مقاله مروری

فصلنامه علمی
سال هشتم، شماره ۱، شماره پیاپی ۲۹، بهار ۱۴۰۲
Vol. 8, No. 1, Issue No. 29
Spring 2023, Quarterly
صفحه ۳۲-۲۱

Iran Polymer Technology: Research and Development

کاربرد زیست‌نانوکامپوزیت‌ها در بسته‌بندی مواد غذایی

فاطمه ساوجبلاغی[۱]، مهشید معروف‌خانی[۲*]

۱- تبریز، دانشگاه صنعتی سهند، دانشکده مهندسی پلیمر، دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی پلیمر

۲- قزوین، مرکز آموزش عالی فنی و مهندسی بویین زهرا، گروه مهندسی پلیمر

چکیده ...

نیاز به بسته‌بندی مواد غذایی برای حفظ کیفیت و ماندگاری بیشتر روزبه‌روز در حال افزایش است. مواد نانوساختار به‌دلیل خواص فیزیکی و شیمیایی منحصربه‌فرد و عملکرد بهبودیافته، نسبت به میکروساختارها ترجیح داده می‌شوند. بسته‌بندی‌های پیشرفته مبتنی بر فناوری نانو، ماندگاری و حمل‌ونقل مواد غذایی را به‌صورت ایمن و بدون تغییر طعم و کیفیت ممکن کرده است. علاوه بر این، از آلودگی جلوگیری می‌کند و خواص مکانیکی، فیزیولوژیکی، فیزیکی و شیمیایی مواد غذایی را حفظ می‌کند. نانومواد مختلفی در بسته‌بندی مواد غذایی برای تهیه بسته‌بندی بهبودیافته، فعال، هوشمند و زیستی استفاده شده است. بسته‌بندی هوشمند با تشخیص آلودگی، گازها، رطوبت، دما و سایر عوامل مواد غذایی با استفاده از حسگرها، ایمنی مواد غذایی را تضمین می کند. با افزایش تقاضا برای تولید بسته‌بندی جدید، سازگار با محیط‌زیست و با کارایی بالا، «زیست-نانوکامپوزیت‌ها» در سال‌های اخیر توجه زیادی را به خود جلب کرده است. زیست-نانوکامپوزیت‌ها، پلیمرهایی زیستی هستند که از دو جزء اصلی تشکیل شده‌اند که اولی به‌عنوان زمینه به نام زیست‌پلیمر (فاز پیوسته) و دومی به‌عنوان عامل تقویت‌کننده (فاز پراکنده) با ابعادی در محدوده ۱ تا ۱۰۰ نانومتر، عمل می‌کند. بسته‌بندی زیستی، بسته‌بندی نوین و نسل جدیدی است که پلیمرهای طبیعی را جایگزین پلاستیک‌های سنتزی می‌کند. در این مقاله، تحقیقات اخیر در حوزه زیست-نانوکامپوزیت‌ها بر اساس کاربرد برای نیازهای مختلف و خطر احتمالی مهاجرت نانوذرات مورد بررسی قرار گرفته است.

واژه‌های کلیدی:

زیست-نانوکامپوزیت،
بسته‌بندی مواد غذایی،
بسته‌بندی بهبود یافته،
بسته‌بندی فعال،
بسته‌بندی هوشمند

*پست الکترونیکی مسئول مکاتبات:
maroufkhani@bzte.ac.ir

۱ مقدمه

بسته‌بندی مواد غذایی نقش مهمی در ایمنی، کیفیت و ماندگاری مواد غذایی دارد. سامانه‌های بسته‌بندی مواد غذایی از ماده غذایی در برابر آسیب‌های فیزیکی (خرد شدن، ساییدگی و ضربه)، شیمیایی (اشعه فرابنفش) و زیست‌شناختی (Biological) ریزاندام‌واره‌ها (Microorganism) در حین حمل‌ونقل، پردازش، ذخیره‌سازی و بازاریابی محافظت می‌کند [۱،۲]. بسته‌بندی‌ها نقش مهمی در حفظ صفات اساسی غذا مانند رنگ، دما، طعم، بافت، کیفیت محصول غذایی، افزایش عمر خود و در نتیجه کاهش ضایعات مواد غذایی دارد. می‌توان از عوامل اصلی خراب شدن مواد غذایی مانند اکسایش، فساد میکروبی و سوخت‌وساز (Metabolism) با سامانه بسته‌بندی خوب به مواد غذایی جلوگیری کرد که منجر به افزایش کیفیت و ماندگاری مواد غذایی می‌شود [۳]. اکسایش محصولات غذایی می‌تواند منجر به کاهش ارزش غذایی، طعم و رنگ شود و در نتیجه کیفیت غذا را کاهش دهد. وجود ریزاندام‌واره‌های بیماری‌زا خطر ابتلا به بیماری‌های منتقل‌شده از طریق غذا را در انسان افزایش می‌دهد. بنابراین، بسته‌بندی مواد غذایی برای محافظت و مهار میکروب‌ها ضروری است. در سال‌های اخیر پیشرفت چشمگیری در زمینه بسته‌بندی صورت گرفته است و امروزه از بسته‌بندی‌های نوین از جمله بسته‌بندی بهبود یافته (Improved)، فعال(Active) و هوشمند (Smart) استفاده می‌شود [۲،۴].

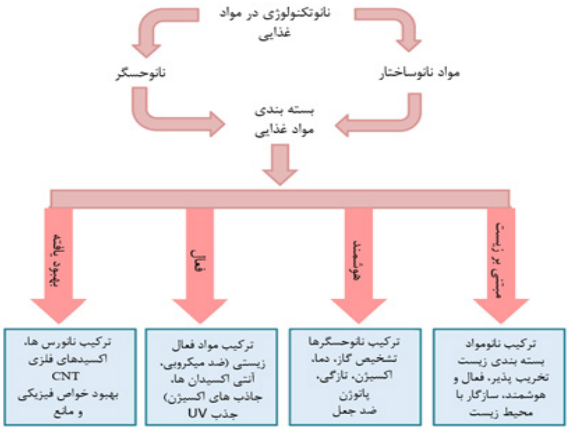
در صنعت بسته‌بندی، از مواد مختلفی استفاده می‌شود تا محصول را از محیط خارجی جدا کند. این مانع فیزیکی غیرسمی و غیرقابل‌نفوذ، باید متناسب با نوع کاربرد خواص مناسبی از جمله خواص فیزیکی، شیمیایی، مکانیکی، پایداری حرارتی، فعالیت ضدمیکروبی و خاصیت ممانعتی در برابر رطوبت و نور از خود نشان دهد. انواع مختلف بسته‌بندی شامل کاغذ، شیشه، فلز، پلاستیک، زیست‌پلیمرها و زیست‌نانوکامپوزیت‌ها برای نگه‌داری مواد غذایی مورد استفاده قرار می‌گیرند [۲،۵،۶]. در میان مواد مختلف برای بسته‌بندی، پلاستیک‌ها به دلیل وزن سبک، مقرون‌به‌صرفه بودن، شفافیت بالا، استحکام، پایداری، تطبیق‌پذیری و سهولت فرآیند بیشترین کاربرد را دارند و روند استفاده از پلاستیک در دهه‌های گذشته به شدت افزایش یافته است [۷،۸]. علاوه بر این، این پلیمرهای سنتزی خواص مکانیکی، حرارتی و ممانعتی (Barrier) خوبی دارند. امروزه به‌دلیل حجم تولید بالا، زمان استفاده کوتاه، دفع نامناسب و زیست‌تخریب‌ناپذیری (Biodegradability) پلاستیک‌های سنتزی باعث نگرانی‌های عمده در سراسر جهان شده است. امروزه، تحقیقات زیادی برای استفاده از زیست‌پلیمرها به‌عنوان مواد بسته‌بندی به‌دلیل ماهیت تجدیدپذیری و زیست‌تخریب‌پذیری آن‌ها انجام شده است [۲،۹،۱۰]. در این مقاله به بررسی انواع بسته‌بندی با استفاده از زیست‌نانوکامپوزیت‌ها و مزیت آن‌ها پرداخته می‌شود.

۲ زیست‌نانوکامپوزیت

نانوفناوری شاخه‌ای است که با تولید، تعیین مشخصات، ساخت و استفاده از مواد نانوساختار(اندازه ۱ تا ۱۰۰ نانومتر) برای کاربردهای مختلف سروکار دارد. نانوذرات می‌توانند خواص مکانیکی پلیمر بسته‌بندی را با بهبود استحکام، دوام، انعطاف‌پذیری و خاصیت ممانعتی اصلاح کنند. همچنین، خواص فیزیکی و شیمیایی مانند نفوذ، استحکام، رنگ، حلالیت، خواص نوری و مغناطیسی با استفاده از نانوذرات بهبود می‌یابد [۴،۱۱].

با پیشرفت تحقیقات در زمینه زیست‌پلیمرها و علم نانو، استفاده هم‌زمان از این دو ماده در بسته‌بندی منجر به تولید زیست‌نانوکامپوزیت شد که سازگار با محیط‌زیست است. نانوذرات وارد شده به ماتریس پلیمری، به‌عنوان تقویت‌کننده عمل می‌کنند و همچنین مسیر انتشار پیچیده‌ای ایجاد می‌کند که منجر به کاهش نفوذپذیری گاز (اکسیژن، بخار آب، طعم، چربی) و آب می‌شود. نانوذرات همچنین می‌توانند با زیست‌پلیمرها پیوند ایجاد کنند و در نتیجه برهم‌کنش مولکول‌های آب با پلیمر را کاهش می‌دهند. این عوامل منجر به افزایش خواص بازدارنده مواد بسته‌بندی می‌شود. پیوند بین زیست‌پلیمر و نانوذره منجر به افزایش خواص مکانیکی مواد بسته‌بندی می‌شود. در نهایت، نسبت ابعاد بالا و پراکندگی همگن نانوذرات می‌تواند مقاومت مکانیکی و حرارتی مواد بسته‌بندی را به‌دلیل تحرک مولکولی پلیمر تقویت کند[۱۲].

برای بسته‌بندی مواد غذایی نانومواد مختلفی مانند نانوذرات نقره (Ag)، نانوذرات مس (Cu)، نانوذرات اکسیدروی (ZnO)، نانوذرات دی‌اکسیدتیتانیوم (TiO_2)، نانوذرات دی‌اکسیدسیلیکون، نانوسلولز، نانوصفحات رس، نانوکیتوسان و غیره استفاده می‌شود. از جاذب‌های اکسیژن مانند ZnO می‌توان برای بسته‌بندی محصولات گوشتی پخته، پنیر، محصولات نانوایی، میوه‌ها، سبزیجات، دانه‌ها، آجیل و غیره استفاده کرد تا از تغییر رنگ، رشد کپک، ترشی و از دست رفتن ویتامین C جلوگیری کند. جاذب‌های اتیلن مانند زئولیت، نقره، TiO_2 و ZnO را می‌توان برای بسته‌بندی‌های غذایی میوه‌ها و سبزیجات با کاهش رسیدن و پیری، در نتیجه افزایش کیفیت و افزایش



شکل ۱ طبقه‌بندی بسته‌بندی مواد غذایی.

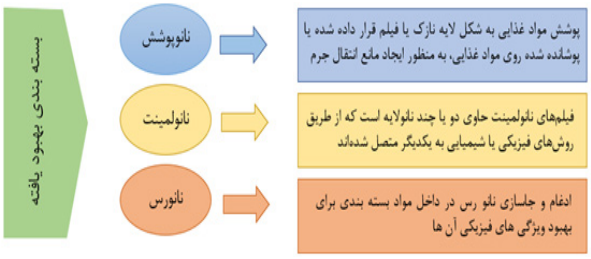
ماندگاری استفاده کرد [۲،۱۳].

۳ انواع بسته‌بندی مواد غذایی

کاربرد نانوفناوری در بخش مواد غذایی را می‌توان به دو گروه عمده تقسیم کرد: ترکیبات نانوساختار و نانوحسگر در مواد غذایی (شکل ۱). بسته‌بندی‌های مدرن مبتنی بر فناوری نانو شامل نانومواد مختلف (نانوپرکننده‌ها، نانوفلزات، نانوحسگرها)، اکسیدهای فلزی، ترکیبات زیست‌فعال، آنتی‌اکسیدان‌ها، جاذب‌های اکسیژن و غیره است. بسته‌بندی مبتنی بر زیست اساساً از مواد زیست‌تخریب‌پذیر یا زیست‌سازگار استفاده می‌کند که جایگزین پایداری برای بسته‌بندی‌های سنتزی است[۱۱].

۳-۱ بسته‌بندی بهبود یافته

هدف اساسی استفاده از نانومواد در بسته‌بندی مواد غذایی، افزایش خواص مکانیکی و فیزیکی بسته‌بندی مانند خواص ممانعتی در برابر عبور گاز، مقاومت در برابر دما و رطوبت، استحکام مکانیکی و انعطاف‌پذیری است [۱۴]. نانوذرات مختلفی که برای صنایع بسته‌بندی نوشیدنی‌ها و روغن‌ها استفاده می‌شوند، درصد وزنی نانومواد، به‌عنوان مثال نانوصفحات رس، تا حدود ۵ درصد وزنی است. این نانومواد خواص بازدارنده بسته‌بندی مانند کاهش نفوذ اکسیژن و دی‌اکسیدکربن را تا ۸۰ تا ۹۰ درصد بهبود می‌بخشند [۱۵]. کیم (Kim) و همکاران گزارش کردند که افزودن بیش از ۳ درصد وزنی خاک رس در ماتریس اتیلن‌وینیل‌الکل منجر به کاهش خواص کششی و شفافیت نوری به دلیل تشکیل کلوخ‌های رسی می‌شود. اما، با افزودن تنها ۳ درصد وزنی خاک رس به نانوکامپوزیت، ممانعت در برابر عبور اکسیژن (به میزان ۵۹ درصد) و سد بخار آب (به



شکل ۲ روش‌های نانوفناوری برای بهبود خواص مکانیکی و فیزیکی بسته‌بندی مواد غذایی.

میزان ۹۰ درصد) در مقایسه با مواد بدون نانوصفحات رس مونت‌موریلونیت افزایش یافت[۱۶]. روش‌های مختلف فناوری نانو برای بهبود خواص مکانیکی و فیزیکی بسته‌بندی در شکل ۲ نشان داده شده است.

۳-۱-۱ نانوپوشش‌ها

رایج‌ترین روش نانوفناوری برای بهبود خواص بسته‌بندی مواد غذایی، نانوپوشش است. این پوشش‌ها می‌توانند به‌عنوان موانع رطوبت، چربی و گاز عمل کنند. پوشش‌ها به‌طور مستقیم روی محصول غذایی اعمال می‌شوند یا با افزودن محلول تشکیل فیلم مایع یا با ترکیبات مذاب تشکیل می‌شوند. پوشش‌های خوراکی که برای بسته‌بندی مواد غذایی استفاده می‌شوند، عموماً از لیپیدها، پروتئین‌ها و زیست‌پلیمرها/پلی‌ساکاریدها که ایمنی غذا را تضمین کرده و با اجتناب از آلودگی به محیط زیست کمک می‌کند (شکل ۳) [۱۵،۱۷].

۳-۱-۲ نانو چندلایه‌ها

نانو چندلایه‌ها مزایایی برای تهیه پوشش‌ها و فیلم‌های خوراکی نسبت به فناوری‌های معمولی دارند و بنابراین می‌توانند کاربرد مهمی در صنایع غذایی و لبنیات داشته باشند. از عوامل عملکردی فعال مانند ضدمیکروب‌ها، عوامل ضدقهوه‌ای شدن،

شکل ۳ مواد مورد استفاده برای تولید فیلم‌های پوشش خوراکی در صنایع غذایی.

ضداکسنده، آنزیم‌ها، طعم‌دهنده‌ها و رنگ‌ها می‌توان به‌عنوان بسته‌بندی فعال در فیلم‌ها استفاده کرد. این عوامل عملکردی ماندگاری و کیفیت غذاهای پوشش داده شده را افزایش می‌دهند [۱۵،۱۷].

۳-۲ بسته‌بندی فعال

این نوع بسته‌بندی در پاسخ به تغییرات نامطلوب محیطی واکنش نشان داده و اثرات نامطلوب این تغییرات را از بین می‌برد [۱۸]. یک سوم مواد غذایی تولیدشده برای مصرف انسان (تقریباً ۱/۳ میلیارد تن در سال)، هر سال در سطح جهان دور ریخته می‌شود. یکی از راهکارهای ممکن برای کاهش فساد مواد غذایی و ضایعات غذایی مرتبط با آن، توسعه بسته‌بندی فعال به‌منظور افزایش ماندگاری محصول است. نانوپرکننده‌ها مانند نقره، اکسیدروی و اکسیدمنیزیم (MgO) دارای خواص ضدمیکروبی یا آنتی اکسیدانی هستند. افزودن چنین نانوپرکننده‌هایی در ماتریس‌های پلیمری یا زیست‌پلیمری موجب مهار رشد ریزاندام‌واره‌ها می‌شود و در نتیجه فساد مواد غذایی را به تأخیر می‌اندازد [۱۵،۱۹].

۳-۲-۱ فیلم‌های ضد میکروبی

هدف از استفاده از بسته‌بندی ضدمیکروبی حفظ کیفیت مواد غذایی و افزایش ماندگاری آن‌ها از طریق مهار رشد ریزاندام‌واره است. نانومواد ضدمیکروبی شامل MgO، ZnO، TiO_2، Ag و غیره هستند. متداول‌ترین فیلم‌های ضدمیکروبی برای بسته‌بندی مواد غذایی بر پایه نانوذرات نقره هستند که به‌دلیل سمیت قوی آن برای طیف وسیعی از ریزاندام‌واره‌ها، با پایداری دمای بالا و فراریت کم، به خوبی شناخته شده‌اند. نانوذرات TiO_2 به‌عنوان نانوذره غیرسمی برای بدن انسان و تأیید شده به‌عنوان افزودنی غذا و مناسب برای تماس با مواد غذایی، اغلب در بسته‌بندی مواد غذایی استفاده می‌شود. [۱۵،۱۷،۲۰].

۳-۲-۲ فیلم حذف اکسیژن

اکسیژن یکی از عوامل اصلی خراب شدن بسیاری از مواد غذایی به‌طور مستقیم یا غیرمستقیم است. به‌عنوان مثال، واکنش‌های اکسایش مستقیم منجر به قهوه‌ای‌شدن میوه‌ها و ترش‌شدن روغن‌های گیاهی می‌شود. بنابراین، اضافه کردن حذف‌کننده‌های O_2 در بسته‌بندی مواد غذایی می‌تواند مقدار O_2 را کاهش داده و باعث افزایش عمر مواد غذایی می‌شود. فیلم‌های حذف‌کننده اکسیژن با افزودن نانوذرات تیتانیوم به پلیمرهای مختلف با موفقیت ساخته شده‌اند و برای بسته‌بندی طیف گسترده‌ای از محصولات حساس به اکسیژن مانند محصولات پروتئینی، غلات، میوه‌ها، نان و غیره بررسی شده‌اند [۱۷].

۳-۳ بسته‌بندی هوشمند

ایجاد بسته‌بندی مواد غذایی با عملکرد هوشمند، می‌تواند با استفاده از نانوذرات به‌منظور نظارت بر رشد شیمیایی یا زیست‌شیمیایی یا حتی میکروبی در داخل غذا یا محیط اطراف محصول انجام شود. بنابراین می‌توان از عوامل بیماری‌زا (Pathogen) و نانوحسگر گازهای خاص برای تشخیص فساد موادغذایی استفاده کرد. با استفاده از نانوحسگرها، اطلاعات تغییرات در پارامترهای داخلی یا خارجی در داخل غذا یا در محیط اطراف غذا به مصرف‌کننده انجام می‌شود تا از کیفیت و ایمنی غذا اطمینان حاصل شود (شکل ۴) [۱۵].

۳-۳-۱ نانوحسگرها

نانوحسگرها قابلیت بالایی برای تشخیص سریع، شناسایی و تعیین کمیت ریزاندام‌واره‌های بیماری‌زا و پروتئین‌های آلرژی‌زا دارند. بسته‌بندی مواد غذایی را می‌توان با نانوحسگرهایی مجهز کرد که به رطوبت، تشکیل گازها یا تغییرات دما حساس هستند و به‌عنوان مثال وقتی گاز به‌دلیل فساد مواد غذایی تشکیل می‌شود، بسته‌بندی رنگ نشانگر را تغییر می‌دهد و در نتیجه مشتری را از نامناسب بودن محصول آگاه می‌کند.

هنگامی که نانوحسگرها در بسته‌بندی مواد غذایی قرار می‌گیرند، می‌توانند ترکیبات شیمیایی خاص، پاتوژن‌ها و سموم موجود در مواد غذایی را شناسایی کنند و وضعیت تازه بودن غذا را در زمان واقعی ارائه می‌دهند. علاوه بر این، حسگر زیستی مبتنی بر نانولوله‌های کربنی چندجداره نیز ساخته شده است که می‌تواند ریزاندام‌واره‌ها، پروتئین‌های سمی و محصولات تخریب‌شده را در غذا و نوشیدنی شناسایی کند [۲۱،۲۲].

۳-۳-۲ شاخص‌های تازگی و فساد

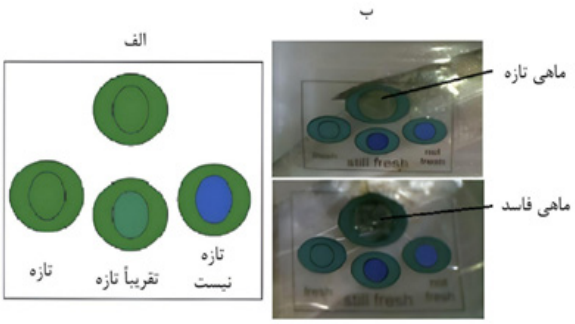
انواع مختلفی از حسگرهای گاز ایجاد شده‌اند که برهم‌کنش‌های شیمیایی بین ذرات روی سطوح را به سیگنال پاسخ تبدیل می‌کند. پلیمرهای رسانا دارای توانایی قابل‌توجهی برای جابه‌جایی بین حالت رسانایی اکسیدشده (دوپ‌شده (Doped)) و عایق کاهش‌یافته (بدون دوپ) هستند که اساس بسیاری از کاربردها است. نشانگر روی بسته، حاوی فیلم پلی‌آنیلین است که از طریق تغییر رنگ قابل مشاهده به انواع آمین‌های فرّار آزاد شده در طول دوره فساد ماهی پاسخ می‌دهد (شکل ۵). تغییرات رنگ، از نظر تفاوت رنگ پلی‌آنیلین به‌خوبی با سطوح آمین فرار

شکل ۴ نانوحسگرهای مورد استفاده در بسته‌بندی هوشمند برای کاربردهای مواد غذایی.

و الگوهای رشد میکروبی در نمونه‌های ماهی همبستگی داشت. این پاسخ‌ها نظارت بر زمان واقعی فساد ماهی را در دماهای ثابت مختلف یا با نوسانات دما فعال می‌کند [۱۷].

۳-۳-۳ نشانگرهای O_2

اکسیژن عامل اصلی فساد مواد غذایی است که منجر به تنفس، اکسایش لیپیدها، رشد میکروبی هوازی و تغییرات نامطلوب در رنگ، مزه و بو می‌شود. بنابراین، چندین محصول غذایی تحت بسته‌بندی اتمسفر اصلاح‌شده (Modified Atmosphere Packaging) با اکسیژن کاهش‌یافته در محیط قرار می‌گیرند تا در مقایسه با محصولات بسته‌بندی شده با هوای اتمسفر، عمر مفید را در حدود ۳ تا ۴ برابر افزایش دهند. در میان انواع شاخص‌های کیفیت محصول، شاخص‌های اکسیژن رنگی رایج‌ترین مورد استفاده در محصولات غذایی MAP هستند که از رنگ ردوکس، عامل کاهنده، فوتوکاتالیست و پلیمر کپسوله‌کننده تشکیل شده‌اند[۲۳،۲۴]. نشانگر اکسیژن رنگ‌سنجی با اشعه فرابنفش فعال می‌شود. پس از تابش اشعه فرابنفش، حسگر سفید می‌شود و بی‌رنگ می‌ماند و زمانی که در معرض اکسیژن قرار گیرد، حسگر به رنگ آبی درمی‌آید [۱۷].



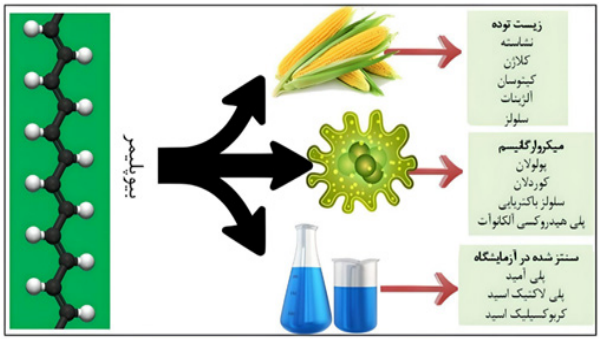
شکل ۵ حسگر تازگی برای بسته‌بندی هوشمند مبتنی بر نانوالیاف پلی‌آنیلین. الف) تغییر رنگ مرجع حسگر برای تشخیص تازگی ماهی و ب) پاسخ حسگر به ماهی تازه و ماهی فاسد است [۱۷].

۳-۳-۴ برچسب‌های فعال و قابلیت ردیابی

اخیراً جدیدترین ابزارهای فنی برای ردیابی مواد غذایی ارائه شده است که امکان شناسایی اقلام را در هر مرحله از زنجیره فراهم می‌کند. به‌طورکلی، برچسب‌های فعال در بسته‌بندی برای شناسایی فرکانس رادیویی هستند. ساده‌ترین سامانه فرکانس رادیویی ابزار شناسایی محصول است که از ریزتراشه بی‌سیم و آنتن در برچسب استفاده می‌کنند که نیازی به تماس فیزیکی یا موقعیت‌یابی دید (مانند بارکد) با خواننده ندارد و می‌تواند در دماهای بالا و فشارهای مختلف کار کند. برچسب‌های شناسایی فرکانس رادیویی با قابلیت نانو بسیار کوچک و انعطاف‌پذیر هستند و می‌توانند روی برچسب‌های نازک چاپ شوند و در نتیجه قیمت تمام‌شده کمتری خواهد داشت [۱۷،۲۵].

۳-۴ بسته‌بندی زیستی

زیست‌پلیمرها، پلیمرهای طبیعی هستند که عموماً به‌عنوان پلیمرهایی که از منابع تجدیدپذیر منشأ گرفته‌اند توصیف می‌شوند (شکل ۶). زیست‌پلیمرها بر اساس منشأ آن‌ها به سه گروه زیست‌توده (Biomass)، ریزاندام‌واره و سنتزشده در آزمایشگاه (Laboratory Synthetic) طبقه‌بندی می‌شوند. بسته‌بندی زیستی جایگزین مناسبی برای پلاستیک‌های سنتزی به نظر می‌رسد زیرا می‌تواند به‌طور موثر مسائل پایداری و چالش‌های زیست‌محیطی مرتبط با تولید، استفاده و دفع مواد بسته‌بندی غیرقابل‌تجزیه و تجدیدناپذیر را برطرف کند [۹].



شکل ۶ طبقه‌بندی زیست‌پلیمرها [۱].

در بین کاربردهای بی‌شمار، بسته‌بندی مواد غذایی جذاب‌ترین کاربرد زیست‌پلیمرها است. خواص برخی از پلیمرهای زیستی مهم در جدول ۱ ارائه شده است[۱].

۳-۴-۱ نانومواد مبتنی بر نشاسته

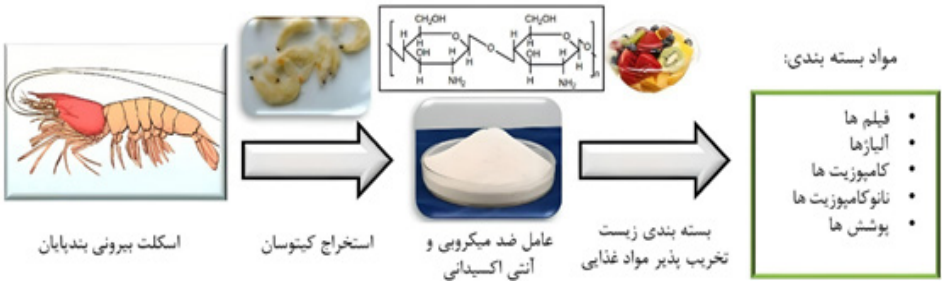
نشاسته، پلیمری ارزان‌قیمت، قابل بازیافت و سازگار با محیط‌زیست برای بسته‌بندی است. با این حال، خواص مکانیکی و ممانعتی پایین و حساسیت به اشعه فرابنفش و جذب رطوبت از معایب عمده پلیمرهای مبتنی بر نشاسته است. فیلم‌های پلیمری مبتنی بر نشاسته دارای ویژگی‌های ممانعتی قوی در برابر اکسیژن هستند اما کاربرد آن‌ها به‌دلیل حساسیتشان به رطوبت محدود می‌شود. نانوذراتی مانند TiO_2، ZnO، گرافن، پلی(متیل‌متاکریلات-کو-آکریل آمید) برای بهبود خواص مکانیکی و بازدارندگی نشاسته استفاده شده‌اند [۱۱،۲۸]. خاک رس به‌عنوان پرکننده برای بهبود خواص نشاسته ترموپلاستیک در چنین کاربردهایی استفاده شده است. نشان داده شده است که هم استحکام کششی و هم ازدیاد طول در هنگام شکست ترموپلاستیک‌ها با حضور مقادیر کمی (۵٪) مونت‌موریلونیت‌سدیم افزایش یافته است. علاوه بر این، دمای تجزیه افزایش یافته و ضریب انتشار نسبی بخار آب کاهش یافته است. نتایج خواص مکانیکی نیز افزایش مدول و استحکام کششی را نشان می‌دهد [۱۷،۲۹]. اولیورا (Oliveira) و همکاران فیلم بسته‌بندی با ترکیب نانوبلورهای نشاسته در ماتریس نشاسته هسته انبه طراحی کرد. در اینجا نانوبلور نشاسته در مقایسه با فیلم شاهد، استحکام کششی را ۹۰ درصد و مدول یانگ را تا ۱۲۰٪ افزایش داد. علاوه بر این، نفوذپذیری بخار آب ۱۵٪ کاهش یافت[۳۰].

۳-۴-۲ نانومواد مبتنی بر سلولز

سلولز جزء فراوان‌ترین پلیمرهای طبیعی است و مانند نشاسته از واحدهای مونومر گلوکز نیز تشکیل شده است. اما استفاده از آن در بسته‌بندی به‌دلیل ماهیت آب‌دوست، ویژگی‌های حلالیت ضعیف و ساختار بلوری آن دشوار است. نانوذرات سلولز اغلب برای تقویت کامپوزیت‌های پلیمری برای کاربردهای بسته‌بندی مواد غذایی استفاده می‌شود. ساختار نانومقیاس و سطح ویژه

جدول ۱ ترکیب و خواص برخی از زیست‌پلیمرهای رایج [۱،۲۶،۲۷].

ردیف	پلی‌ساکارید	ساختار	خواص
۱	آلژینات	مانورونیک گلوکورونیک‌اسید	شکننده-نفوذپذیری آب بالا- اتصال عرضی با کلسیم- توانایی تشکیل فیلم- غیرسمی
۲	کیتین	N- استیل گلوکزآمین	شفاف- غیر سمی- زیست‌سازگار- ضدقارچ و ضدباکتری
۳	سلولز	گلوکز	شفاف- حساس به آب- خواص مکانیکی خوب- توانایی ضعیف در تشکیل فیلم- بلورینگی بالا
۴	کیتوسان	D-گلوکزآمین N-استیل-D-گلوکزآمین	شکننده- ضد باکتری و ضد قارچ- غیر سمی- مانع گازها- توانایی تشکیل فیلم
۵	کاراگینان	گالاکتوز	شکننده- شکل‌پذیر- آب‌دوست- توانایی ژل‌شوندگی عالی- قابلیت بالا در تشکیل فیلم
۶	پولولان	مالتوتریوز	خوراکی- شفاف- قابلیت آب‌بندی حرارتی- حلالیت در آب بالا- مانع اکسیژن- مقاوم در برابر روغن- مقاوم در برابر چربی- انعطاف‌پذیر- استحکام مکانیکی عالی
۷	صمغ زانتان	گلوکز، مانوز، گلوکورونیک‌اسید، استات، پیروات	خوراکی- قابل تجزیه زیستی



شکل ۷ کیتوسان: ویژگی ها و کاربردها [۱۱].

بالای سلولز، خواص مکانیکی، تخریب زیستی، نوری و سدی نانوکامپوزیت‌های سلولزی را به مقدار قابل‌توجهی افزایش می‌دهد. افزودن نانوسلولز در ماتریس پلیمری استحکام کششی را افزایش می‌دهد و در نتیجه خواص مکانیکی، پایداری حرارتی و کشسانی را کاهش می‌دهد[۲،۱۵،۳۱]. نیو (Niu) و همکاران بسته‌بندی مواد غذایی مبتنی بر کیتوسان/ پلی‌لاکتیک‌اسید را با ترکیب نانوالیاف سلولزی تهیه کردند. فیلم کامپوزیتی دو لایه ایجاد کردند که لایه اول نانوالیاف سلولزی اصلاح‌شده توسط رزین و لایه دوم ماتریس پلی‌لاکتیک‌اسید پوشیده‌شده با کیتوسان بود. این فیلم خواص مکانیکی بهبودیافته‌ای را نشان داد که به تدریج تا ۳۲/۳ مگاپاسکال با غلظت نانوالیاف سلولز ۸ درصد افزایش یافت و همچنین فعالیت ضدمیکروبی قابل‌توجهی در برابر باکتری اشرشیاکلی و باسیلوس سوبتیلیس (Bacillus subtilis) نشان داد [۲].

۳-۴-۳ نانومواد مبتنی بر کیتوسان

کیتین پلیمری طبیعی از N-استیل-D-گلوکوزامین است که با بقایای N-گلوکوزامین از طریق پیوندهای گلیکوزیدی β (۴-۱) متصل شده است. کیتوسان واحد تکرارشونده‌ای از D-گلوکوزامین است که با پیوند گلیکوزیدی β (۴-۱) متصل است. کیتوسان به‌دلیل وجود گروه‌های آمینه در محیط اسیدی آبی محلول است (شکل ۷). این پلیمر زیست‌سازگار، زیست‌تخریب‌پذیر و غیرسمی است. اشکالات اصلی استفاده از کیتوسان به‌عنوان ماده بسته‌بندی در مقایسه با پلیمرهای مبتنی بر نفت در خواص مکانیکی، حرارتی، بازدارندگی ضعیف و مقاومت کم در برابر رطوبت است [۲،۱۱،۲۸،۳۲].

کیتوسان فعالیت ضدمیکروبی بالایی در برابر طیف وسیعی از ریزاندام‌واره‌های بیماری‌زا و عامل فساد از جمله قارچ‌ها و باکتری‌های گرم مثبت و گرم منفی از خود نشان داده است [۱۵]. در مطالعه‌ای نشان داده شد که افزودن TiO_2/Ag در ژلاتین ماهی و فیلم کامپوزیت کیتوسان به‌طور قابل‌توجهی حلالیت فیلم را در آب افزایش می‌دهد. در غلظت ۰/۵ درصد TiO_2/Ag، بیشترین اثر ضدباکتریایی و کمترین میزان عبور نور با ۵۴/۶ درصد مشاهده شد، در حالی که در این شرایط کاهش مقاومت کششی مشاهده شد [۳۳].

در جدول ۲ برخی از پلیمرهای طبیعی و ویژگی نانوکامپوزیت آن‌ها در صنعت بسته‌بندی ذکر شده است.

۴ مهاجرت نانومواد و تأثیر آن بر سلامتی

مهاجرت نانومواد یکی از مسائل جدی در بسته‌بندی مواد غذایی است. مهاجرت، انتقال ناخواسته مواد موجود در بسته‌بندی به مواد غذایی است. این مشکل ممکن است ایمنی غذا و در نتیجه سلامت مصرف‌کننده را تحت تأثیر قرار دهد. استفاده از نانومواد در کاربردهای نانوحسگر یا بسته‌بندی مواد غذایی می‌تواند منجر به مهاجرت این نانومواد و انتقال به بدن انسان شود. این امر می‌تواند از طریق استنشاق، نفوذ به پوست یا بلع به‌دلیل شسته‌شدن نانومواد از بسته‌بندی یا عناصر حسگر به داخل غذا، یا با ذخیره‌سازی بسته‌بندی و نانوحسگرها در محل‌های دفن زباله با امکان انتشار در محیط، هوا، آب و خاک رخ دهد. عوامل مختلفی بر مهاجرت نانومواد به مواد غذایی تأثیر می‌گذارد. این عوامل را می‌توان به ویژگی‌های نانوذره (مانند حلالیت، اندازه ذرات، غلظت، وزن مولکولی و نفوذ در پلیمر)، شرایط محیطی (دما، تنش مکانیکی)، وضعیت غذا (pH و ترکیب)، ویژگی‌های بسته‌بندی (گرانروی و ساختار پلیمری) و زمان تماس نسبت داد. به‌عنوان مثال، دماهای بالا و مقادیر pH پایین، حلالیت نانومواد فلزی را در محلول آبی افزایش می‌دهد و در نتیجه مهاجرت آن‌ها را افزایش می‌یابد. پلیمرهای با وزن مولکولی کمتر که حجم آزاد بیشتری دارند، سرعت مهاجرت و انتشار نانوذرات را تسریع می‌کنند. همچنین رابطه معکوس بین نرخ مهاجرت سامانه و اندازه نانوذرات وجود دارد. اگر ماهیت غذا با نوع بسته‌بندی سازگار باشد، خود غذا ممکن است به درون ماتریس پلیمری جذب شود و شکاف بین زنجیره‌های پلیمری

جدول ۲ ویژگی‌های زیست-نانوکامپوزیت‌های مورد استفاده در صنعت بسته‌بندی.

پلیمر	ویژگی	نانوذره	ویژگی نانوکامپوزیت‌ها	مرجع
نشاسته (Starch)	پلیمر طبیعی، پلی‌ساکارید طبیعی، تجدیدپذیر، زیست‌تخریب پذیر، غیرسمی، ارزان، در دسترس، دوست‌دار محیط‌زیست	نانو لوله‌کربنی (CNT)	بهبود خاصیت سدی، کاهش خاصیت آب‌دوستی نشاسته	[۳۴]
		نانورس	افزایش استحکام کششی و مدول یانگ، کاهش جذب آب نشاسته	[۳۵]
		مونت‌موریلونیت، (TiO_2)	افزایش ازدیاد طول در هنگام شکست، افزایش استحکام کششی و نقطه ذوب و دمای انتقال شیشه‌ای	[۳۶]
		نانوتقویت‌کننده‌های سلولزی	کاهش نفوذپذیری ریزاندام‌واره‌ها، کاهش جذب آب و شکنندگی نشاسته، افزایش دمای انتقال شیشه‌ای، افزایش خواص سدی	[۳۷]
پلی‌لاکتیک اسید (PLA)	پلیمر با منشأ طبیعی، خواص فیزیکی، شیمیایی و مکانیکی عالی، تجدیدپذیر، تخریب‌پذیر، غیرسمی، سازگار با محیط‌زیست، فرایندپذیری خوب	نانواکسیدروی (ZnO)	افزایش خاصیت بلورینگی پلی لاکتیک اسید- بهبود خاصیت سدی	[۳۸]
		مونت‌موریلونیت	افزایش خواص سدی	[۳۹]
		($CaCO_3$)	افزایش خواص سدی	[۴۰]
		نانونقره (Ag)	افزایش بلورینگی	[۴۱]
کیتوسان (Chitosan)	پلیمر طبیعی، ضد میکروبی، سازگار با محیط‌زیست	نانو الیاف سلولزی (CNR)	افزایش خواص مکانیکی، بهبود خاصیت سدی بخار آب، برهم‌کنش قوی	[۴۲]
هیدروکسی پروپیل متیل سلولز (HPMC)	پلیمر طبیعی، پلیساکارید طبیعی، زیست‌سازگار، تخریب‌پذیر، ارزان، سبک، استحکام بالا	نانوروی (Zn)	افزایش مقاومت کششی و مدول یانگ	[۴۳]
		نانوکیتوسان (CS)	بهبود استحکام کششی، افزایش خواص سدی، کاهش نفوذپذیری بخار آب	[۴۴]
پروتئین	پلیمر طبیعی، کاربردهای تجاری، ماهیت قطبی، ساختار خطی، حجم آزاد کم، زیست‌سازگار، خاصیت سدی در مقابل اکسیژن، نفوذپذیری کم بخار آب	مونت‌موریلونیت	بهبود استحکام مکانیکی، افزایش مدول یانگ و استحکام کششی	[۳۹]
		(TiO_2)	افزایش خواص کششی	[۳۹]
پلی‌وینیل‌الکل (PVA)	پلیمر طبیعی، آب‌دوست، زیست‌سازگاری، مقاوم در برابر حلال، عملکرد مکانیکی خوب	لیگنین (LN)	بهبود خواص مکانیکی	[۴۵]
		نانونقره، سلولز	افزایش خواص سدی، کاهش نفوذپذیری ریزاندام‌واره‌ها، عدم سمیت سلولی	[۴۶]

را افزایش داده و در نتیجه سرعت مهاجرت را تسریع کند. به‌عنوان مثال، چربی‌هایی که تمایل بیشتری به پلی‌اتیلن (PE) و پلی‌پروپیلن (PP) دارند ممکن است توسط بسته‌بندی جذب شده و منجر به افزایش تحرک پلاستیک و نرخ مهاجرت بالاتر شود. روش نگه‌داری غذاها نیز مسئله مهمی است و می‌تواند بر مهاجرت نانوذرات تأثیر بگذارد، [۲۰،۴۷].

برخی از مطالعات انجام‌شده اثرات سم‌شناسی احتمالی نانوذرات را بر روی سامانه‌های زیستی نشان داده‌اند. عوارض جانبی ناشی از قرار گرفتن در معرض نانوذرات شامل تشکیل گونه‌های فعال اکسیژن (Reactive Oxygen Species)، تغییر ماهیت پروتئین و اختلال میتوکندری (Mitochondrial) می‌شود. نگرانی بالقوه باید بر روی مهاجرت نانومواد از بسته‌بندی یا عناصر حسگر داخل بسته‌بندی به غذا متمرکز شود. مشهودترین مسیر تماس نانومواد با بدن انسان در

کاربردهای غذایی، پس از مصرف است. بنابراین، ویژگی‌های دستگاه گوارش مانند pH، وجود مولکول‌های فعال سطحی مختلف، الکترولیت‌ها، آنزیم‌های گوارشی و نیروهای مکانیکی بر جذب نانومواد تأثیر می‌گذارد که ممکن است باعث تغییر در خواص و حالت تجمع نانوذرات شود. مهاجرت نانونقره از انواع مختلف نانوکامپوزیت‌ها به غذا توسط اچگوین (Echegoyen) و همکارانش بررسی شد که نتایج نشان داد که در مواد غذایی اسیدی بالاترین سطح مهاجرت نانونقره شناسایی شده است. علاوه بر این، تجمع ذرات نانولوله کربنی در موجودات زنده و در نتیجه تشکیل ROS می‌تواند نانولوله‌ها را به‌عنوان نانومواد سمی بالقوه طبقه‌بندی کند. مهاجرت اکسیدهای فلزی مختلف مانند SiO_2، ZnO، TiO_2 و Al_2O_3 که در بسته‌بندی مواد غذایی برای بهبود خواص مکانیکی، ضد میکروبی، مسدودکننده نور و مانع گاز پلیمرها مورد استفاده قرار می‌گیرند، مورد بررسی قرار گرفت و هیچ مهاجرت قابل‌توجهی از نانومواد از بسته‌بندی به مواد غذایی مشخص نشد [۵،۱۵،۴۸،۴۹].

اگرچه، تحقیقات بیشتری بر روی خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و ارزیابی قرار گرفتن در معرض سمیت نانومواد، برای رسیدگی به بسیاری از عدم قطعیت‌های فعلی و محدودیت‌های استفاده از آن‌ها در کاربردهای غذایی مورد نیاز است. انتظار می‌رود که تحقیقات در آینده برهم‌کنش و پایداری نانومواد را در مواد غذایی در دستگاه گوارش و بافت‌های زیستی مطالعه کنند. همچنین، روش‌های معمول برای شناسایی و تعیین کمیت نانومواد در مواد در تماس با غذا و همچنین روش‌هایی برای ارزیابی سمیت از جمله قرار گرفتن در معرض مزمن و سرطان‌زایی نانومواد باید توسعه یابد. علاوه بر این، پروتکل‌های اعطاشده بین‌المللی برای آزمایش‌های سمیت نانومواد برای استانداردسازی داده‌ها به دلیل تنوع آن‌ها مورد نیاز است [۱۵].

۵ نتیجه‌گیری

مواد مورد استفاده در بسته‌بندی مواد غذایی غالباً از منابع فسیلی تجدیدناپذیر مانند مواد پلاستیکی مبتنی بر نفت مشتق می‌شوند و در دفع و بازیافت با مشکلات زیادی مواجه هستند. زیست‌نانوکامپوزیت‌ها به‌دلیل زیست‌تخریب‌پذیری، در دسترس بودن و توانایی کاهش استفاده گسترده از سوخت‌های فسیلی، منبع خوبی برای جایگزینی فیلم‌های پلاستیکی سنتزی هستند. استفاده از نانوذرات در بسته‌بندی مواد غذایی به دلیل مهاجرت نانوذرات به محصولات غذایی چالش بزرگی است. این ممکن است در نهایت منجر به سمیت سلولی در سلول‌های انسانی در هنگام مصرف محصولات غذایی یا در تماس با آن شود. بنابراین، مطالعه مهاجرت و اثر سمیت سلولی نانوذرات قبل از صنعتی شدن مواد بسته‌بندی بسیار مهم است. با این حال، مطالعات کافی در مورد تأثیر نانوذرات بر سلامت انسان وجود ندارد و مهاجرت آن‌ها به مواد غذایی مستلزم مطالعات بیشتر است. همچنین ترکیب مواد بسته‌بندی بهبودیافته، فعال و هوشمند با استفاده از نانوذرات از دیدگاه‌های آینده در این زمینه مطالعاتی است. با ترکیب بسته‌بندی فعال و هوشمند، مواد بسته‌بندی مورد استفاده به‌ویژه برای حمل‌ونقل طولانی و بسته‌بندی‌های بزرگ را می‌توان با قرار دادن نانوحسگرها در مواد زیست‌نانوکامپوزیت به سطح بالاتری برد. این حسگرها می‌توانند مستقیماً به سامانه رایانه‌ای متصل شوند تا تغییرات مواد مانند خواص ضدمیکروبی، شیمیایی یا حرارتی را مشاهده کنند.

مراجع

1. Qasim U., Osman A.I., AlMuhtaseb A.H., Farrell C., AlAbri M., Ali M., Vo D.N., Jamil F., Rooney D.W., Renewable Cellulosic Nanocomposites for Food Packaging to Avoid Fossil fuel Plastic Pollution: A Review, *Environmental Chemistry Letters*, 19, 1, 613-641, **2021**.

2. Perera K.Y., Jaiswal S., Jaiswal A.K., A Review on NanoMaterials and Nanohybrids Based Bio-nanocomposites for Food Packaging, *Food Chemistry*, 376, 131912, **2022**.

3. Braga L.R., Rangel E.T., Suarez P.A.Z., Machado F., Simple Synthesis of Active Films Based on PVC Incorporated with silver Nanoparticles: Evaluation of the Thermal, Structural and Antimicrobial Properties, *Food Packaging and Shelf Life*, 15, 122-129, **2018**.

4. Ashfaq A., Khursheed N., Fatima S., Anjum Z., Younis K., Application of Nanotechnology in Food Packaging: Pros and Cons, *Journal of Agriculture and Food Research*, 7, 100270, **2022**.

5. Chaudhary P., Fatima F., Kumar A., Relevance of Nanomaterials in Food Packaging and its Advanced Future Prospects, *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials,* 30, 12, 5180-5192, **2020**.

6. Youssefand A.M., El-Sayed S.M., Bionanocomposites Materials for Food Packaging ApplicationS: Concepts and Future OutlooK, *Carbohydrate Polymers*, 193, 19-27, **2018**.

7.Taherimehr M., Yousefnia H., Tabatabaekoloor R., Trends and Challenges of Biopolymer-based Nanocomposites in Food Packaging, *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety,* 20, 6, 5321-5344, **2021**.

8. Porta R., Sabbah M., Di Pierro P., Biopolymers as Food Packaging Materials, *International Journal Molecular Science*, 21, 4942, **2020**.

9. Ramos O.L., Pereira R.N., Cerqueira M.A., Martins J.R., Teixeira J.A., Malcata F.X., Vicente A.A., Chapter 8- Bio-Based Nanocomposites for Food Packaging and Their Effect in Food Quality and Safety, *Food Packaging and Preservation,* 271-306, **2018**.

10. Kausar A., A Review of High Performance Polymer Nano-Composites for Packaging Applications in Electronics and Food Industries, *Journal of Plastic Film & Sheeting*, 36, 1, 94-112, **2019**.

11. Chausali N., Saxena J., Prasad R., Recent Trends in Nanotechnology Applications of Bio-based Packaging, *Journal of Agriculture and Food Research*, 7, 100257, **2022.**

12. Basavegowda N., Baek K.H ,.Advances in Functional Biopolymer-based Nanocomposites for Active Food Packaging Applications, *Polymers,* 13, 23, 4198, **2021**.

13. Sharma R., Jafari S.M., Sharma S., Antimicrobial Bio-nano-Composites and Their Potential Applications in Food Packaging, *Food Control*, 112, 107086, **2020.**

14. Emamhadi M.A., Sarafraz M., Akbari M., Thai V.N., Fakhri Y., Linh N.T.T., Mousavi Khaneghah A., Nanomaterials for Food Packaging Applications: A Systematic Review, *Food and Chemical Toxicology*, 146, 111825, **2020**.

15. Primožič M., Knez Ž., Leitgeb M., (Bio)nanotechnology in Food Science-food Packaging, *Nanomaterials,* 11, 2, 292, **2021**.

16. Kim S.W., Cha S.H., Thermal, Mechanical, and Gas Barrier Properties of Ethylene–vinyl Alcohol Copolymer-based Nano-Composites for Food Packaging Films: Effects of Nanoclay Loading, *Journal of Applied Polymer Scienc*e, 131, 11, **2014**.

17. Kuswandi B., Environmental Friendly Food Nano-packaging, *Environmental Chemistry Letters*, 15, 2, 205-221, **2017**.

18. Huang J.Y., Li X., Zhou W., Safety Assessment of Nano-Composite for Food Packaging Application, *Trends in Food Science & Technology,* 45, 2, 187-199, **2015**.

19. Shams R., Rizvi Q.H., Dar A.H., Majid I., Khan S., Nano-Composite: Potential Nanofiller for Food Packaging Applications, *Bio-based Packagin*g, 119-131, **2021**.

20. Omerović N., Djisalov M., Živojević K., Mladenović M., Vunduk J., Milenković I., Knežević N.Ž., Gadjanski I., Vidić J., Antimicrobial Nanoparticles and Biodegradable Polymer Composites for Active Food Packaging Application**s,** *Food Science and Food Safety,* 20, 3, 2428-2454, **2021**.

21. Pramanik P.K.D., Solanki A., Debnath A., Nayyar A., El-sappagh S., Kwak K., Advancing Modern Healthcare with Nanotechnology, Nanobiosensors, and Internet of Nano Things: Taxonomies, Applications, Architecture, and Challenges, *IEEE Access*, 8, 65230-65266, **2020**.

22. Sharma C., Dhiman R., Rokana N., Panwar H., Nanotechnology: An Untapped Resource for Food Packaging, *Frontiers in Microbiology*, 8, 1735, **2017**.

23. Kr Deshwal G., Panjagari N.R., Singh A.K., Alam T., Performance Evaluation of a Biopolymer-based In-package UV Activated Colorimetric Oxygen Indicator with Modified Atmosphere Packaged Mozzarella Cheese, *Journal of Packaging Technology and Research*, 5, 2, 51-57, **2021**.

24. Kr Deshwal G., Panjagari N.R., Badola1 R., Singh A.K., Minz P.S., Ganguly S., Alam T., Characterization of BioPolymer-based UV-activated Intelligent Oxygen Indicator for Food-packaging Applications, *Journal of Packaging Technology and Research,* 2, 29-43, **2018**.

25. Abad E., Zampolli S., Marco S., Scorzoni A., Mazzolai B., Juarros A., Gomez D., Elmi I., Cardinali G.C., Gomez J.M., Palacio F., Cicioni M., Mondini A., Becker T., Sayhan I., Flexible Tag Microlab Development: Gas Sensors Integration in RFID Flexible Tags for Food Logistic, *Sensors and Actuators B: Chemical*, 127, 1, 2-7, **2007**.

26. Nechita P., Roman M., Review on Polysaccharides Used in Coatings for Food Packaging Papers, *Coatings,* 10, 6, 566, **2020**.

27. Nesic A., Barjas G.C., Brankovic S.D., Davidovic S., Radovanovic N., Delattre C., Prospect of Polysaccharide-based Materials as Advanced Food Packaging, *Molecules*, 25, 1, 135, **2019**.

28. Olayil R., Prabu V.A., DayaPrasad S., Naresh K., Rama Sreekanth P.S., A Review on the Application of Bio-nanocomposites for Food packaging, *Materials Today: Proceedings*, 56, 1302-1306, **2022**.

29. Park H.M., Lee W.K., Park C.Y., Cho W.J., Ha C.S., Environmentally Friendly Polymer Hybrids Part I Mechanical, Thermal, and Barrier Properties of Thermoplastic Starch/clay Nanocomposites, *Journal of Materials Science,* 38, 5, 909-915, **2003**.

30. Oliveira A.V., Silva A.P.M., Barros M.O., Souza Filho M.M., Rosa M.F., Azeredo H.M.C., Nanocomposite Films from Mango Kernel or Corn Starch with Starch Nanocrystals, *Starch*, 70, 1800028, **2018.**

31. Fortunati E., Luzi F., Yang W., Kenny J.M., Torre L., Puglia D., Chapter 4- Bio-Based Nanocomposites in Food Packaging, in Nanomaterials for Food Packaging ,*Elsevier*, 71-110, **2018**.

32. Hooda R., Batra B., Kalra V., Singh Rana J., Sharma M., Chitosan-Based Nanocomposites in Food Packaging, in Bio-based Materials for Food Packaging: *Green* and Sustainable Advanced Packaging Materials, Springer, Singapore 269-285, **2018**.

33. Lin D., Yang Y., Wang J., Yana W., Wu Z., Chen H., Zhang Q., Wu D., Qin W., Tu Z., Preparation and Characterization of TiO_2-Ag Loaded Fish Gelatin-chitosan Antibacterial Composite Film for Food Packaging, *International Journal of Biological Macromolecules*, 154, 123-133, **2020.**

34. Bumbudsanpharoke N., Choi J., Ko S., Applications of Nanomaterials in Food Packaging, *Journal of Nanoscience and Nanotechnology,* 15, 9, 6357-6372, **2015**.

35. Sadegh-Hassani F., Mohammadi Nafchi A., Preparation and Characterization of Bionanocomposite Films Based on Potato Starch/halloysite Nanoclay, *International Journal of Biological Macromolecules,* 67, 458-462, **2014.**

36. Oleyaei S.A., Almasi H., Ghanbarzadeh B., Moayedi A.A., Synergistic Reinforcing effect of TiO_2 and Montmorillonite on Potato Starch Nanocomposite Films: Thermal, Mechanical and Barrier Properties, *Carbohydrate Polymers*, 152, 253-262, **2016**.

37. Ilyas R.A., Sapuan S.M., Norrrahim M.F., Yasim-Anuar T.A.T., Kadier A., Kalil M.S., Atikah M.S.N., Ibrahim R., Asrofi M., Abral H., Nazrin A., Syafiq R., Aisyah H.A., Asyraf M.R.M., Nanocellulose/starch Biopolymer NanoComposites: Processing, Manufacturing and Applications, Advanced Processing, Properties, and Applications of Starch and Other Bio-based Polymers, Chapter 6, *Elsevier*, 65-88, **2020**.

38. Marra A., Silvestre C., Duraccio D., Cimmino S., Polylactic acid/zinc Oxide Biocomposite Films for Food Packaging Application, *International Journal of Biological Macromolecules*, 88, 254-262, **2016.**

39. Arora A., Padua G.W., Review: Nanocomposites in Food Packaging, *Journal of Food Science*, 75, 1, R43-R49, **2010**.

40. Nekhamanurak B., Patanathabutr P., Hongsriphan N., Thermal–mechanical Property and Fracture Behaviour of Plasticised PLA–$CaCO_3$ Nanocomposite, *Plastics, Rubber and Composites*, 41, 175-179, **2012.**

41. Huang Y., Mei L., Chen X., Wang Q., Recent Developments in Food Packaging Based on Nanomaterials, *Nanomaterials,* 8, 10, 830, **2018**.

42. Mohammadi sadati S.M., Shahgholian-Ghahfarrokhi N., Shahrousvand E., Mohammadi-Rovshandeh J., Shahrousvand M., Edible Chitosan/cellulose Nanofiber Nanocomposite Films for Potential Use as Food Packaging, *Materials Technology,* 37, 10, 1276-1288, **2022**.

43. Malik G.K., Mitra J., Zinc Oxide Nanoparticle Synthesis, Characterization, and Their effect on Mechanical, Barrier, and Optical Properties of Hpmc-based Edible Film, *Food and Bioprocess Technology,* 14, 3, 441-456, **2021**.

44. De Moura M.R., Avena-Bustillos R.J., Mchugh T.H., Krochta J.M., Mattoso L.H.C., Properties of Novel Hydroxypropyl Methylcellulose Films Containing Chitosan Nanoparticles, *Journal of Food Science*, 73, 7, N31-N37*,* **2008.**

45. Xiong F., Wu Y., Li G., Han Y., Xiang F., Transparent nano-Composite Films of Lignin Nanospheres and Poly(vinyl alcohol) for UV-absorbing, *Industrial & Engineering Chemistry*

Research, 57, 4, 1207-1212, **2018**.

46. Sarwar M.S., Niazi M.B.K., Jahan Z., Ahmad T., Hussain A., Preparation and characterization of PVA/nanocellulose/Ag Nanocomposite Films for Antimicrobial Food Packaging, *Carbohydrate Polymers,* 184, 453-464, **2018.**

47. Idumah C.I., Hassan A., Ihuoma D.E., Recently Emerging trends in Polymer Nanocomposites Packaging Materials, *Polymer-Plastics Technology and Materials,* 10, 58,**2019** ,1054-1109 .

48. Garcia C.V., Shin G.H., Kim J.T., Metal oxide-based Nano-Composites in Food Packaging: Applications, Migration, and Regulations, *Trends in Food Science & Technology,* 82, 21-31, **2018**.

49. Echegoyen Y., Nerín C., Nanoparticle Release from Nano-silver Antimicrobial Food Containers, *Food and Chemical Toxicology,* 62, 16-22, **2013.**