

# Self-healing of Polymeric Food Packaging

Reza Bagheri-Renani<sup>1</sup>, Fatemeh Arabgol<sup>1\*</sup>, Azin Paydayesh<sup>2</sup>

<sup>1</sup>. Department of Materials, Chemical and Polymer Engineering, Buein Zahra Technical University, Buein Zahra, Qazvin, Iran

P.B.: 3451866391

<sup>2</sup>. Department of Chemical and Polymer Engineering, Mahshahr Branch, Islamic Azad University, Mahshahr, Iran

## Abstract

Self-healing polymer materials in the form of films or coatings hold great promise within the food packaging industry, due to their unique ability to repair and restore their surface integrity and characteristics by themselves when they are damaged. Packages are usually inevitably and imperceptibly damaged during transportation, handling and storage and in this case, the damaged parts of common packages, which lack self-healing ability, will be prone to microbial growth due to exposure to the environment and this issue 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 extrinsic 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 is noteworthy that, to date, self-healing films and coatings have primarily been developed and studied at the laboratory scale and for scientific research purposes. Moreover, recent review articles have rarely considered the real-world industrial limitations associated with improving the practical application of these films and coatings in food packaging. Therefore, unlike previous studies, this study also addresses the specific challenges of the industry related to the development of self-healing packaging and emphasizes the importance of these issues.

**Key Words:** self-healing, mechanisms, food packaging, film, coating

---

<sup>1</sup> (\*) To whom correspondence should be addressed.

E-mail: [f.arabgol@bzte.ac.ir](mailto:f.arabgol@bzte.ac.ir) and [arabgol54@yahoo.com](mailto:arabgol54@yahoo.com)

# خود ترمیم شونده بستر بندی پلیمری مواد غذایی

رضا باقری رنانی<sup>۱</sup>، فاطمه عربگل<sup>۱\*</sup>، آذین پیدایش<sup>۲</sup>

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

کدپستی: ۳۴۵۱۸۶۶۳۹۱

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

(\* مسئول مکاتبات، پیام نگار:

[f.arabgol@bzte.ac.ir](mailto:f.arabgol@bzte.ac.ir) , [arabgol54@yahoo.com](mailto:arabgol54@yahoo.com)

## چکیده

کاربرد مواد پلیمری خودترمیم‌شونده به شکل فیلم یا پوشش در صنعت بسته‌بندی مواد غذایی می‌تواند بسیار امیدوارکننده باشد؛ زیرا این بسته‌بندی‌ها در صورت آسیب دیدن می‌توانند به خودی خود یکپارچگی سطح و ویژگی‌های خود را ترمیم و بازیابی کنند. بسته‌بندی‌ها معمولاً به‌طور اجتناب‌ناپذیر و نامحسوسی در حین حمل و نقل، جابه‌جایی و ذخیره‌سازی آسیب می‌بینند و در این صورت، بخش‌های آسیب دیده بسته‌بندی‌های رایج، که فاقد قابلیت خودترمیم‌شوندگی هستند، به دلیل قرار گرفتن در معرض محیط، مستعد رشد میکروبی خواهند بود که این موضوع ممکن است کیفیت و امنیت ماده غذایی را به خطر بیندازد. در حال حاضر، در مطالعات مربوط به بسته‌بندی مواد غذایی، فیلم‌ها و پوشش‌های خودترمیم‌شونده بر اساس سازوکارهای ذاتی و غیرذاتی توسعه یافته‌اند. به‌طور خلاصه، خودترمیم‌شوندگی در سازوکار اول به صورت غیر خودکار و در حضور محرکی خارجی و در سازوکار دوم به صورت خودکار رخ می‌دهد. در این مطالعه، به سازوکارهای خودترمیم‌شوندگی، فیلم‌ها و پوشش‌های مبتنی بر آن‌ها پرداخته شده و کاربرد آن‌ها در زمینه بسته‌بندی مواد غذایی مورد بررسی قرار گرفته است. شایان ذکر است تاکنون فیلم‌ها و پوشش‌های خودترمیم‌شونده، عمدتاً در مقیاس آزمایشگاهی و به منظور انجام مطالعات علمی ساخته و بررسی شده‌اند. مقالات مروری اخیر نیز به تدریج محدودیت‌های واقعی صنعت در ارتباط با بهبود کاربرد عملی این فیلم‌ها و پوشش‌ها را در بخش بسته‌بندی مواد غذایی لحاظ کرده‌اند. از این رو، این مطالعه برخلاف مطالعات پیشین، چالش‌های خاص صنعت در رابطه با توسعه بسته‌بندی‌های خودترمیم‌شونده را نیز بررسی کرده و بر اهمیت آن‌ها تأکید نموده است.

**واژگان کلیدی:** خودترمیم‌شوندگی، سازوکارها، بسته‌بندی مواد غذایی، فیلم، پوشش

## مقدمه

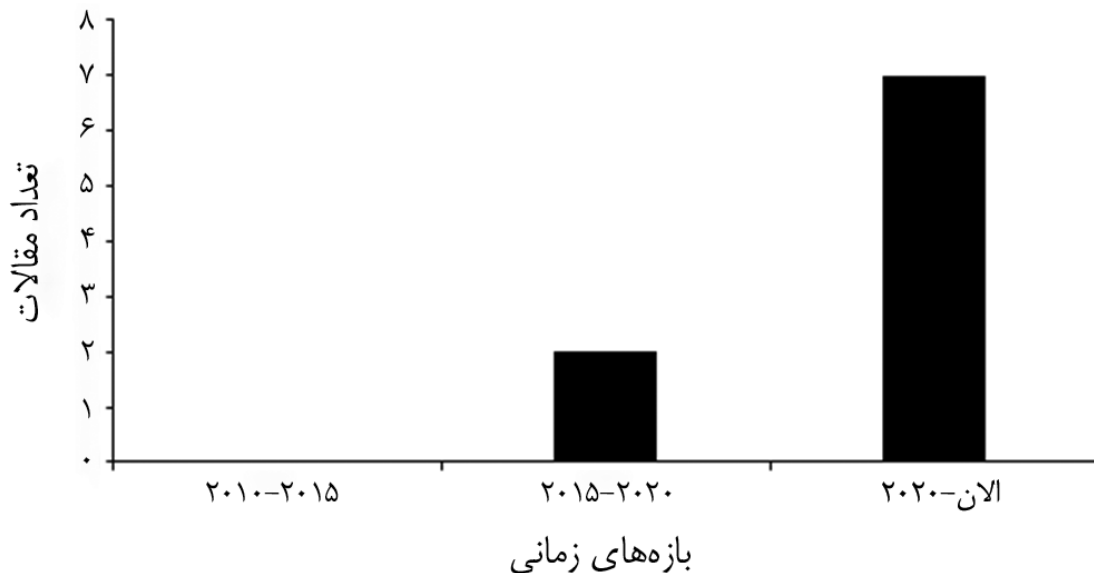
هر ساله هزاران نفر به دلیل بیماری‌های منتقله از غذا آسیب می‌بینند. این بیماری‌ها از این نظر که شایع هستند و هزینه‌های زیادی بر جامعه تحمیل می‌کنند، اهمیت جهانی دارند. بیش از ۲۵۰ بیماری مختلف منتقله از غذا تعریف شده است که بیشتر آن‌ها ناشی از پاتوژن‌های غذایی هستند که می‌توانند از طریق غذا منتقل شوند و گاهاً پیامدهای

شدید و کشنده‌ای دارند. دسته‌ی دیگر بیماری‌های منتقله از غذا، مسمومیت‌هایی هستند که در اثر سموم مضر یا مواد شیمیایی که غذا را آلوده کرده‌اند، مانند قارچ‌های سمی ایجاد می‌شوند. یکی از راه‌های جلوگیری از بروز این مشکلات، بسته‌بندی کردن مواد غذایی است. وظیفه‌ی اصلی بسته‌بندی مواد غذایی در درجه‌ی اول، محافظت از مواد غذایی در برابر آلودگی‌های محیطی و تضمین ایمنی آن‌ها است. امروزه با پیشرفت صنعت بسته‌بندی، این مواد قادر هستند تا از مواد غذایی در برابر سایر تأثیرات محیطی مانند بو، ضربه، گرد و غبار، دما، آسیب‌های فیزیکی، نور، میکروارگانیسم‌ها و رطوبت نیز محافظت کنند و به این ترتیب عمر مفید مواد غذایی را نیز افزایش دهند [۳-۱].

اگرچه قدمت بسته‌بندی مواد غذایی به دوران ماقبل تاریخ بازمی‌گردد، با پی بردن به اهمیت این موضوع، کاربرد صنعتی آن از قرن هجدهم میلادی آغاز شد و در قرن بیستم نیز پیشرفت‌های بسیاری در فناوری بسته‌بندی به‌وجود آمد. تاکنون مواد مختلفی برای بسته‌بندی مواد غذایی به‌کار گرفته شده است. به‌عنوان مثال، می‌توان فلزات، شیشه و پلیمرها را نام برد. در میان این مواد، با پیشرفت فناوری بسته‌بندی، گسترده‌ترین مطالعات بر روی پلیمرها انجام شده است. زیرا این مواد، انعطاف‌پذیری ساختاری بالایی دارند که قابلیت اصلاح ویژگی‌های آن‌ها را فراهم می‌کند. پلیمرها در کاربرد بسته‌بندی می‌توانند به‌صورت فیلم یا پوشش مورد استفاده قرار گیرند. گفتنی است که فیلم‌ها با پوشش‌ها از این جهت متفاوت هستند 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 [۲، ۴، ۵]. به‌عنوان مثال، پژوهشگران، پوشش‌هایی مبتنی بر آلزینات و تقویت‌کننده‌های روغن سیر و ژل آلونهورا تهیه کردند و خواص آن‌ها و توانایی‌شان برای افزایش زمان ماندگاری گوجه‌فرنگی را مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها دریافتند که پوشش‌های تهیه شده، خواص سدشوندگی و ضد میکروبی خوبی دارند و محافظت‌کنندگی مناسبی در برابر اشعه‌ی ماوراء بنفش نشان می‌دهند. گوجه‌هایی که به روش غوطه‌وری پوشش داده شده بودند نیز در طول ۱۶ روز نگهداری در دمای محیط، فاسد شدن سطح‌شان قابل توجه نبود و تنها ۸ درصد از جرم‌شان را از دست داده بودند. این در حالی بود که گوجه‌هایی که پوشش نداشتند، فاسد شدن سطح‌شان از روز ششم آغاز شده بود و در طول دوره‌ی نگهداری و انبارش (ذخیرسازی)، ۴۷ درصد از جرم‌شان را از دست داده بودند [۶]. در مطالعه‌ی دیگر، کارایی فیلم‌های کامپوزیتی تهیه شده بر پایه‌ی کربوکسی متیل کیتوسان و پکتین و تقویت‌کننده‌های روغن میخک و آنتوسیانین بلوبری، برای بسته‌بندی میوه‌ی توت‌فرنگی بررسی شده است. این فیلم‌ها که قابلیت سدشوندگی در برابر بخار آب و ویژگی‌های ضداکسایشی و ضد میکروبی خوبی از خود نشان دادند، عملکرد مناسب آن‌ها برای بسته‌بندی نیز مورد تأیید قرار گرفت. زیرا توت‌فرنگی‌های بسته‌بندی شده در طول ۷ روز نگهداری و انبارش، عاری از رشد باکتری‌های فاسدکننده بوده و میزان کمی از جرم خود را از دست داده بودند. در حالی‌که بر روی سطح توت‌فرنگی‌های بدون بسته‌بندی در روز پنجم نگهداری و انبارش، کپک‌هایی مشاهده شده بود و در روز هفتم، به‌وضوح فاسد شده بودند. همچنین کاهش جرم قابل‌توجهی نیز از خود نشان داده بودند [۷].

با وجود پیشرفت‌هایی که در صنعت بسته‌بندی مواد غذایی رخ داده است، 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 آسیب‌پذیر هستند و در صورت صدمه دیدن آن‌ها، توانایی‌شان برای محافظت از مواد غذایی در برابر تأثیرات خارجی کاهش می‌یابد و از طرف 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 به‌کارگرفته شود. یک راهکار مناسب این است که بسته‌بندی‌های مواد غذایی قابلیت خودترمیم‌شوندگی داشته باشند. با وجود این که اولین مطالعه بر روی مواد خودترمیم‌شونده در سال ۱۹۷۰ توسط مالینسکی و همکاران بر روی چندلایه‌های ورق آلومینیوم و پلی‌وینیل استات انجام گرفت، اما تلاش‌های متعاقب برای بررسی پیشرفت‌های مرتبط در زمینه بسته‌بندی پلیمری مواد غذایی و نیز مطالعه سازوکارهای آن، تاکنون اندک بوده‌اند [۴, ۸].

این موضوع با نتایج جستجو در پایگاه علمی Web of Science (WOS)، با استفاده از کلیدواژه‌های مربوط به خودترمیم‌شوندگی و بسته‌بندی مواد غذایی که نموداری بر اساس آن در شکل ۱ آورده شده است، مطابقت دارد؛ که نشان می‌دهد انجام مطالعات علمی در زمینه خودترمیم‌شوندگی بسته‌بندی‌های مواد غذایی از سال ۲۰۱۷ آغاز شده و تعداد مقالات به چاپ رسیده در این زمینه، همچنان نیز اندک است. با این حال، روند روبه‌رشد این مطالعات در سال‌های اخیر امیدوارکننده است، هرچند که تعداد کمی از این مطالعات به محدودیت‌های صنعتی توجه داشته‌اند. از این رو، در این مطالعه مروری، علاوه بر بررسی سازوکارهای خودترمیم‌شوندگی در فیلم‌ها و پوشش‌های پلیمری، مزایا و محدودیت‌های استفاده از آن در زمینه بسته‌بندی مواد غذایی و همچنین چالش‌های صنعتی مرتبط با آن مورد بررسی قرار گرفته و بر لزوم انجام تحقیقات بیشتر در جهت رفع آن‌ها تأکید شده است. با برطرف شدن این محدودیت‌ها و در دسترس قرار گرفتن بسته‌بندی‌های خودترمیم‌شونده، عمر مواد غذایی محصور در بسته‌بندی‌های پلیمری خودترمیم‌شونده، در صورت آسیب دیدن پوشش بسته‌بندی، از طریق بازیابی خواص ویژه بسته‌بندی، مانند خاصیت سدشوندگی در برابر اکسیژن، می‌تواند تا حد ممکن افزایش یابد.



شکل ۱- نمودار پیشینه و روند مطالعات علمی انجام شده درباره‌ی خودترمیم‌شوندگی بسته‌بندی‌های مواد غذایی بر اساس نتایج جستجو در پایگاه Web of Science

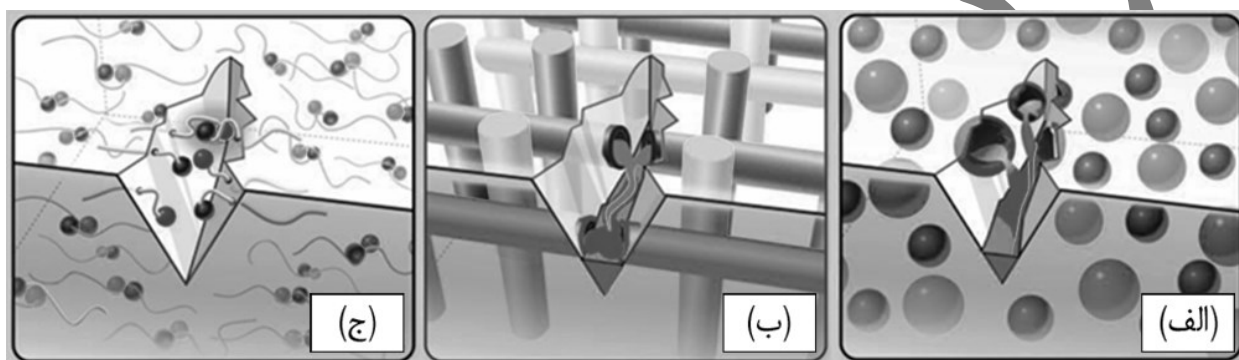
#### خودترمیم‌شوندگی و بسته‌بندی‌های دارای این قابلیت

ویژگی خودترمیم‌شوندگی، خاصیتی است که به‌طور طبیعی در مواد زیستی یافت می‌شود. بنابراین زیست‌شناسی آن‌ها می‌تواند برای طراحی مواد خودترمیم‌شونده‌ی مصنوعی استفاده شود. به‌طور کلی، این ویژگی به توانایی یک ماده برای بازیابی یا ترمیم در برابر آسیب‌ها، بدون مداخله‌ی خارجی اشاره دارد [۹].

مواد مختلفی مانند پلیمرها، فلزات و سرامیک‌ها می‌توانند برای طراحی سازوکارهای خودترمیم‌شوندگی به‌کار گرفته شوند. البته پلیمرهای خودترمیم‌شونده به‌دلیل توانایی‌شان در افزایش عمر مفید مواد که باعث کاهش اتلاف منابع و انرژی می‌شوند، مورد توجه بیشتری قرار گرفته‌اند. شایان ذکر است که مواد پلیمری بدون خاصیت خودترمیم‌شوندگی نیز در کاربرد بسته‌بندی مواد غذایی عملکرد مثبتی داشته‌اند. به‌طور مثال، بر مبنای مطالعات مختلف استفاده از پوشش‌های خوراکی بر روی میوه‌ها و سبزیجات می‌تواند ماندگاری آن‌ها را طولانی‌تر کند. اما این پوشش‌ها مستعد آسیب هستند و این ممکن است بر کیفیت غذا تأثیر منفی بگذارد. زیرا ناحیه‌ی آسیب دیده در معرض محیط قرار گرفته و مستعد رشد میکروبی خواهد بود. بنابراین، تقاضا برای پوشش‌های خودترمیم‌شونده به‌دلیل طول عمر بیشتر و پایداری بهتر در مقایسه با پوشش‌های سنتی افزایش یافته است [۹].

#### سازوکارهای خودترمیم‌شوندگی

در حال حاضر قابلیت خودترمیم‌شوندگی در مواد بسته‌بندی، مانند پوشش‌ها یا فیلم‌ها از طریق دو سازوکار ذاتی<sup>۱</sup> و غیرذاتی<sup>۲</sup> قابل دستیابی است. به‌طورکلی، در مورد تفاوت این دو سازوکار، می‌توان گفت که سازوکار غیرذاتی به‌صورت خودکار عمل می‌کند و با آسیب دیدن ماتریس پلیمری، عوامل ترمیم‌کننده که درون ماتریس، در یک سامانه‌ی کپسولی یا یک سامانه‌ی رگدار، جاگذاری شده‌اند، آزاد شده و آسیب وارد شده به ماتریس را ترمیم می‌کنند. این در حالی است که فرآیند خودترمیم‌شوندگی ذاتی، به‌صورت غیرخودکار و در حضور یک محرک خارجی (مانند گرما، نور یا میدان مغناطیسی) صورت می‌گیرد و بر اساس برهمکنش‌های برگشت‌پذیر در ماتریس و بازسازی پیوندها در آن عمل می‌کند [۴، ۸، ۹]. در شکل ۲، عملکرد سازوکارهای خودترمیم‌شوندگی با یکدیگر مقایسه شده است [۱۰].



شکل ۲- عملکردهای انواع سازوکارهای خود ترمیم شونده از جمله: (الف) سازوکار غیرذاتی (بر پایه‌ی سامانه‌ی کپسولی)، (ب) سازوکار غیرذاتی (بر پایه‌ی سامانه‌ی رگدار) و (ج) سازوکار ذاتی [۱۰]

در سازوکار خودترمیم‌شوندگی غیرذاتی، ماتریس پلیمری به‌خودی‌خود و بدون استفاده از عامل ترمیم‌کننده، قابل ترمیم نیست. بنابراین عامل ترمیم‌کننده به‌عنوان یک فاز جدا شده، باید در محفظه‌هایی که از قبل درون ماتریس پراکنده شده‌اند، ذخیره شود. بر اساس نوع محفظه، سازوکار غیرذاتی، خود می‌تواند به دو دسته‌ی ترمیم‌شوندگی بر پایه‌ی سامانه‌ی کپسولی و ترمیم‌شوندگی بر پایه‌ی سامانه‌ی رگدار، طبقه‌بندی شود. همچنین در برخی از سامانه‌های خودترمیم‌شونده‌ی غیرذاتی، از کاتالیزور نیز استفاده می‌شود. بر این اساس، سازوکار خودترمیم‌شوندگی غیرذاتی می‌تواند کاتالیزوری یا غیرکاتالیزوری نیز باشد. با این حال، کاتالیزورها نیز باید در یک سامانه‌ی کپسولی یا در یک سامانه‌ی رگدار جاگذاری شوند. شایان ذکر است که در این سامانه‌ها به این دلیل از کاتالیزور استفاده می‌شود که بتوان با شروع یک واکنش شیمیایی، عامل ترمیم‌کننده‌ی سیال را در محل آسیب دیدگی به حالت جامد تبدیل کرد و از این طریق یکپارچگی سطح را بازیابی نمود. در سازوکار غیرذاتی، عامل ترمیم‌کننده باید در داخل

<sup>1</sup> Intrinsic

<sup>2</sup> Extrinsic

ماتریس پلیمری، پایدار باشد و بتواند تا محل آسیب جریان یابد و همچنین فوراً واکنش نشان دهد تا در زمان معقوله باز یابی حاصل شود [۹، ۱۱، ۱۲].

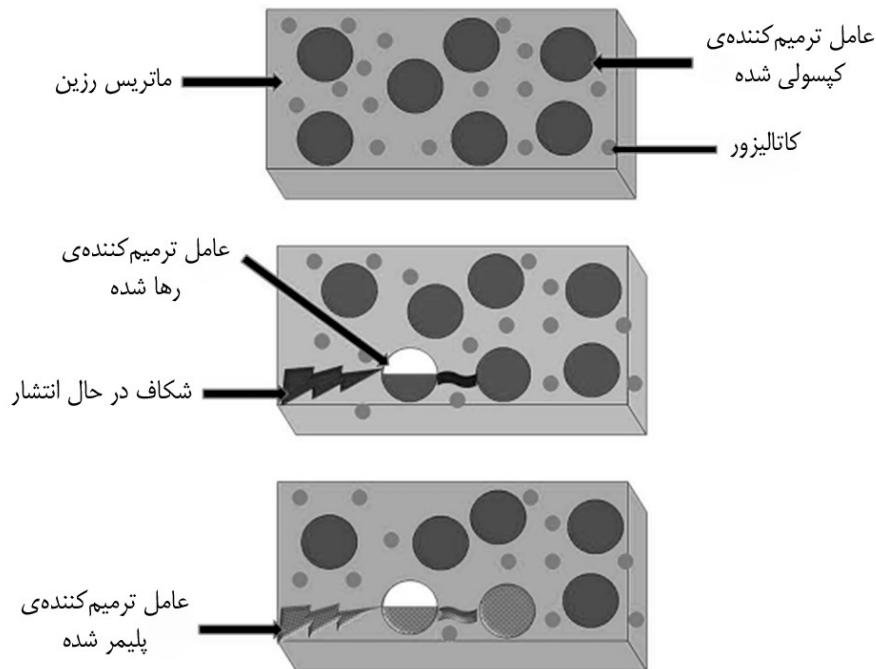
در سال ۲۰۰۱، برای نخستین بار توسط وایت و همکاران، کامپوزیت پلیمری خودترمیم‌شونده بر پایه‌ی سامانه‌ی کپسولی معرفی شد و پس از آن بود که عصر جدیدی از پوشش‌های پلیمری خودترمیم‌شونده آغاز شد. در این کامپوزیت از دی‌سیکلوپنتادین (DCPD)<sup>۱</sup> به‌عنوان عامل ترمیم‌کننده‌ی مونومری استفاده شد که در ریزکپسول‌های ساخته شده از اوره‌فرمالدئید، ذخیره شده بود و این ریزکپسول‌ها نیز به‌طور پراکنده در داخل ماتریس پلیمری جاگذاری شده بودند. عملکرد این کامپوزیت به این شکل بود که پس از انتشار ترک، ریزکپسول‌ها از هم گسیخته شدند و از برقراری تماس عامل ترمیم‌کننده با کاتالیزور گراب<sup>۲</sup> که در ماتریس پراکنده شده بود، واکنش بسپارش آغاز شد و ترک‌ها همانند آنچه که در شکل ۳ آمده است، ترمیم شدند. واکنش بسپارشی که در این سامانه رخ داده، از نوع بسپارش جانشینی متقابل حلقه‌گشا (ROMP)<sup>۳</sup> است [۱۱-۱۳].

سازوکار خودترمیم‌شوندگی بر پایه‌ی سامانه‌ی کپسولی، نسبت به سازوکار ذاتی، این مزیت را دارد که می‌تواند حجم آسیب دیده‌ی بزرگتری را ترمیم کند. البته عملکرد و ساختار این سازوکار همیشه به یک شکل نیست و بر این اساس می‌توان آن را به سامانه‌های کپسول و کاتالیزور، تک-کپسولی و دو-کپسولی تقسیم بندی کرد. به‌طور مثال، در یک سامانه‌ی کپسول و کاتالیزور، هنگامی که کاتالیزور گراب (عامل بسپارش سیال ترمیم‌کننده) به‌همراه عامل ترمیم‌کننده‌ی کپسول‌دار شده که در رزین ماتریس قرار دارد و در اثر آسیب دیدگی ماتریس ترک ایجاد می‌شود، در ابتدا این ترک‌ها ریزکپسول‌ها را می‌شکافند و از این طریق عامل ترمیم‌کننده به‌واسطه‌ی عمل مویینه، به‌سوی محل ترک‌خورده آزاد می‌شود. همچنین ترک‌های ایجاد شده باعث می‌شوند تا کاتالیزور که به‌صورت تصادفی در ماتریس پراکنده شده، با مایع ترمیم‌کننده تماس پیدا کند و در نتیجه باعث فرآیند بسپارش شود که در اثر آن، سطوح ترک‌خورده بسته می‌شوند و ترمیم آسیب، صورت می‌گیرد. این در حالی است که در سامانه‌ی دو-کپسولی، به جای داشتن کپسول‌ها و کاتالیزور که در رزین پلیمری جاگذاری شده باشند، مونومر و عامل بسپارش/یا سخت‌کننده به‌طور جداگانه کپسول‌دار شده و در کامپوزیت پلیمری تعبیه شده‌اند. در این سامانه با تشکیل ترک و شکافته شدن کپسول‌ها، مونومر در تماس با سخت‌کننده، پلیمری شده و در نهایت ترک‌ها ترمیم می‌یابند. از طرف دیگر، در سامانه‌ی تک-کپسولی، تنها کپسول‌های حاوی حلال در ماتریس پلیمری گرماسخت، گنجانده شده‌اند و حلال در این سامانه به‌عنوان عامل ترک‌کننده بر روی سطح پلیمر عمل می‌کند و باعث تورم توده‌ی پلیمر می‌شود که منجر به خزش و در هم قفل شدن زنجیرها در ناحیه‌ی ترک خورده می‌شود. بدین گونه ترک ترمیم و خواص مکانیکی کامپوزیت باز یابی می‌شود [۹-۱۱].

<sup>1</sup> Dicyclopentadiene

<sup>2</sup> Grubb

<sup>3</sup> Ring-Opening Metathesis Polymerization

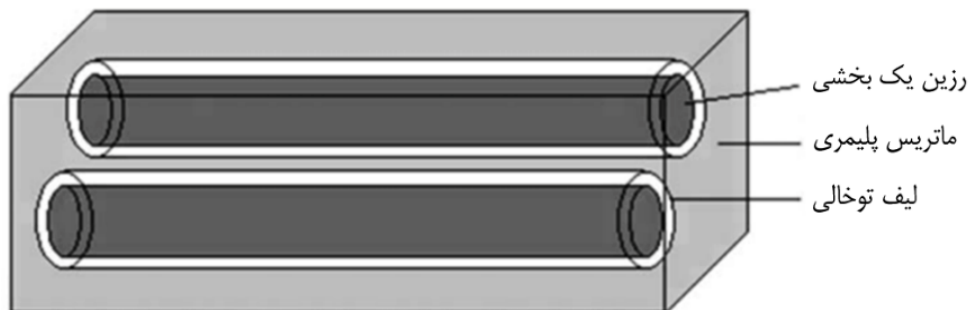


شکل ۳- فرآیند خودترمیم‌شوندگی ماده‌ای با عامل ترمیم‌کننده‌ی کیسول‌دار شده که به همراه کاتالیزور در ماتریس

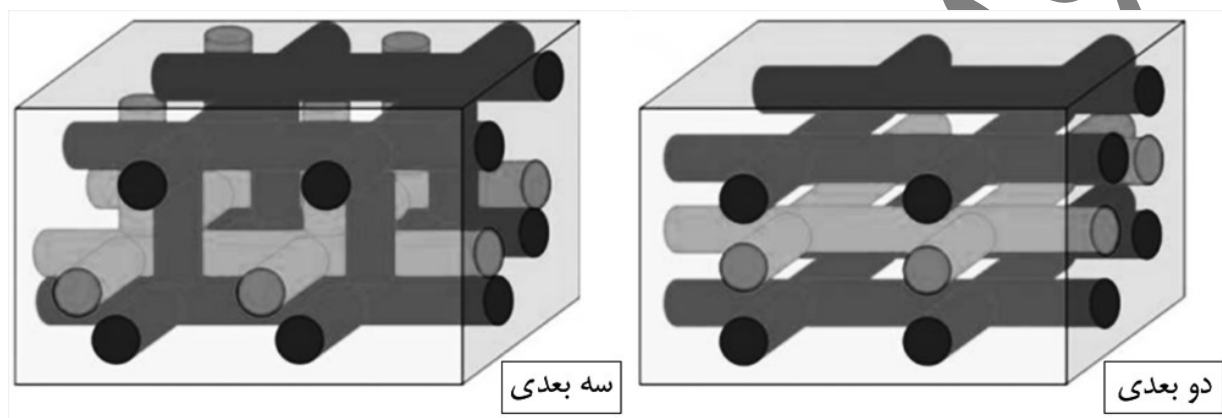
کامپوزیت به صورت پراکنده جاگذاری شده‌اند [۱۲]

شیوه‌ی کارکرد سازوکار خودترمیم‌شوندگی بر پایه‌ی سامانه‌های رگ‌دار همانند آن چیزی است که در سامانه‌های کیسولی رخ می‌دهد. با این تفاوت که در سامانه‌ی رگ‌دار، عامل ترمیم‌کننده در ساختاری به شکل مویرگ‌ها یا شبکه‌ای از کانال‌های توخالی، جاگذاری شده است. این شبکه در ماتریسی پلیمری قرار می‌گیرد و می‌تواند به صورت یک بعدی باشد یا کانال‌های آن به صورت دو بعدی یا سه بعدی به هم متصل شده باشند. سامانه‌های رگ‌دار نسبت به سامانه‌های کیسولی، می‌توانند مقدار بیشتری از مواد ترمیم‌کننده را در خود ذخیره کنند و نیز توانایی ترمیم ترک‌هایی با ابعاد بزرگتر را دارند. همچنین شبکه‌های تشکیل شده از کانال‌های توخالی که در این سامانه‌ها وجود دارند، می‌توانند به عنوان تقویت‌کننده نیز عمل کنند. ایده‌ی بازیابی آسیب وارد شده توسط عامل ترمیم‌کننده که در ریزالیاف توخالی ذخیره شده باشد، ابتدا توسط درای و همکارانش در سال ۱۹۹۳ ارائه شد. از این رو کاربرد الیاف و لوله‌های توخالی از جنس شیشه به صورت یک بعدی، از روش‌های مرسوم خود ترمیم‌شوندگی غیرذاتی هستند که نمونه‌ای از آن در شکل ۴ نشان داده شده است. از طرف دیگر، سامانه‌های دو بعدی و سه بعدی که طرحی از آن‌ها در شکل ۵ آورده شده است، قابلیت ترمیم یک ناحیه‌ی آسیب دیده برای بیش از یکبار را دارند. زیرا در این سامانه‌ها، شبکه‌ی رگ‌دار، به هم پیوسته است و بنابراین ناحیه‌ی ترک خورده دارای راه‌های ارتباطی متعددی به عامل ترمیم‌کننده است [۱۱، ۱۲، ۱۴، ۱۵].





شکل ۴- سامانه‌ی خود ترمیم‌شونده‌ی رگ‌دار یک بعدی بر پایه‌ی الیاف توخالی شیشه که رزین ترمیم‌کننده درون آن‌ها جاگذاری شده است [۱۱]



شکل ۵- سامانه‌های خود ترمیم‌شونده‌ی رگ‌دار دو بعدی و سه بعدی که رزین اپوکسی ترمیم‌کننده و عامل سخت‌کننده به‌صورت جداگانه در آن‌ها جاگذاری شده‌اند [۱۱]

برخلاف سازوکارهای غیرذاتی که نیاز به عوامل ترمیم‌کننده‌ی تعبیه شده از قبل دارند، موادی که دارای قابلیت خود ترمیم‌شوندگی ذاتی هستند، می‌توانند به‌خودی‌خود ترک‌ها را بازیابی کنند. قابلیت خود ترمیم‌شوندگی ذاتی مواد پلیمری از طریق برگشت‌پذیری طبیعی پیوندها و برهم‌کنش‌های موجود در ماتریس پلیمری حاصل می‌شود. بنابراین چنین موادی این توانایی را دارند که بتوانند چندین چرخه‌ی خود ترمیم‌شوندگی را تجربه کنند که این ویژگی، آن‌ها را برای استفاده‌ی طولانی مدت جذاب می‌کند. برهم‌کنش‌هایی که سبب پدید آمدن سازوکار خود ترمیم‌شوندگی ذاتی می‌شوند شامل برهم‌کنش‌های کووالانسی و غیرکووالانسی پویا هستند. پیوندهای هیدروژنی، برهم‌کنش میزبان-میهمان، برهم‌کنش الکترواستاتیکی و انباشت  $\pi$ - $\pi$  از جمله برهم‌کنش‌های غیرکووالانسی پویا هستند. در حالی که پیوندهای ایمینی<sup>۱</sup>، پیوندهای آسیل هیدرازون، واکنش دیلز-آلدر و واکنش‌های رترو-دیلز-آلدر نمونه‌هایی از برهم‌کنش‌های کووالانسی پویا هستند [۸، ۱۶، ۱۷].

<sup>1</sup> Imine Bonds

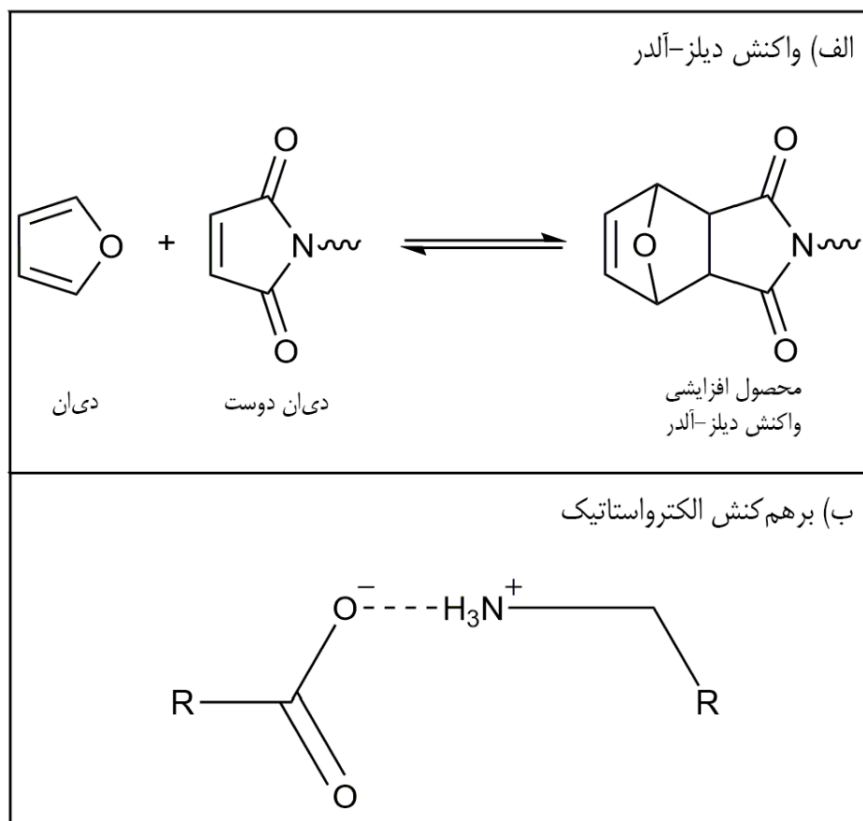
به‌عنوان مثال، واکنش دیلز-آلدر (DA)<sup>۱</sup> که یک برهمکنش کووالانسی پویا است و در تهیه‌ی پوشش‌های هوشمند مورد استفاده قرار می‌گیرد، یک واکنش برگشت‌پذیر حرارتی است. به این معنی که حلقه‌ای که در اثر این واکنش تشکیل شده، می‌تواند شکسته شود و پس از گرم شدن به حالت اولیه‌ی خود بازگردد. این واکنش که طرحی از آن در شکل ۶ (الف) آورده شده است، در واقع یک واکنش الکتروسیکلی با مشخصه‌هایی از شیمی کلیک<sup>۲</sup> است که بین یک دی‌ان مزدوج و یک ترکیب دی‌ان دوست رخ می‌دهد و دارای مزایایی از جمله بازده بالا، گزینش‌پذیری و واکنش بالا و عدم ایجاد واکنش‌های جانبی است. با این حال، فرآیندهای خودترمیم‌شوندگی که توسط واکنش DA، ایجاد می‌شوند معمولاً زمان‌بر هستند و به شرایط گرمایشی نیاز دارند [۱۲, ۱۸].

از طرف دیگر برهمکنش‌های الکترواستاتیکی که یکی از انواع برهمکنش‌های غیرکووالانسی پویا هستند، به‌طور گسترده‌تری برای طراحی فیلم‌های بسته‌بندی مواد غذایی خودترمیم‌شونده مورد استفاده قرار گرفته‌اند. این برهم‌کنش‌ها، در واقع یک اثر جاذبه یا دافعه بین مولکول‌هایی هستند که بار الکتریکی دارند. این برهم‌کنش‌ها را می‌توان به دو نوع تقسیم‌بندی کرد: (الف) جاذبه‌های الکترواستاتیکی که بین مولکول‌هایی با بارهای مخالف برقرار می‌شوند و (ب) دافعه‌های الکترواستاتیکی که بین مولکول‌هایی با بارهای یکسان رخ می‌دهند. همچنین گفتنی است که استحکام برهمکنش‌های الکترواستاتیکی از مقدار ۱ کیلوژول بر مول تا ۲۵ کیلوژول بر مول متغیر است. طرحی از یک ساختار الکترواستاتیکی رایج برای خودترمیم‌شوندگی در شکل ۶ (ب) آورده شده است [۴, ۱۹, ۲۰].

---

<sup>1</sup> Diels Alder

<sup>2</sup> Click Chemistry



شکل ۶- طرح های کلی از: الف) واکنش برگشت پذیر حرارتی دیلز-آلدر و ب) برهم کنش الکترواستاتیک برای به وجود آوردن سازوکار خودترمیم شونده [۱۲، ۱۹]

#### کاربرد خودترمیم شونده در بسته بندی مواد غذایی

استفاده از پلیمرهای خودترمیم شونده در صنایع غذایی دامنه ای کاربردی وسیعی دارد. برای مثال، فیلم ها و پوشش های پلیمری خودترمیم شونده برای بسته بندی مورد استفاده قرار می گیرند. زیرا می توانند بخش های آسیب دیده خود را ترمیم کرده و ویژگی های خود را بازیابی کنند تا از کاهش کیفیت غذا و از دست رفتن مواد مغذی جلوگیری شود [۹].

به طور کلی، طراحی مواد خود ترمیم شونده برای کاربرد در بسته بندی مواد غذایی باید از مجموعه ای از قواعد پیروی کند. یکی از این موارد، اقتصادی و غیرسمی بودن مواد استفاده شده است که باید دارای توانایی خودترمیم شونده باشند. همچنین باید تأثیر ناچیزی بر طعم و بافت غذا داشته باشند. واکنش های خودترمیم شونده باید به صورت خودکار رخ دهند یا در پاسخ به محرکی خارجی باشند. علاوه بر این، واکنش های خودترمیم شونده باید بتوانند به طور همزمان هر دو خاصیت ریزساختاری و عملکردی مواد بسته بندی را بازیابی کنند. در کنار این موارد، برای دستیابی به عملکرد بهینه پوشش یا فیلم بسته بندی با قابلیت خودترمیم شونده، باید عوامل متعدد دیگری مانند ضخامت، استحکام مکانیکی، شفافیت، عبورپذیری در برابر نفوذ گاز و بخار آب، قابلیت انعطاف-

پذیری و غیره را در نظر گرفت. هر یک از این عوامل در کیفیت ماده‌ی بسته‌بندی خودترمیم‌شونده، تأثیر بسزایی دارند. به‌عنوان مثال، ضخامت فیلم یا پوشش ممکن است بر تعداد دفعاتی که می‌تواند آسیب‌های وارد شده را ترمیم کند، تأثیر بگذارد. در واقع، با وجود این‌که پوشش‌هایی با ضخامت‌های متفاوت، اختلاف خاصی در زمان ترمیم-شدگی نشان نمی‌دهند، اما با افزایش ضخامت لایه‌ها تعداد چرخه‌های تکرار خودترمیم‌شوندگی افزایش می‌یابد [۲۱-۲۳].

تاکنون رویکردهای مختلفی برای تولید فیلم‌ها و پوشش‌های پلیمری به‌کار گرفته شده‌اند. اما در رابطه با فیلم‌ها و پوشش‌های خودترمیم‌شونده، روش لایه‌گذاری لایه‌به‌لایه (LbL)<sup>۱</sup> به‌دلیل مزایای این روش 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 بر روی سطوح مختلف، از جمله بسترهای غیر یونی و غیر قطبی تشکیل شود. به‌این صورت که اولین لایه‌ی نشانده شده در این روش، به‌طور مؤثر به سطح زیرلایه یا بستر چسبیده و نقص‌های آن را پر می‌کند. در روش LbL برای نشان دادن تعداد مشخصی از لایه‌ها، چرخه‌های لایه‌گذاری تکرار می‌شوند و لایه‌گذاری نیز به‌روش‌های افشانه کردن، پوشش‌دهی از طریق غوطه‌وری و پوشش‌دهی چرخشی انجام می‌شود [۴، ۹، ۲۲، ۲۴].

فیلم‌های خودترمیم‌شونده به‌این دلیل مورد توجه قرار می‌گیرند که آسیب‌های تصادفی در حین جابه‌جایی و حمل و نقل کالاها ممکن است کارایی محافظتی بسته‌بندی‌های رایج را تضعیف کنند. بنابراین تلاش‌های تحقیقاتی زیادی در حال انجام است تا بتوان به‌صورت عملی از فیلم‌های خودترمیم‌شونده که قادر به بازیابی سطح و ویژگی‌های خود باشند برای بسته‌بندی کالاها، مختلف به‌خصوص مواد غذایی استفاده نمود. در همین راستا، در یک پژوهش، فیلم‌های پلی‌الکترولیتی تشکیل شده از کربوکسی‌متیل سلولز سدیم (CMC)<sup>۲</sup> و کیتوسان (CS)<sup>۳</sup>، به‌روش لایه‌گذاری لایه‌به‌لایه آماده گردید و کارایی آن‌ها برای بسته‌بندی سیب‌های برش خورده، مورد بررسی قرار گرفت. توانایی خودترمیم‌شوندگی این فیلم‌ها نیز که در اثر برهم‌کنش الکترواستاتیکی بین گروه‌های  $\text{NH}_3^+$  در CS و گروه‌های  $\text{COO}^-$  در CMC بوده، بسیار مناسب گزارش شده است. به‌طوری که می‌توانستند شکاف‌های ایجاد شده را از طریق متورم شدن در اثر محرک آب، در عرض ۱۰ دقیقه ترمیم کنند و همچنین قادر بودند حفره‌های بسیار بزرگتر از ضخامت فیلم را نیز در مدت تقریباً ۳۰ دقیقه، کاملاً پُر کنند. قابلیت خودترمیم‌شوندگی این فیلم‌ها در کنار ویژگی‌های ضدآکسنده و ضد میکروبی بودن، باعث شد این فیلم‌ها عملکرد مناسبی برای بسته‌بندی سیب‌های برش خورده از خود نشان دهند. به‌طوری که توانایی آن‌ها در کنترل قهوه‌ای شدن میوه‌ها، در یک دوره‌ی ذخیره-

<sup>1</sup> Layer-by-Layer

<sup>2</sup> Carboxy Methylcellulose Sodium

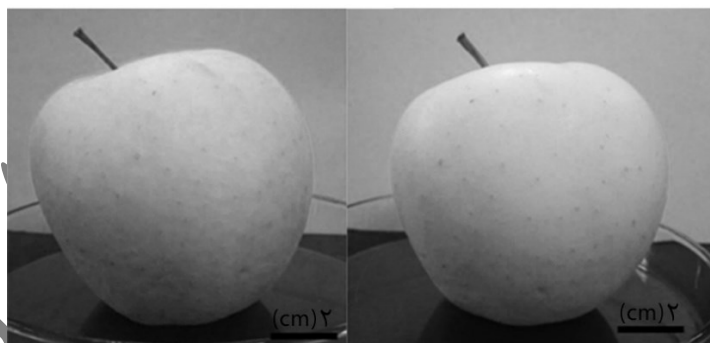
<sup>3</sup> Chitosan

سازی ۱۰ ساعته مشهود بوده و همچنین توانستند افت جرم میوه‌ها را در طول مدت ذخیره‌سازی از ۸٪ به ۶٪، کاهش دهند [۸, ۲۵].

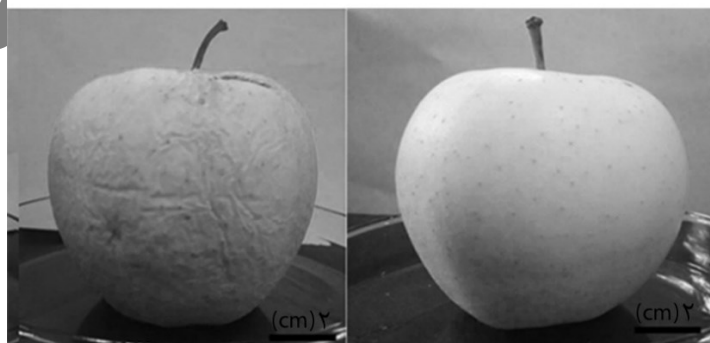
پوشش‌های خودترمیم‌شونده را نیز می‌توان مستقیماً روی سطح غذا اعمال کرد تا بتوان از طریق کاهش انتقال بخار آب، کنترل نفوذپذیری اکسیژن و جلوگیری از اکسیداسیون، عمر مفید ماده‌ی غذایی را افزایش داد. به‌همین منظور، یانگ و همکاران پوشش‌هایی خودترمیم‌شونده تهیه کردند و آن‌ها را بر روی سیب اعمال کردند. نتیجه‌ی کار آن‌ها در شکل ۷ نشان داده شده است. این پوشش‌ها بر پایه‌ی سدیم آلزینات و ال-منتول-بتا-سیکلودکسترین پیوند شده به کیتوسان، تهیه شده و به‌روش لایه‌گذاری لایه‌به‌لایه از طریق غوطه‌وری بر روی سیب‌ها اعمال شده بودند. قابلیت خودترمیم‌شوندگی این پوشش‌ها، در نتیجه‌ی برهمکنش میزبان-میهمان بین بتا-سیکلودکسترین و ال-منتول بوده است. به‌این صورت که پس از آسیب دیدن در اثر محرک آب، پوشش به‌سرعت متورم شده و گروه‌های آزاد برای دستیابی به خودترمیم‌شوندگی به یکدیگر نزدیک می‌شدند. بازیابی و هموارشدن سطح پوشش در ناحیه‌ی آسیب‌دیده، تقریباً در مدت ۲۰ دقیقه انجام شد. همچنین در این مطالعه مشخص شد که برهمکنش‌های ایجاد شده در اثر افزودن ال-منتول منجر به ایجاد پوششی بسیار شفاف، صاف و متراکم با ویژگی‌های مکانیکی و خواص خودترمیم‌شوندگی بهتر می‌شود. به‌طورکلی پوشش‌های تهیه شده در این مطالعه، اثربخشی خود را در حفظ سفتی میوه (به‌میزان ۲۳/۱۵٪) و کاهش از دست دادن وزن آن (به‌میزان ۳۳/۴۹٪)، در طول ۳۰ روز انبارش و ذخیره‌سازی نشان دادند [۲۶].

روز سی‌ام

روز اول



پوشش  
داده شده



بدون  
پوشش

شکل ۷- تصاویر عینی از سیب‌های پوشش داده شده با پوشش مبتنی بر سدیم آلزینات و ال-منتول-بتا-

سیکلودکسترین و سیب‌های بدون پوشش در مدت ۳۰ روز ذخیره‌سازی [۲۶]

همچنین پوشش‌های خودترمیم‌شونده می‌توانند بر روی مواد بسته‌بندی دیگر اعمال شوند تا خواص آن‌ها را بهبود بخشند و در نتیجه، عمر بهره‌وری آن‌ها را افزایش دهند. برای مثال، در پژوهشی، پوشش‌های پلیمری مبتنی بر ریزکپسول‌ها تهیه شده و بر روی مقوای بسته‌بندی اعمال شدند تا عملکرد آن را بهبود ببخشند. ریزکپسول‌های موجود در این پوشش از ماده‌ی پلیمری اتیل سلولز ساخته شده و عوامل ترمیم‌کننده‌ی مبتنی بر روغن‌های مختلف گیاهی و حیوانی که خاصیت آبگریزی داشتند، درون آن‌ها جاگذاری شدند. نتایج این مطالعه نشان داد که با آزادسازی عوامل ترمیم‌کننده، رشد ترک‌ها در مقوا، خاتمه یافت. در عین حال با افزایش آبگریزی، به حفظ خواص سدشوندگی مقوا نیز کمک شد. شایان ذکر است که در زمینه‌ی بسته‌بندی مواد غذایی، برای تهیه‌ی بسته‌بندی‌های خودترمیم‌شونده با سازوکار غیرذاتی، از عوامل ترمیم‌کننده‌ی مبتنی بر روغن‌های طبیعی استفاده می‌شود. زیرا این مواد برای تماس با مواد غذایی بی‌خطر هستند [۹, ۲۷].

در جدول ۱، برخی دیگر از مطالعات انجام شده بر روی فیلم‌ها و پوشش‌های خودترمیم‌شونده برای کاربرد در بسته‌بندی مواد غذایی، گزارش شده است.

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

نوع بسته‌بندی	ترکیبات	سازوکار	بازدهی ترمیم شونده	مدت زمان ترمیم	مرجع
فیلم	کربوکسی متیل سلولز سدیم/ کیتوسان	ذاتی، برهم‌کنش‌های الکترواستاتیکی	-	در عرض ۱۰ دقیقه	[۲۵]
	کیتوسان/ سیتریک اسید/کولین کلراید	ذاتی، پیوندهای هیدروژنی	۷۲%	در عرض ۶۰ ثانیه	[۲۸]
پوشش	سدیم آلزینات/ ال-منتول-بتا- سیکلودکسترین/کیتوسان	ذاتی، برهم‌کنش میزبان-- میهمان	۴۹%/۵۹	در عرض ۲۰ دقیقه	[۲۶]
	سدیم آلزینات/کیتوسان	ذاتی، برهم‌کنش‌های الکترواستاتیکی و پیوندهای هیدروژنی	۹۷%	در عرض ۵ دقیقه	[۲۹]

چالش‌ها و محدودیت‌ها

در هنگام مطالعه در مورد فیلم‌ها و پوشش‌های خودترمیم‌شونده و کاربرد آن‌ها در بسته‌بندی مواد غذایی، نکات مثبت، قابل توجه هستند. اما شناخت چالش‌ها و محدودیت‌هایی که در رابطه با آن‌ها وجود دارند نیز امری ضروری است. یکی از مهم‌ترین چالش‌های موجود در ساخت بسته‌بندی خودترمیم‌شونده، انتخاب سازوکار خودترمیم‌شوندگی آن است. برای مثال، سامانه‌های خودترمیم‌شوندگی غیرذاتی برپایه‌ی ریزکپسول‌ها، این محدودیت را دارند که تنها یک بار می‌توانند یک محل آسیب‌دیده را ترمیم کنند. در این سامانه‌ها هنگامی که ناحیه‌ای ترمیم شده دوباره آسیب می‌بیند، خودترمیم‌شوندگی مجدداً نمی‌تواند رخ دهد. زیرا ریزکپسول‌هایی که دارای عامل ترمیم‌کننده بوده‌اند، تخلیه شده‌اند و عامل ترمیم‌کننده نیز به جامدی سخت تبدیل شده است. برخلاف سامانه‌های مبتنی بر ریزکپسول‌ها، سامانه‌ی خودترمیم‌شوندگی رگدار می‌تواند شبکه‌ی خود را با عوامل ترمیم‌کننده از منبعی خارجی یا با عوامل ترمیم‌کننده‌ی اضافی از ناحیه‌هایی که هنوز آسیب ندیده‌اند، پر کند و این امکان را فراهم کند تا چندین چرخه از خودترمیم‌شوندگی در یک محل اتفاق بیفتد. با این حال، با توجه به پیچیدگی طراحی و ساخت سامانه‌های رگدار، تاکید بیشتری بر استفاده از سامانه‌های مبتنی بر کپسول معطوف شده است [۹، ۳۰].

علاوه بر محدودیت‌های ذکر شده در ارتباط با سامانه‌های خودترمیم‌شونده‌ی غیرذاتی، کاربرد آن‌ها در تهیه‌ی پوشش‌ها و فیلم‌های بسته‌بندی مواد غذایی نیز مشکل‌ساز است. زیرا ممکن است عوامل ترمیم‌کننده‌ای که در این سامانه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند، ناپایدار باشند و به‌همین دلیل تحقیقات کنونی نشان می‌دهند که سازوکار خودترمیم‌شوندگی ذاتی به‌دلیل عدم وجود عوامل ترمیم‌کننده‌ی خارجی، برای بسته‌بندی مواد غذایی مناسب‌تر است و از طراحی پیچیده و هزینه‌ی اضافی سامانه‌های خودترمیم‌شوندگی غیرذاتی نیز جلوگیری می‌شود [۴، ۸].

هر دو برهم‌کنش‌های پویای غیرکووالانسی و نیز کووالانسی را می‌توان برای ساخت مواد خودترمیم‌شونده با سازوکار ذاتی، جهت بسته‌بندی مواد غذایی استفاده کرد. اما چالش اصلی در این رابطه، این است که این مواد بهتر است متکی بر محرک‌هایی مانند دمای اتاق یا اشعه‌ی ماوراء بنفش باشند که به‌راحتی در دسترس بوده یا به‌طور کلی متکی بر محرک‌ها نباشند. پیوندهای غیرکووالانسی پویا می‌توانند به‌طور مؤثری با انرژی خارجی کم یا بدون انرژی، در دمای اتاق ترمیم شوند. اما به‌دلیل نیروهای بین‌مولکولی ضعیف و برهم‌کنش‌های برگشت‌پذیر، از نظر مکانیکی ضعیف‌تر از پیوندهای کووالانسی پویا هستند. از طرف دیگر، تشکیل و تجزیه‌ی برگشت‌پذیر همزمان و پیوسته‌ی پیوندهای کووالانسی پویا معمولاً در پاسخ به نور، گرما و نیرو اتفاق می‌افتد و مواد خودترمیم‌شونده‌ی ایجاد شده می‌توانند پایداری بالایی را حتی پس از حذف محرک‌های خارجی از خود نشان دهند [۸، ۱۱].

جدا از چالش‌ها و محدودیت‌های مرتبط با سازوکارهای خودترمیم‌شوندگی، گاهی در تهیه‌ی پوشش‌ها و فیلم‌های بسته‌بندی، از افزودنی‌هایی استفاده می‌شود که برخی از آن‌ها ممکن است مشکل‌ساز باشند. نرم‌کننده‌ها، نمونه‌ای از این افزودنی‌ها هستند که برای بهبود انعطاف‌پذیری زنجیره‌های پلیمری و افزایش مقاومت فیلم تشکیل شده در برابر شکست، استفاده می‌شوند. مهاجرت این مواد شیمیایی از ماده‌ی بسته‌بندی به محصول غذایی، نه تنها به نگرانی‌ها در مورد سمی بودن می‌افزاید، بلکه ممکن است منجر به تغییراتی در ویژگی‌های حسی و کیفیت غذا

شود. گفتنی است پدیده‌ی مهاجرت، به‌عنوان انتقال انبوه مواد از ماده‌ی بسته‌بندی به ماده‌ی غذایی بسته‌بندی شده تعریف می‌شود. به‌منظور تعیین مشخصات ایمنی پوشش یا فیلم بسته‌بندی و حل این مشکل، می‌توان از آزمایش‌های مهاجرت استفاده کرد. اما چنین آزمایش‌هایی زمان‌بر و پرهزینه هستند. همچنین به‌دلیل عدم وجود روش‌های تحلیلی مناسب برای تعیین مقدار مواد مهاجر، دقت این آزمایش‌ها نیز با مشکل مواجه می‌شود. علاوه بر این، ترکیبات مختلف مواد غذایی و شرایط متفاوت نگهداری، ممکن است باعث تغییر در سطح مهاجرت مواد از ماده‌ی بسته‌بندی به غذای بسته‌بندی شده شود [۴].

### نگرشی مبتنی بر صنعت در مورد چالش‌های پیش‌روی بسته‌بندی‌های خودترمیم‌شونده

در کنار چالش‌هایی که در بالا ذکر شدند، در حال حاضر، کاربرد واقعی بسته‌بندی‌های خودترمیم‌شونده در صنعت مواد غذایی، عمدتاً به‌دلیل هزینه‌ی زیاد تولید آن‌ها و همچنین پیچیدگی موادی که برای تولید چنین فیلم‌ها و پوشش‌هایی مورد استفاده قرار می‌گیرند، محدود شده است [۸].

در صنعت بسته‌بندی مواد غذایی اغلب، پلی‌اتیلن (PE)<sup>۱</sup> و پلی‌پروپیلن (PP)<sup>۲</sup> برای تولید فیلم‌ها و پوشش‌های بسته‌بندی به‌کار برده می‌شوند؛ که این موضوع به‌دلیل خواص مناسبی است که آن‌ها علاوه بر هزینه‌ی کم ارائه می‌دهند. از جمله ویژگی‌های مناسب پلی‌پروپیلن می‌توان به خواص مکانیکی رضایت‌بخش، شفافیت، مقاومت حرارتی و مقاومت در برابر خوردگی مناسب و همچنین سدشوندگی خوب آن در برابر رطوبت اشاره کرد. پلی‌اتیلن نیز به‌دلیل چقرمگی و مقاومت بالا در برابر ضربه، مقاومت شیمیایی خوب و قابلیت سدشوندگی در برابر رطوبت، به‌طور گسترده در صنعت بسته‌بندی مورد استفاده قرار می‌گیرد [۳۱-۳۳]. با این حال، یکی از مهم‌ترین چالش‌های فیلم‌ها و پوشش‌های PE و PP برای کاربرد در صنعت بسته‌بندی مواد غذایی، سدشوندگی ضعیف آن‌ها در برابر اکسیژن است؛ چراکه برای محصولات حساس به اکسیژن، بسته‌بندی آن‌ها باید تا حد ممکن از نفوذ اکسیژن جلوگیری کنند. در مطالعات مختلف، نرخ عبور اکسیژن (OTR)<sup>۳</sup> برای فیلم‌های خالص PP و PE، به‌ترتیب در حدود ۱۴۰۰-۱۷۰۰ (cc/m<sup>2</sup>/24hr) [۳۲-۳۴] و ۱۳۰۰-۱۴۰۰ (cc/m<sup>2</sup>/24hr) [۳۱، ۳۵] گزارش شده است.

تهیه‌ی نانوکامپوزیت‌های پلیمری از طریق پراکنده کردن نانوپرکننده‌ها در ماتریس‌های پلیمری، راه‌حلی مناسب برای ارائه‌ی مواد بسته‌بندی با قابلیت سدشوندگی در نظر گرفته می‌شود. به‌عنوان مثال، نانوذرات خاک رس و نانوذرات سیلیکات که نانوپرکننده‌های مقرون‌به‌صرفه‌ای هستند، ذاتاً در برابر گازها نفوذ ناپذیر بوده و مسیر

<sup>1</sup> Polypropylene

<sup>2</sup> Polyethylene

<sup>3</sup> Oxygen Transmission Rate



ماریچی را برای عبور مولکول‌های گاز ایجاد می‌کنند که باعث می‌شود از انتشار آن‌ها در سراسر ماتریس جلوگیری شود [۳۱، ۳۵].

جدول ۲، مقادیر OTR فیلم‌های نانوکامپوزیتی مختلف بر پایه‌ی PP و PE که در مطالعات جداگانه مورد بررسی قرار گرفته‌اند را نشان می‌دهد.

همانطور که از نتایج جدول مشخص است، تلاش برای توسعه‌ی فیلم‌ها و پوشش‌های نانوکامپوزیتی بر پایه‌ی ماتریس‌های پلیمری مقرون‌به‌صرفه، می‌تواند در راستای دستیابی به مواد بسته‌بندی کاربردی با قابلیت سدشوندگی مناسب در برابر اکسیژن، بسیار مفید واقع شود. به‌علاوه، در راستای از بین بردن محدودیت کاربرد بسته‌بندی‌های خودترمیم‌شونده در صنعت بسته‌بندی مواد غذایی، لازم است بر پلیمرهای رایج در این صنعت توجه بیشتری گردد تا علاوه بر توسعه‌ی خاصیت خودترمیم‌شوندگی در چنین فیلم‌ها و پوشش‌هایی، ایرادات اساسی آن‌ها برای کاربرد در صنعت بسته‌بندی مواد غذایی نیز رفع گردد.

جدول ۲. مقایسه‌ی مقادیر OTR فیلم‌های نانوکامپوزیتی مختلف بر پایه‌ی PP و PE.  
(\* پلی‌اتیلن سبک-Low Density Polyethylene)

مرجع	OTR (cc/m <sup>2</sup> /24hr)	مواد تشکیل‌دهنده‌ی فیلم‌های نانوکامپوزیتی	
		ماتریس (میزان ترکیب)	مواد افزودنی (میزان ترکیب)
[۳۴]	۱۰۶۰	کوپلیمر تصادفی PP (94 wt%)	پلی-بتا-پینن/ نانو رُس (1 wt% / 5 wt%)
[۳۲]	۱۱۲۳/۹۶	PP (-)	نانو سیلیکای اصلاح سطحی شده با اتیلن‌وینیل استات (0.09 wt%)
[۳۳]	۹۱۷/۷	*LDPE /PP (20 wt% /80 wt%)	پلی(لاکتیک اسید)/ مونت‌موریلونیت (5 phr /25 phr)
[۳۱]	۱۰	LDPE (-)	اتیلن‌وینیل‌الکل/ نانو رُس/ LDPE پیوند خورده با مالئیک انیدرید (5 wt% /4 wt% /30 wt%)
[۳۵]	۵۰±۹۰۰	PE (-)	نانو رُس لوله‌ای توخالی (1 wt%)

## نتیجه‌گیری

فیلم‌ها و پوشش‌های دارای قابلیت خودترمیم‌شوندگی، چشم‌انداز امیدوارکننده‌ای از آینده‌ی بسته‌بندی مواد غذایی ارائه می‌دهند. بسته‌بندی‌های خودترمیم‌شونده، محافظت بهتری از محصولات غذایی ارائه می‌دهند و تفاوت آن‌ها با بسته‌بندی‌های رایج، در طول عمر بیشتر و پایداری بهتر آن‌ها است. زیرا فیلم‌ها و پوشش‌های خودترمیم‌شونده بر خلاف انواع رایج بسته‌بندی می‌توانند در صورت آسیب دیدن، ساختار یکپارچه و قابلیت‌های خود را بازیابی کنند و از این طریق عمر بهره‌وری خود را افزایش دهند. با این وجود، استفاده از فیلم‌ها و پوشش‌های خودترمیم‌شونده در صنعت بسته‌بندی مواد غذایی با چالش‌هایی مواجه است که کاربرد آن‌ها را محدود می‌کند. بنابراین تحقیقات

بیشتری در آینده مورد نیاز است تا کاربرد امیدوارکننده‌ی این نوع بسته‌بندی‌ها را در صنعت بسته‌بندی مواد غذایی تحقق بخشد. تمرکز این تحقیقات می‌تواند موضوعات مختلفی را در برگیرد. از جمله‌ی این موضوعات می‌توان به توسعه‌ی کاربردی فیلم‌ها و پوشش‌های خودترمیم‌شونده‌ی غیرذاتی، بررسی بازدهی خودترمیم‌شوندگی در شرایط محیطی مختلف به‌ویژه در شرایط حمل و نقل و نگهداری محصولات غذایی، ارزیابی تعداد چرخه‌های خودترمیم‌شوندگی قابل انجام و بازدهی ترمیم در هر چرخه، یا به توسعه‌ی روش‌های بهتر برای بررسی میزان تأثیر مهاجرت مواد افزودنی استفاده شده در تهیه‌ی این بسته‌بندی‌ها اشاره کرد. همچنین غیررسمی بودن، تجزیه‌پذیری و زیست-تخریب‌پذیر بودن بسته‌بندی‌های خودترمیم‌شونده، از جمله موارد دیگری هستند که در مطالعات آینده می‌توانند مورد ارزیابی قرار بگیرند. به‌علاوه، کاربرد عملی فیلم‌ها و پوشش‌های خودترمیم‌شونده در صنعت بسته‌بندی مواد غذایی نیز باید امکان‌سنجی شود؛ زیرا این بسته‌بندی‌ها باید مقرون به‌صرفه بوده و مواد اولیه‌ی مورد استفاده برای تولید آن‌ها نیز نباید به پیچیدگی روند تولید آن‌ها بیفزایند. در این راستا می‌توان به پلیمرهای رایج در صنعت بسته‌بندی مواد غذایی توجه بیشتری داشت تا علاوه بر بررسی امکان توسعه‌ی خاصیت خودترمیم‌شوندگی در بسته‌بندی‌های مبتنی بر آن‌ها، به رفع چالش‌های اساسی آن‌ها در این صنعت نیز کمک گردد.

## مراجع

1. Bhaskar S.V., *Food Safety in the 21st Century*, Gupta R.K., Dudeja, and Singh M. (Eds.), Academic Press, San Diego, 1-10, 2017.
2. Gupta R.K., and Dudeja P., *Food Safety in the 21st Century*, Gupta R.K., Dudeja, and Singh M. (Eds.), Academic Press, San Diego, 547-553, 2017.
3. 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.
4. Lai W.F., Design and Application of Self-Healable Polymeric Films and Coatings for Smart Food Packaging, *npj Sci. Food*, **7**, 11, 2023.
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. Huang K., and Wang Y., Recent Advances in Self-Healing Materials for Food Packaging, *Packag. Technol. Sci.*, **36**, 157-169, 2023.
9. Gopalakrishnan K., and Mishra P., Self-Healing Polymer a Dynamic Solution in Food Industry: a Comprehensive Review, *Food Biophys.*, **19**, 1-17, 2024.
10. 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.
11. Hia I.L., Vahedi V., and Pasbakhsh P., Self-Healing Polymer Composites: Prospects, Challenges, and Applications, *Polym. Rev.*, **56**, 225-261, 2016.

12. Parihar S., and Gaur B., Self Healing Approaches in Polymeric Materials-an Overview, *J. Polym. Res.*, **30**, 217, 2023.
13. Kessler M.R., and White S.R., Self-Activated Healing of Delamination Damage in Woven Composites, *Compos. Part A-Appl. S.*, **32**, 683-699, 2001.
14. Wang Y., Pham D.T., and Ji C., Self-Healing Composites: a Review, *Cogent Eng.*, **2**, 1075686, 2015.
15. 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.
16. 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.
17. 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.
18. 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.
19. 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.
20. Wang W., Zhang Y., and Liu W., Bioinspired Fabrication of High Strength Hydrogels From Non-Covalent Interactions, *Prog. Polym. Sci.*, **71**, 1-25, 2017.
21. 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.
22. Hu B., Chen L., Lan S., Ren P., Wu S., Liu X., Shi 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.
23. 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.
24. 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.
25. 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.
26. 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.
27. 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.
28. 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.

29. 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. Rahnama 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 SiO<sub>2</sub>/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., Esturk 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.