برای بررسی پیشرفت‌های مرتبط در زمینه بسته‌بندی پلیمری مواد غذایی و مطالعه سازوکارهای آن انجام شده است [۸، ۹].

نمودار نتایج جست‌وجو در پایگاه علمی Web of Science (WOS)، با استفاده از کلیدواژه‌های مربوط به خودترمیمی و بسته‌بندی مواد غذایی در شکل ۱ آمده است. این نمودار نشان می‌دهد، انجام مطالعات علمی در زمینه خودترمیمی بسته‌بندی‌های مواد غذایی از سال ۲۰۱۷ آغاز شده و تعداد مقالات به چاپ رسیده در این زمینه، همچنان اندک است. با این حال، روند روبه‌رشد این مطالعات در سال‌های اخیر امیدوارکننده است، هر چند که تعداد کمی از آن‌ها به



شکل ۲- عملکرد انواع سازوکارهای خودترمیمی: (الف) سازوکار غیرذاتی (بر پایه سامانه کپسولی)، (ب) سازوکار غیرذاتی (بر پایه سامانه رگ دار) و (پ) سازوکار ذاتی [۱۰].

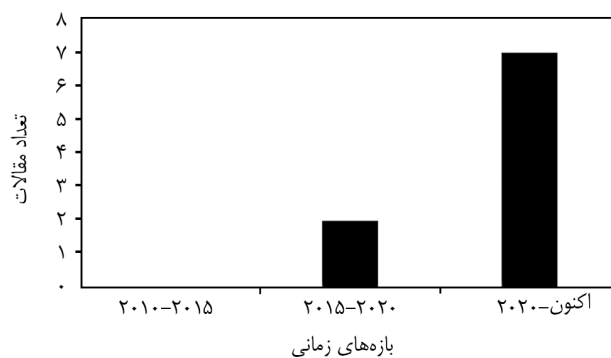
شکل ۲- عملکرد انواع سازوکارهای خودترمیمی: (الف) سازوکار غیرذاتی (بر پایه سامانه کپسولی)، (ب) سازوکار غیرذاتی (بر پایه سامانه رگ دار) و (پ) سازوکار ذاتی [۱۰].

محیط قرار می گیرد و مستعد رشد میکروبی می شود. بنابراین، تقاضا برای پوشش های خودترمیم به دلیل طول عمر بیشتر و پایداری بهتر در مقایسه با پوشش های سنتی افزایش یافته است [۹].

سازوکارهای خودترمیمی

در حال حاضر، قابلیت خودترمیمی در مواد بسته بندی، مانند پوشش ها یا فیلم ها از طریق دو سازوکار ذاتی و غیرذاتی (extrinsic) قابل دستیابی است. به طور کلی درباره تفاوت این دو سازوکار می توان گفت، سازوکار غیرذاتی به طور خودکار عمل می کند. عوامل ترمیم کننده درون ماتریس با آسیب دیدگی ماتریس پلیمری که در سامانه کپسولی یا رگ دار جاگذاری شده اند، آزاد می شوند و آسیب وارد شده به ماتریس را ترمیم می کنند. این در حالی است که فرایند خودترمیمی ذاتی، به طور غیر خودکار با وجود محرک خارجی (مانند گرما، نور یا میدان مغناطیسی) انجام می گیرد و بر اساس برهم کنش های برگشت پذیر در ماتریس و بازسازی پیوندها در آن عمل می کند [۴، ۸، ۹]. در شکل ۲، عملکرد سازوکارهای خودترمیمی با یکدیگر مقایسه شده است [۱۰].

در سازوکار خودترمیمی غیرذاتی، ماتریس پلیمری خود به خود و بدون استفاده از عامل ترمیم کننده، ترمیم پذیر نیست. بنابراین، عامل ترمیم کننده به عنوان فاز جدا شده باید در محفظه هایی ذخیره شود که از قبل درون ماتریس پراکنده شده اند. بر اساس نوع محفظه، سازوکار غیرذاتی می تواند به دو دسته ترمیم بر پایه سامانه کپسولی و ترمیم بر پایه سامانه رگ دار، طبقه بندی شود. همچنین در برخی از سامانه های خودترمیم غیرذاتی از کاتالیزگر نیز استفاده می شود. بر این اساس، سازوکار خودترمیمی غیرذاتی می تواند کاتالیزی یا غیر کاتالیزی نیز باشد. با این حال، کاتالیزگرها نیز باید در سامانه کپسولی یا رگ دار جاگذاری شوند. باید گفت دلیل استفاده از کاتالیزگر در این سامانه ها این است که بتوان با شروع واکنش شیمیایی، عامل ترمیم کننده سیال را در محل آسیب دیدگی به



شکل ۱- نمودار پیشینه و روند مطالعات علمی انجام شده درباره خودترمیمی بسته بندی های مواد غذایی بر اساس نتایج جست و جو در پایگاه Web of Science.

محدودیت های صنعتی توجه داشته اند. از این رو در مطالعه حاضر، افزون بر بررسی سازوکارهای خودترمیمی در فیلم ها و پوشش های پلیمری، مزایا و محدودیت های استفاده از آنها در زمینه بسته بندی مواد غذایی و همچنین چالش های صنعتی مرتبط مرور شده و بر لزوم انجام پژوهش های بیشتر برای رفع آنها تأکید شده است. با برطرف شدن این محدودیت ها و در دسترس قرارگیری بسته بندی های خودترمیم، عمر مواد غذایی بسته بندی شده در صورت آسیب دیدن پوشش بسته بندی از طریق بازیابی خواص ویژه آن، مانند خاصیت سدگری در برابر اکسیژن، می تواند تا حد ممکن افزایش یابد.

خودترمیمی و بسته بندی های خودترمیم

ویژگی خودترمیمی، خاصیتی است که به طور طبیعی در مواد زیستی یافت می شود. بنابراین، زیست شناسی آنها می تواند برای طراحی مواد خودترمیم مصنوعی استفاده شود. به طور کلی، این ویژگی به قابلیت یک ماده برای بازیابی یا ترمیم در برابر آسیب ها بدون مداخله خارجی اشاره دارد [۹].

مواد مختلف مانند پلیمرها، فلزات و سرامیک ها می توانند برای طراحی سازوکارهای خودترمیمی به کار گرفته شوند. البته پلیمرهای خودترمیم به دلیل قابلیت آنها در افزایش عمر مفید مواد که باعث کاهش اتلاف منابع و انرژی می شوند، مورد توجه بیشتری قرار گرفته اند. گفتنی است، مواد پلیمری بدون خاصیت خودترمیمی نیز در کاربرد بسته بندی مواد غذایی عملکرد مثبتی داشته اند. به طور مثال، بر مبنای مطالعات مختلف استفاده از پوشش های خوراکی روی میوه ها و سبزیجات می تواند ماندگاری آنها را طولانی تر کند. اما این پوشش ها مستعد آسیب دیدگی هستند که ممکن است بر کیفیت غذا اثر منفی بگذارد. زیرا ناحیه آسیب دیده در معرض

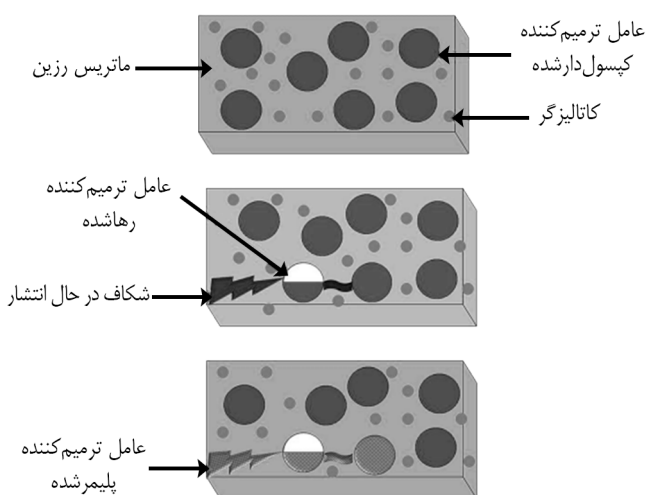
در سامانه کپسول و کاتالیزگر، کاتالیزگر گراب (عامل پلیمر شدن سیال ترمیم کننده) به همراه عامل ترمیم کننده کپسول دار شده در رزین ماتریس قرار می گیرد. هنگامی که در ماتریس در اثر آسیب دیدگی ترک ایجاد می شود، در ابتدا این ترکها ریزکپسولها را می شکافند و از این طریق عامل ترمیم کننده به واسطه عمل مویینه به سوی محل ترک خورده آزاد می شود. ترکهای ایجاد شده باعث می شوند تا کاتالیزگر پراکنده شده به طور تصادفی در ماتریس با مایع ترمیم کننده تماس پیدا کند و در نتیجه باعث فرایند پلیمر شدن شود. سطوح ترک خورده در اثر آن، بسته می شوند و ترمیم آسیب، انجام می گیرد. این در حالی است که در سامانه دوکپسولی، به جای داشتن کپسول و کاتالیزگر جاگذاری شده در رزین پلیمری، مونومر و عامل پلیمر شدن یا سخت کننده به طور جداگانه کپسول دار شده و در کامپوزیت پلیمری تعبیه می شوند. در این سامانه با تشکیل ترک و شکافته شدن کپسولها، مونومر در تماس با سخت کننده پلیمر می شود و در نهایت ترکها ترمیم می یابند. از سوی دیگر، در سامانه تک کپسولی، تنها کپسولهای حاوی حلال در ماتریس پلیمری گرماسخت، گنجانده می شوند و حلال در این سامانه به عنوان عامل ترکننده روی سطح پلیمر عمل می کند. این کار، باعث تورم توده پلیمر می شود که به خزش و درهم گیری زنجیرها در ناحیه ترک خورده منجر می شود. بدین گونه ترک ترمیم و خواص مکانیکی کامپوزیت بازیابی می شود [9-11].

شیوه کارکرد سازوکار خود ترمیمی برپایه سامانه های رگ دار همانند آن چیزی است که در سامانه های کپسولی رخ می دهد. با این تفاوت که در سامانه رگ دار، عامل ترمیم کننده در ساختاری به شکل مویرگ یا شبکه ای از کانالهای توخالی، جاگذاری شده است. این شبکه در ماتریس پلیمری قرار می گیرد و می تواند به صورت یک بعدی یا کانالهای آن به شکل دوبعدی یا سه بعدی به هم متصل شده باشند. سامانه های رگ دار نسبت به سامانه های کپسولی می توانند مقدار بیشتری از مواد ترمیم کننده را ذخیره کنند و قابلیت ترمیم ترکهایی با ابعاد بزرگتر را نیز دارند. همچنین، شبکه های تشکیل شده از کانالهای توخالی که در این سامانه ها وجود دارند، می توانند به عنوان تقویت کننده نیز عمل کنند. نخستین بار در سال 1993، Dry و همکاران ایده بازیابی آسیب وارد شده با عامل ترمیم کننده ذخیره شده در ریزالیاف توخالی را ارائه کردند. از این رو، کاربرد الیاف و لوله های توخالی از جنس شیشه به طور یک بعدی از روش های مرسوم خود ترمیمی غیرذاتی است. نمونه ای از این کاربرد در شکل 4 نشان داده شده است. از سوی دیگر، سامانه های دوبعدی و سه بعدی که طرحی از آنها در شکل 5 آورده

حالت جامد تبدیل کرد و از این طریق یکپارچگی سطح را بازیابی کرد. در سازوکار غیرذاتی، عامل ترمیم کننده باید درون ماتریس پلیمری پایدار باشد و بتواند تا محل آسیب جریان یابد. همچنین، فوراً واکنش نشان دهد تا در زمان معقولی بازیابی حاصل شود [9, 11, 12].

در سال 2001، White و همکاران برای نخستین بار کامپوزیت پلیمری خود ترمیم برپایه سامانه کپسولی را معرفی کردند. پس از آن، عصر جدیدی از پوشش های پلیمری خود ترمیم آغاز شد. در این کامپوزیت از دی سیکلوپنتادی ان (DCPD) به عنوان عامل ترمیم کننده مونومری استفاده شد که در ریزکپسولهای ساخته شده از اوره فرمالدهید ذخیره شده بود. این ریزکپسولها نیز به طور پراکنده درون ماتریس پلیمری جاگذاری شده بودند. عملکرد این کامپوزیت بدین شکل بود که پس از انتشار ترک، ریزکپسولها از هم گسیخته می شوند و پس از برقراری تماس عامل ترمیم کننده با کاتالیزگر گراب (Grubb) پراکنده در ماتریس، واکنش پلیمر شدن آغاز می شود. بدین ترتیب، ترکها مانند آنچه که در شکل 3 آمده است، ترمیم می شوند. واکنش پلیمر شدن رخ داده در این سامانه از نوع پلیمر شدن جانشینی متقابل حلقه گشا (ROMP) است [11-13].

سازوکار خود ترمیمی برپایه سامانه کپسولی نسبت به سازوکار ذاتی این مزیت را دارد که طی آن حجم آسیب دیده بزرگتری را می توان ترمیم کرد. البته عملکرد و ساختار این سازوکار همیشه به یک شکل نیست و بر این اساس می توان آن را به سامانه های کپسول و کاتالیزگر، تک کپسولی و دوکپسولی تقسیم بندی کرد. به طور مثال،



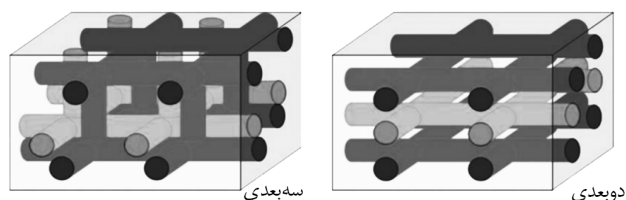
شکل 3- فرایند خود ترمیمی ماده ای با عامل ترمیم کننده کپسول دار شده که به همراه کاتالیزگر در ماتریس کامپوزیت به طور پراکنده جاگذاری شده اند [12].



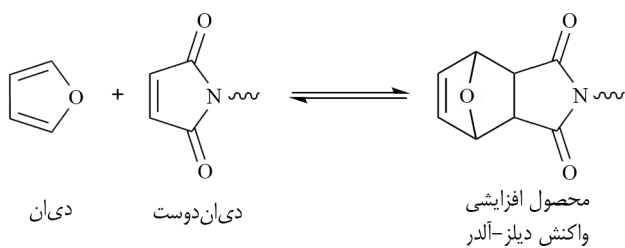
شکل ۴- سامانه خودترمیم رگ‌دار یک‌بعدی بر پایه لیاف توخالی شیشه که رزین ترمیم‌کننده درون آن‌ها جاگذاری شده است [۱۱].

شده است، قابلیت ترمیم ناحیه آسیب‌دیده را برای بیش از یکبار دارند. زیرا در این سامانه‌ها، شبکه رگ‌دار به هم پیوسته است و بنابراین ناحیه ترک‌خورده دارای راه‌های ارتباطی متعدد به عامل ترمیم‌کننده است [۱۱، ۱۲، ۱۴، ۱۵].

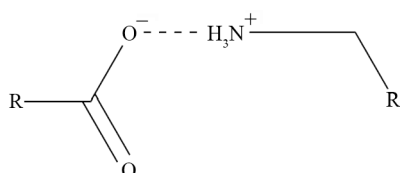
برخلاف سازوکارهای غیرذاتی که نیاز به عوامل ترمیم‌کننده تعبیه‌شده از قبل دارند، مواد خودترمیم ذاتی می‌توانند خودبه‌خود ترک‌ها را بازایی کنند. قابلیت خودترمیمی ذاتی مواد پلیمری از طریق برگشت‌پذیری طبیعی پیوندها و برهم‌کنش‌های موجود در ماتریس پلیمری حاصل می‌شود. بنابراین، چنین موادی قابلیت آن را دارند که بتوانند چند چرخه خودترمیمی را تجربه کنند. این ویژگی، آن‌ها را برای استفاده طولانی‌مدت جذاب می‌کند. برهم‌کنش‌هایی که سبب پدید آمدن سازوکار خودترمیمی ذاتی می‌شوند، شامل برهم‌کنش‌های کووالانسی و غیرکووالانسی پویا هستند. پیوندهای هیدروژنی، برهم‌کنش‌های میزبان-میهمان و الکتروستاتیکی و انباشت $\pi-\pi$ از جمله برهم‌کنش‌های غیرکووالانسی پویا هستند. در حالی که پیوندهای ایمنی، پیوندهای آسیل هیدرازون، واکنش‌های دیلز-آلدر و دیلز-آلدر برگشتی نمونه‌هایی از برهم‌کنش‌های کووالانسی پویا هستند [۸، ۱۶، ۱۷]. به عنوان مثال، واکنش دیلز-آلدر (DA) که نوعی برهم‌کنش کووالانسی پویاست و در تهیه پوشش‌های هوشمند استفاده می‌شود، واکنش برگشت‌پذیر گرمایی است. بدین معنی که حلقه‌ای که در اثر این واکنش تشکیل شده،



شکل ۵- سامانه‌های خودترمیم رگ‌دار دو‌بعدی و سه‌بعدی که رزین اپوکسی ترمیم‌کننده و عامل سخت‌کننده به‌طور جداگانه در آن‌ها جاگذاری شده‌اند [۱۱].



(الف)



(ب)

شکل ۶- طرح‌های کلی از: (الف) واکنش برگشت‌پذیر گرمایی دیلز-آلدر و (ب) برهم‌کنش الکتروستاتیک برای به‌وجود آوردن سازوکار خودترمیمی [۱۲، ۱۸].

می‌تواند شکسته شود و پس از گرم شدن به حالت اولیه آن بازگردد. این واکنش که طرحی از آن در شکل ۶ الف آورده شده است، در واقع نوعی واکنش الکتروسیکلی با مشخصه‌هایی از شیمی کلیک است که بین یک دی‌ان مزدوج و یک ترکیب دی‌ان‌دوست رخ می‌دهد. این واکنش مزایایی از جمله بازده و گزینش‌پذیری واکنش زیاد و عدم ایجاد واکنش‌های جانبی را دارد. با این حال، فرایندهای خودترمیمی ایجادشده با واکنش DA، معمولاً زمانبر هستند و به شرایط گرمایشی نیاز دارند [۱۲، ۱۹].

از سوی دیگر، برهم‌کنش‌های الکتروستاتیکی که یکی از انواع برهم‌کنش‌های غیرکووالانسی پویا هستند، به‌طور گسترده‌تری برای طراحی فیلم‌های بسته‌بندی مواد غذایی خودترمیم استفاده می‌شوند. در واقع این برهم‌کنش‌ها، نوعی اثر جاذبه یا دافعه بین مولکولی هستند که بار الکتریکی دارند. این برهم‌کنش‌ها را می‌توان به دو نوع تقسیم‌بندی کرد:

الف- جاذبه‌های الکتروستاتیکی که بین مولکول‌هایی با بارهای مخالف برقرار می‌شوند؛

ب- دافعه‌های الکتروستاتیکی که بین مولکول‌هایی با بارهای یکسان رخ می‌دهند.

گفتنی است، استحکام برهم‌کنش‌های الکتروستاتیکی از مقدار 1 kJ/mol تا 25 kJ/mol متغیر است. طرحی از یک ساختار الکتروستاتیکی رایج برای خودترمیمی در شکل ۶ ب آورده شده است [۴، ۱۸، ۲۰].

کاربرد خودترمیمی در بسته‌بندی مواد غذایی

استفاده از پلیمرهای خودترمیم در صنایع غذایی، دامنه کاربردی گسترده‌ای دارد. برای مثال، فیلم‌ها و پوشش‌های پلیمری خودترمیم برای بسته‌بندی استفاده می‌شوند. زیرا آن‌ها می‌توانند بخش‌های آسیب‌دیده خود را ترمیم کنند و ویژگی‌های این بخش‌ها را بازیابی کنند تا از کاهش کیفیت غذا و از دست رفتن مواد مغذی جلوگیری شود [۹].

به‌طور کلی، طراحی مواد خودترمیم برای کاربرد در بسته‌بندی مواد غذایی باید از مجموعه‌ای از قواعد پیروی کند. یکی از این موارد، اقتصادی بودن و غیرسمی بودن مواد به‌کاررفته است که باید قابلیت خودترمیم داشته باشند. همچنین، باید اثر ناچیزی بر طعم و بافت غذا داشته باشند. واکنش‌های خودترمیم باید به‌طور خودکار رخ دهند یا در پاسخ به محرک خارجی باشند. افزون‌بر این، واکنش‌های خودترمیم باید بتوانند به‌طور هم‌زمان هر دو خاصیت ریزساختاری و عملکردی مواد بسته‌بندی را بازیابی کنند. در کنار این موارد، برای دستیابی به عملکرد بهینه پوشش یا فیلم بسته‌بندی با قابلیت خودترمیمی، باید عوامل متعدد دیگری مانند ضخامت، استحکام مکانیکی، شفافیت، عبورپذیری در برابر نفوذ گاز و بخار آب، قابلیت انعطاف‌پذیری و غیره را در نظر گرفت. هر یک از این عوامل در کیفیت ماده بسته‌بندی خودترمیم اثر بسزایی دارند. به‌عنوان مثال، ضخامت فیلم یا پوشش ممکن است بر تعداد دفعاتی اثر بگذارد که می‌تواند آسیب‌های وارد شده را ترمیم کند. در واقع، با وجود اینکه پوشش‌هایی با ضخامت‌های متفاوت اختلاف خاصی در زمان ترمیم نشان نمی‌دهند، اما با افزایش ضخامت لایه‌ها تعداد چرخه‌های تکرار خودترمیمی افزایش می‌یابد [۲۱-۲۳].

تاکنون رویکردهای مختلفی برای تولید فیلم‌ها و پوشش‌های پلیمری به‌کار گرفته شده‌اند. اما برای فیلم‌ها و پوشش‌های خودترمیم، روش لایه‌گذاری لایه‌به‌لایه (LbL) به‌دلیل مزایای آن رایج‌ترین رویکرد است. روش LbL به‌راحتی انجام می‌شود و این امکان را فراهم می‌کند تا خواصی مانند ضخامت لایه و ترکیب هر لایه به‌شکلی دقیق کنترل شود. این روش، همچنین این امکان را فراهم می‌کند تا لایه‌هایی همگن روی سطوح مختلف، از جمله بسترهای غیریونی و غیرقطبی تشکیل شود. بدین صورت که در این روش، اولین لایه نشاندهنده به‌طور مؤثر به سطح زیرلایه یا بستر چسبیده و نقص‌های آن را پرمی‌کند. در روش LbL برای نشان دادن تعداد مشخصی از لایه‌ها، چرخه‌های لایه‌گذاری تکرار می‌شوند و لایه‌گذاری نیز به‌روش‌های افشانش و پوشش‌دهی‌های غوطه‌ورسازی و چرخشی انجام می‌شود [۲۴، ۲۲، ۹، ۴].

دلیل توجه به فیلم‌های خودترمیم این است که آسیب‌های تصادفی در حین جابه‌جایی و حمل‌ونقل کالاها ممکن است کارایی حفاظتی بسته‌بندی‌های رایج را تضعیف کنند. بنابراین، تلاش‌های پژوهشی زیادی در حال انجام است تا بتوان به‌طور عملی از فیلم‌های خودترمیم با قابلیت بازیابی سطح و ویژگی‌های خود در بسته‌بندی کالاها، مختلف، به‌ویژه مواد غذایی استفاده کرد. در همین راستا، در پژوهشی فیلم‌های پلی‌الکترولیتی تشکیل شده از کربوکسی‌متیل سلولوز سدیم (CMC) و کیتوسان (CS) به‌روش لایه‌گذاری لایه‌به‌لایه تهیه شدند و کارایی آن‌ها برای بسته‌بندی سیب‌های برش‌خورده بررسی شد. قابلیت خودترمیمی این فیلم‌ها نیز که در اثر برهم‌کنش الکتروستاتیکی میان گروه‌های NH_3^+ در CS و گروه‌های COO^- در CMC ایجاد شده، بسیار مناسب گزارش شده است. به‌طوری که آن‌ها می‌توانستند شکاف‌های ایجاد شده را از طریق تورم در اثر محرک آب، در عرض ۱۰ min ترمیم کنند. همچنین، فیلم‌ها دارای قابلیت پر کردن کامل حفره‌های بسیار بزرگ‌تر از ضخامت فیلم را نیز در مدت تقریباً ۳۰ min بودند. قابلیت خودترمیمی این فیلم‌ها در کنار ویژگی‌های ضدآکسیدانسی و ضد میکروب بودن باعث شد تا این فیلم‌ها عملکرد مناسبی برای بسته‌بندی سیب‌های برش‌خورده نشان دهند. به‌طوری که قابلیت آن‌ها در کنترل قهوه‌ای شدن میوه‌ها در یک دوره ذخیره‌سازی ۱۰ h مشهود بود. همچنین آن‌ها توانستند کاهش جرم میوه‌ها را در طول مدت ذخیره‌سازی از ۸٪ به ۶٪ کاهش دهند [۲۵، ۸].

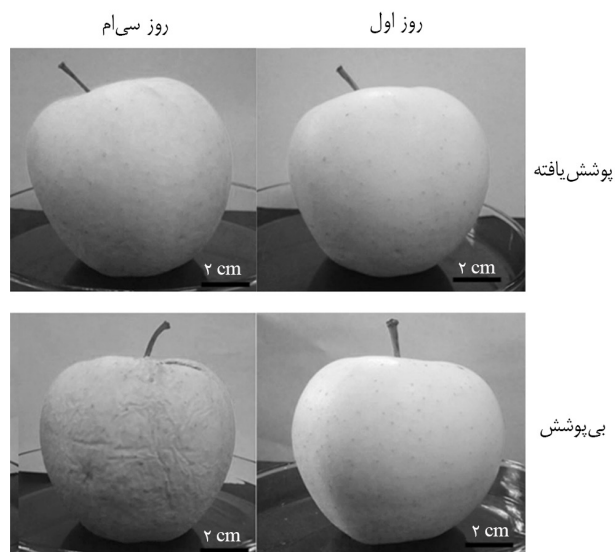
پوشش‌های خودترمیم را نیز می‌توان مستقیماً روی سطح غذا اعمال کرد تا بتوان از طریق کاهش انتقال بخار آب، کنترل نفوذپذیری اکسیژن و جلوگیری از اکسایش، عمر مفید ماده غذایی را افزایش داد. بدین منظور، Yang و همکاران نوعی پوشش‌های خودترمیم را تهیه و آن‌ها را روی سیب اعمال کردند. نتیجه این کار در شکل ۷ نشان داده شده است. این پوشش‌ها برپایه سدیم آلزینات و L-متنول- β -سیکلودکسترین پیوندیافته به کیتوسان، تهیه شده و با روش لایه‌گذاری LBL از طریق غوطه‌ورسازی روی سیب‌ها اعمال شدند. قابلیت خودترمیمی این پوشش‌ها، در نتیجه برهم‌کنش میزبان-میهمان بین β -سیکلودکسترین و L-متنول بود. بدین ترتیب که پوشش پس از آسیب‌دیدگی در اثر محرک آب، به‌سرعت متورم شده و گروه‌های آزاد برای دستیابی به خودترمیمی به یکدیگر نزدیک می‌شوند. بازیابی و هموارشدن سطح پوشش در ناحیه آسیب‌دیده، تقریباً در مدت ۲۰ min انجام شد. همچنین مشخص شد، برهم‌کنش‌های ایجاد شده در اثر افزودن L-متنول به ایجاد پوششی بسیار شفاف، صاف و متراکم با ویژگی‌های مکانیکی و

ترمیم‌کننده برپایه روغن‌های مختلف گیاهی و حیوانی که خاصیت آب‌گریزی داشتند، درون آن‌ها جاگذاری شدند. نتایج نشان داد با آزادسازی عوامل ترمیم‌کننده، رشد ترک‌ها در مقوا خاتمه می‌یابد. درعین حال با افزایش آب‌گریزی به حفظ خواص سدگری مقوا نیز کمک شده است. شایان توجه است که در زمینه بسته‌بندی مواد غذایی، برای تهیه بسته‌بندی‌های خودترمیم با سازوکار غیرذاتی از عوامل ترمیم‌کننده برپایه روغن‌های طبیعی استفاده می‌شود. زیرا این مواد، برای تماس با مواد غذایی بی‌خطرند [۹،۲۷].

در جدول ۱، برخی دیگر از مطالعات انجام‌شده درباره فیلم‌ها و پوشش‌های خودترمیم برای کاربرد در بسته‌بندی مواد غذایی، گزارش شده است.

چالش‌ها و محدودیت‌ها

در هنگام مطالعه درباره فیلم‌ها و پوشش‌های خودترمیم و کاربرد آن‌ها در بسته‌بندی مواد غذایی، نکات مثبت درخور توجه هستند. اما شناخت چالش‌ها و محدودیت‌های مرتبط با آن‌ها نیز مسئله‌ای ضروری است. از مهم‌ترین چالش‌های موجود در ساخت بسته‌بندی خودترمیم، انتخاب سازوکار خودترمیمی آن است. برای مثال، سامانه‌های خودترمیم غیرذاتی برپایه ریزکپسول‌ها این محدودیت را دارند که تنها یک بار می‌توانند محل آسیب‌دیده را ترمیم کنند. در این سامانه‌ها، هنگامی که ناحیه ترمیم‌شده دوباره آسیب می‌بیند، خودترمیمی مجدداً نمی‌تواند رخ دهد. زیرا ریزکپسول‌های دارای عامل ترمیم‌کننده، تخلیه شده‌اند و عامل ترمیم‌کننده نیز به جامد سختی تبدیل شده است. سامانه خودترمیم رگ‌دار برخلاف سامانه برپایه ریزکپسول می‌تواند شبکه خود را با عوامل ترمیم‌کننده از منبع خارجی یا با عوامل ترمیم‌کننده اضافی از ناحیه‌هایی که هنوز



شکل ۷- تصاویر عینی از سیب‌های پوشش‌یافته با پوشش برپایه سدیم آلزینات و L-منتول- β -سیکلودکستین و سیب‌های بی‌پوشش در مدت ۳۰ روز ذخیره‌سازی [۲۶].

خواص خودترمیمی بهتر منجر می‌شود. به‌طورکلی در این مطالعه، اثربخشی پوشش‌های تهیه‌شده در حفظ سفتی میوه (به میزان %۱۵/۲۳) و کاهش از دست دادن وزن آن (به‌میزان %۴۹/۳۳) در طول ۳۰ روز انبارش و ذخیره‌سازی نشان داده شد [۲۶].

پوشش‌های خودترمیم می‌توانند روی سایر مواد بسته‌بندی نیز اعمال شوند تا خواص آن‌ها را بهبود بخشند و در نتیجه، عمر بهره‌وری آن‌ها را افزایش دهند. برای مثال در پژوهشی، پوشش‌های پلیمری برپایه ریزکپسول‌ها تهیه شده و روی مقوای بسته‌بندی اعمال شدند تا عملکرد آن را بهبود بخشند. ریزکپسول‌های موجود در این پوشش از ماده پلیمری اتیل سلولوز ساخته شده و عوامل

جدول ۱- گزارشی از مطالعات مربوط به فیلم‌ها و پوشش‌های خودترمیم در کاربرد بسته‌بندی مواد غذایی.

مرجع	زمان ترمیم (min)	بازدهی ترمیم (%)	سازوکار	ترکیبات	نوع بسته‌بندی
۲۵	۱۰	-	ذاتی، برهم‌کنش‌های الکتروستاتیکی	کربوکسی متیل سلولوز سدیم- کیتوسان	فیلم
۲۸	۱	۷۲	ذاتی، پیوندهای هیدروژنی	کیتوسان- سیتریک اسید-کولین کلرید	
۲۶	۲۰	۵۹/۴۹	ذاتی، برهم‌کنش میزبان-میهمان	سدیم آلزینات-L-منتول- β -سیکلودکستین-کیتوسان	پوشش
۲۹	۵	۹۷	ذاتی، برهم‌کنش‌های الکتروستاتیکی و پیوندهای هیدروژنی	سدیم آلزینات-کیتوسان	

هستند. همچنین به دلیل عدم وجود روش‌های تحلیلی مناسب برای تعیین مقدار مواد مهاجر، دقت آن‌ها نیز با مشکل مواجه می‌شود. افزون‌براین، ترکیبات مختلف مواد غذایی و شرایط متفاوت نگهداری، ممکن است باعث تغییر در سطح مهاجرت مواد از ماده بسته‌بندی به غذای بسته‌بندی‌شده شوند [۴].

نگرش مبتنی بر صنعت درباره چالش‌های پیش‌روی بسته‌بندی‌های خودترمیم

در حال حاضر، در کنار چالش‌هایی که پیش‌تر ذکر شدند، کاربرد واقعی بسته‌بندی‌های خودترمیم در صنعت مواد غذایی، عمدتاً به دلیل هزینه زیاد تولید و پیچیدگی مواد مورد استفاده برای تولید چنین فیلم‌ها و پوشش‌هایی محدود شده است [۸]. در صنعت بسته‌بندی مواد غذایی اغلب پلی‌اولفین‌های رایج، مانند پلی‌پروپیلن (PP) و پلی‌اتیلن (PE)، برای تولید فیلم‌ها و پوشش‌های بسته‌بندی به کار برده می‌شوند. این موضوع، به دلیل خواص مناسبی است که آن‌ها علاوه بر هزینه کم ارائه می‌دهند. از جمله ویژگی‌های مناسب پلی‌پروپیلن می‌توان به خواص مکانیکی رضایت‌بخش، شفافیت، مقاومت گرمایی و مقاومت در برابر خوردگی مناسب و همچنین سدگری خوب آن در برابر رطوبت اشاره کرد.

پلی‌اتیلن نیز به دلیل چقرمگی و استحکام ضربه‌ای زیاد، مقاومت شیمیایی خوب و قابلیت سدگری در برابر رطوبت، به طور گسترده در صنعت بسته‌بندی استفاده می‌شود [۳۱-۳۳]. با این حال، از مهم‌ترین چالش‌های فیلم‌ها و پوشش‌های PE و PP برای کاربرد در صنعت بسته‌بندی مواد غذایی، سدگری ضعیف آن‌ها در برابر اکسیژن است. چراکه بسته‌بندی محصولات حساس به اکسیژن باید تا حد ممکن از نفوذ اکسیژن جلوگیری کند. در مطالعات مختلف، سرعت عبور اکسیژن (OTR) برای فیلم‌های خالص PP و PE، به ترتیب در حدود $1400 \text{ mL} \cdot \text{m}^{-2} \cdot 24\text{h}^{-1}$ تا $1700 \text{ mL} \cdot \text{m}^{-2} \cdot 24\text{h}^{-1}$ [۳۲-۳۴] و $1300 \text{ mL} \cdot \text{m}^{-2} \cdot 24\text{h}^{-1}$ تا $1400 \text{ mL} \cdot \text{m}^{-2} \cdot 24\text{h}^{-1}$ [۳۱، ۳۵] گزارش شده است.

تهیه نانوکامپوزیت‌های پلیمری از طریق پراکنش نانوپرکننده‌ها در ماتریس‌های پلیمری، راه‌حلی مناسب برای ارائه مواد بسته‌بندی با قابلیت سدگری در نظر گرفته می‌شود. به عنوان مثال، نانوذرات خاک رس و سیلیکات که نانوپرکننده‌های مقرون‌به‌صرفه‌ای هستند، ذاتاً در برابر گازها نفوذناپذیرند. آن‌ها مسیر مارپیچی را برای عبور مولکول‌های گاز ایجاد می‌کنند که باعث جلوگیری از انتشار آن‌ها در سراسر ماتریس می‌شود [۳۱، ۳۵].

جدول ۲، مقادیر OTR فیلم‌های نانوکامپوزیتی مختلف برپایه

آسیب ندیده‌اند، پُر کند و این امکان را فراهم کند تا چند چرخه خودترمیمی در یک محل رخ دهد. با این حال، با توجه به پیچیدگی طراحی و ساخت سامانه‌های رگ‌دار، تأکید بیشتری بر استفاده از سامانه‌های برپایه کپسول معطوف شده است [۹، ۳۰].

افزون بر محدودیت‌های یادشده در ارتباط با سامانه‌های خودترمیم غیرذاتی، کاربرد آن‌ها در تهیه پوشش‌ها و فیلم‌های بسته‌بندی مواد غذایی نیز مشکل‌ساز است. زیرا ممکن است، عوامل ترمیم‌کننده به کاررفته در این سامانه‌ها ناپایدار باشند. بدین دلیل، پژوهش‌های کنونی نشان می‌دهند که سازوکار خودترمیمی ذاتی به دلیل عدم وجود عوامل ترمیم‌کننده خارجی، برای بسته‌بندی مواد غذایی مناسب‌تر است و از طراحی پیچیده و هزینه اضافی سامانه‌های خودترمیم غیرذاتی نیز جلوگیری می‌شود [۴، ۸].

هر دو برهم‌کنش‌های پویای غیرکوالانسی و کوالانسی را می‌توان برای ساخت مواد خودترمیم با سازوکار ذاتی، برای بسته‌بندی مواد غذایی استفاده کرد. اما چالش اصلی این است که این مواد بهتر است متکی بر محرک‌هایی مانند دمای محیط یا تابش فرابنفش باشند که به راحتی در دسترس بوده یا به طور کلی متکی بر محرک‌ها نباشند. پیوندهای غیرکوالانسی پویا می‌توانند به طور مؤثر با انرژی خارجی کم یا بدون انرژی، در دمای محیط ترمیم شوند. اما به دلیل نیروهای بین‌مولکولی ضعیف و برهم‌کنش‌های برگشت‌پذیر از نظر مکانیکی ضعیف‌تر از پیوندهای کوالانسی پویا هستند. از سوی دیگر، تشکیل و تجزیه برگشت‌پذیر هم‌زمان و پیوسته پیوندهای کوالانسی پویا معمولاً در پاسخ به نور، گرما و نیرو رخ می‌دهد. مواد خودترمیم ایجادشده می‌توانند پایداری زیادی را حتی پس از حذف محرک‌های خارجی نشان دهند [۸، ۱۱].

گاهی در تهیه پوشش‌ها و فیلم‌های بسته‌بندی جدا از چالش‌ها و محدودیت‌های مرتبط با سازوکارهای خودترمیمی، از افزودنی‌هایی استفاده می‌شود که برخی از آن‌ها ممکن است مشکل‌ساز باشند. نرم‌کننده‌ها، نمونه‌ای از این افزودنی‌ها هستند که برای بهبود انعطاف‌پذیری زنجیرهای پلیمری و افزایش مقاومت فیلم تشکیل‌شده در برابر شکست، استفاده می‌شوند. مهاجرت این مواد شیمیایی از ماده بسته‌بندی به محصول غذایی، نه تنها به نگرانی‌ها درباره سمی بودن می‌افزاید، بلکه ممکن است به تغییراتی در ویژگی‌های حسی و کیفیت غذا منجر شود. گفتنی است، پدیده مهاجرت به عنوان انتقال انبوه مواد از ماده بسته‌بندی به ماده غذایی بسته‌بندی‌شده تعریف می‌شود. به منظور تعیین مشخصات ایمنی پوشش یا فیلم بسته‌بندی و حل این مشکل، می‌توان از آزمون‌های مهاجرت استفاده کرد. اما چنین آزمون‌هایی زمانبر و پرزحمت

جدول ۲- مقایسه مقادیر OTR فیلم‌های نانوکامپوزیتی مختلف بر پایه PP و PE.

مرجع	OTR (mL.m ⁻² .24h ⁻¹)	مواد تشکیل دهنده فیلم‌های نانوکامپوزیتی	
		ماتریس (میزان ترکیب)	مواد افزودنی (میزان ترکیب)
۳۴	۱۰۶۰	کوپلیمر تصادفی PP (۹۴ %wt)	پلی(β-پینن)-نانورس (۱/۵ %wt)
۳۲	۱۱۲۳/۹۶	PP (-)	نانوسیلیکای اصلاح سطحی شده با اتیلن وینیل استات (۰/۰۹ %wt)
۳۳	۹۱۷/۷	LDPE/PP (۲۰/۸۰ %wt)	پلی(لاکتیک اسید)-مونت موریلونیت (۵ phr-۲۵ phr)
۳۱	۱۰	LDPE (-)	اتیلن وینیل الکل-نانورس-LDPE پیوندخورده با مالنیک انیدرید (۵-۴-۳۰ %wt)
۳۵	۹۰۰±۵۰	PE (-)	نانورس لوله‌ای توخالی (۱ %wt)

^۱ پلی اتیلن کم چگالی

PP و PE را نشان می‌دهد که در مطالعات جداگانه بررسی شده‌اند. همان‌طور که از نتایج جدول مشخص است، تلاش برای توسعه فیلم‌ها و پوشش‌های نانوکامپوزیتی بر پایه ماتریس‌های پلیمری مقرون به صرفه، می‌تواند در راستای دستیابی به مواد بسته‌بندی کاربردی با قابلیت سدگری مناسب در برابر اکسیژن، بسیار مفید واقع شود. افزون بر این، در راستای از بین بردن محدودیت کاربرد بسته‌بندی‌های خودترمیم در صنعت بسته‌بندی مواد غذایی، لازم است به پلیمرهای رایج در این صنعت توجه بیشتری شود تا افزون بر توسعه خاصیت خودترمیم در چنین فیلم‌ها و پوشش‌هایی، ایرادهای اساسی آن‌ها برای کاربرد در صنعت بسته‌بندی مواد غذایی نیز رفع شود.

نتیجه‌گیری

فیلم‌ها و پوشش‌های دارای قابلیت خودترمیمی، چشم‌انداز امیدوارکننده‌ای از آینده بسته‌بندی مواد غذایی ارائه می‌دهند. بسته‌بندی‌های خودترمیم، محصولات غذایی را بهتر محافظت می‌کنند. تفاوت آن‌ها با بسته‌بندی‌های رایج، طول عمر بیشتر و پایداری بهتر آن‌هاست. زیرا فیلم‌ها و پوشش‌های خودترمیم برخلاف انواع رایج بسته‌بندی می‌توانند در صورت آسیب دیدگی، ساختار یکپارچه و قابلیت‌های خود را بازیابی کنند و از این طریق

عمر بهره‌وری خود را افزایش دهند. با وجود این، استفاده از فیلم‌ها و پوشش‌های خودترمیم در صنعت بسته‌بندی مواد غذایی با چالش‌هایی مواجه است که کاربرد آن‌ها را محدود می‌کند. بنابراین، پژوهش‌های بیشتری در آینده مورد نیاز است تا کاربرد امیدبخش این نوع بسته‌بندی‌ها را در صنعت بسته‌بندی مواد غذایی تحقق بخشد. تمرکز این پژوهش‌ها می‌تواند موضوعات مختلف را دربرگیرد. از جمله می‌توان به توسعه کاربردی فیلم‌ها و پوشش‌های خودترمیم غیرذاتی، بررسی بازدهی خودترمیمی در شرایط محیطی مختلف، به‌ویژه حمل و نقل و نگهداری محصولات غذایی، ارزیابی تعداد چرخه‌های خودترمیمی انجام‌پذیر و بازدهی ترمیم در هر چرخه یا روش‌های بهتر برای بررسی میزان تأثیر مهاجرت مواد افزودنی استفاده‌شده در تهیه این بسته‌بندی‌ها اشاره کرد. همچنین غیرسمی بودن، تجزیه‌پذیری و زیست‌تخریب‌پذیری بسته‌بندی‌های خودترمیم، از جمله موارد دیگری هستند که در مطالعات آینده می‌توانند ارزیابی شوند. افزون بر این، کاربرد عملی فیلم‌ها و پوشش‌های خودترمیم در صنعت بسته‌بندی مواد غذایی نیز باید امکان‌سنجی شود. زیرا این بسته‌بندی‌ها، باید مقرون به صرفه باشند و مواد اولیه به‌کاررفته برای تولید آن‌ها نیز نباید به پیچیدگی روند تولید بیفزایند. در این راستا می‌توان به پلیمرهای رایج در صنعت بسته‌بندی مواد غذایی توجه بیشتری داشت تا افزون بر بررسی امکان توسعه خاصیت خودترمیمی در بسته‌بندی‌های بر پایه آن‌ها به رفع چالش‌های اساسی این مواد در این صنعت نیز کمک شود.

مراجع

- Bhaskar S.V., *Food Safety in the 21st Century*, Gupta R.K., Dudeja P., and Singh M.A. (Eds.), Academic, San Diego, 1-10, 2017.
- Ibid, 547-553.
- Han J.W., Ruiz-Garcia L., Qian J.P., and Yang X.T., Food Packaging: A Comprehensive Review and Future Trends, *Compr. Rev. Food Sci. F.*, **17**, 860-877, 2018.
- Lai W.F., Design and Application of Self-healable Polymeric Films and Coatings for Smart Food Packaging, *npj Sci. Food*, **7**, 11, 2023.
- Azeredo H.M., Otoni C.G., and Mattoso L.H.C., Edible Films and Coatings-Not Just Packaging Materials, *Curr. Res. Food Sci.*, **5**, 1590-1595, 2022.
- Aziz M.S.A. and Salama H.E., Developing Multifunctional Edible Coatings Based on Alginate for Active Food Packaging, *Int. J. Biol. Macromol.*, **190**, 837-844, 2021.
- Sun J., Wei Z., and Xue C., Preparation and Characterization of Multifunctional Films Based on Pectin and Carboxymethyl Chitosan: Forming Microchambers for High-Moisture Fruit Preservation, *Food Packaging Shelf*, **37**, 101073, 2023.
- Huang K. and Wang Y., Recent Advances in Self-Healing Materials for Food Packaging, *Packag. Technol. Sci.*, **36**, 157-169, 2023.
- Gopalakrishnan K. and Mishra P., Self-Healing Polymer a Dynamic Solution in Food Industry: A Comprehensive Review, *Food Biophys.*, **19**, 1-17, 2024.
- Blaiszik B.J., Kramer S.L., Olugebefola S.C., Moore J.S., Sottos N.R., and White S.R., Self-Healing Polymers and Composites, *Annu. Rev. Mater. Res.*, **40**, 179-211, 2010.
- Hia I.L., Vahedi V., and Pasbakhsh P., Self-Healing Polymer Composites: Prospects, Challenges, and Applications, *Polym. Rev.*, **56**, 225-261, 2016.
- Parihar S. and Gaur B., Self Healing Approaches in Polymeric Materials-An Overview, *J. Polym. Res.*, **30**, 217, 2023.
- Kessler M.R. and White S.R., Self-Activated Healing of Delamination Damage in Woven Composites, *Compos. Part A: Appl. Sci.*, **32**, 683-699, 2001.
- Wang Y., Pham D.T., and Ji C., Self-Healing Composites: A Review, *Cogent. Eng.*, **2**, 1075686, 2015.
- Dry C.M. and Sottos N.R., Passive Smart Self-Repair in Polymer Matrix Composite Materials, *Proceeding of SPIE 1916, Smart Structures and Materials 1993: Smart Materials*, Albuquerque, 23 July, 438-444, 1993.
- Nevejans S., Ballard N., Miranda J.I., Reck B., and Asua J.M., The Underlying Mechanisms for Self-Healing of Poly(disulfide)s, *Phys. Chem. Chem. Phys.*, **18**, 27577-27583, 2016.
- Silva A.C.M., Moghadam A.D., Singh P., and Rohatgi P.K., Self-Healing Composite Coatings Based on in Situ Micro-Nanoencapsulation Process for Corrosion Protection, *J. Coat. Technol. Res.*, 1-29, 2017.
- Buaksuntear K., Limarun P., Suethao S., and Smitthipong W., Non-Covalent Interaction on the Self-Healing of Mechanical Properties in Supramolecular Polymers, *Int. J. Mol. Sci.*, **23**, 6902, 2022.
- Ye J., Fu S., Zhou S., Li M., Li K., Sun W., and Zhai Y., Advances in Hydrogels Based on Dynamic Covalent Bonding and Prospects for its Biomedical Application, *Eur. Polym. J.*, **139**, 110024, 2020.
- Wang W., Zhang Y., and Liu W., Bioinspired Fabrication of High Strength Hydrogels From Non-Covalent Interactions, *Prog. Polym. Sci.*, **71**, 1-25, 2017.
- Li Q., Liu C., Wen J., Wu Y., Shan Y., and Liao J., The Design, Mechanism and Biomedical Application of Self-Healing Hydrogels, *Chinese Chem. Lett.*, **28**, 1857-1874, 2017.
- Hu B., Chen L., Lan S., Ren P., Wu S., Liu X. et al., Layer-by-Layer Assembly of Polysaccharide Films with Self-Healing and Antifogging Properties for Food Packaging Applications, *ACS Appl. Nano Mater.*, **1**, 3733-3740, 2018.
- Wang J., Gao Q., Zhao F., and Ju J., Repair Mechanism and Application of Self-Healing Materials for Food Preservation, *Crit. Rev. Food Sci.*, 1-11, 2023.
- Petrila L.M., Bucatariu F., Mihai M., and Teodosiu C., Polyelectrolyte Multilayers: An Overview on Fabrication, Properties, and Biomedical and Environmental Applications, *Materials*, **14**, 4152, 2021.
- Liu X., Han W., Zhu Y., Xuan H., Ren J., Zhang J., and Ge L., Anti-Oxidative and Antibacterial Self-Healing Edible Polyelectrolyte Multilayer Film in Fresh-Cut Fruits, *J. Nanosci. Nanotechnol.*, **18**, 2592-2600, 2018.
- Yang Y., Ren J., Luo C., Yuan R., and Ge L., Fabrication of L-Menthol Contained Edible Self-Healing Coating Based on Guest-Host Interaction, *Colloid. Surface. A*, **597**, 124743, 2020.
- Andersson C., Järnström L., Fogden A., Mira I., Voit W., Zywicki S., and Bartkowiak A., Preparation and Incorporation of Microcapsules in Functional Coatings for Self-Healing of Packaging Board, *Packag. Technol. Sci.*, **22**, 275-291, 2009.
- Smirnov M.A., Nikolaeva A.L., Bobrova N.V., Vorobiov V.K., Smirnov A.V., Lahderanta E., and Sokolova M.P., Self-Healing Films Based on Chitosan Containing Citric Acid/Choline Chloride Deep Eutectic Solvent, *Polym. Test.*, **97**, 107156, 2021.
- Du Y., Yang F., Yu H., Cheng Y., Guo Y., Yao W., and Xie Y., Fabrication of Novel Self-Healing Edible Coating for Fruits

- Preservation and its Performance Maintenance Mechanism, *Food Chem.*, **351**, 129284, 2021.
30. Song Y.K., Kim H.W., and Chung C.M., Repeatable Self-Healing of a Protective Coating Based on Vegetable-Oil-Loaded Microcapsules, *Polymers-Basel*, **14**, 2013, 2022.
31. Rahnema M., Oromiehie A., Ahmadi S., and Ghasemi I., Effect of Different Blend Compositions on Properties of Low-Density Polyethylene/Ethylene Vinyl Alcohol/Clay Toward High Oxygen Barrier Nanocomposite Films, *Polym. Sci. Ser. A+*, **59**, 533-542, 2017.
32. Li D., Zhang J., Xu W., and Fu Y., Effect of SiO₂/EVA on the Mechanical Properties, Permeability, and Residual Solvent of Polypropylene Packaging Films, *Polym. Composite.*, **37**, 101-107, 2016.
33. Mooninta S., Poompradub S., and Prasassarakich P., Packaging Film of PP/LDPE/PLA/Clay Composite: Physical, Barrier and Degradable Properties, *J. Polym. Environ.*, **28**, 3116-3128, 2020.
34. Ayhan Z., Cimmino S., Eşturk O., Duraccio D., Pezzuto M., and Silvestre C., Development of Films of Novel Polypropylene Based Nanomaterials for Food Packaging Application, *Packag. Technol. Sci.*, **28**, 589-602, 2015.
35. Tas C.E., Hendessi S., Baysal M., Unal S., Cebeci F.C., Menciloglu Y.Z., and Unal H., Halloysite Nanotubes/Polyethylene Nanocomposites for Active Food Packaging Materials with Ethylene Scavenging and Gas Barrier Properties, *Food Bioprocess Tech.*, **10**, 789-798, 2017.

