

Polymerization
Quarterly, 2023
Volume 13, Number 1
Pages 19-28
ISSN: 2252-0449

An Overview of the Application of Nanomaterials and Biodegradable Polymers in the Food Packaging Industry

Omid Daliri Shamsabadi

Chemical Engineering Department, Faculty of Chemical Engineering, Islamic Azad University, Shahreza Branch, Postal Code 8648146411, Shahreza, Isfahan, Iran

Received: 13 Oct 2021, Accepted: 6 April 2022

Abstract

Oil-based products have led to a brilliant and magnificent civilization for the development of human society, but these materials have also caused serious damage to the environment and human health. Food coating with biodegradable polymers and nanomaterials can increase the preservation of nutritional value and shelf-life, improve the quality, and increase food safety, and can be a natural and suitable alternative to common plastic materials used in packaging industry. Ensuring the protection of the quality and taste of food products, increasing the durability, and reducing the packaging wastes is the priority of researchers. Synthetic plastics are widely used, especially in food packaging industry, and cause problems in disposal and recycling. These issues have caused increasing concerns about environmental pollution and destruction. Therefore, it is possible to address these challenges by developing of biodegradable polymers and nanomaterials. In addition, consumers demand sustainable (durable) packaging materials that reduce the environmental problems associated with plastic wastes. In this article, the applications of nanomaterials and biodegradable polymers in the packaging of food products are reviewed. In these composite materials, effective nanoparticles (i.e., gold, copper, copper oxide, and silver nanoparticles) have combined with biodegradable and eco-friendly polymers (i.e., gelatin and cellulose obtained from natural resources).

Key Words

packaging industry,
coating,
nanotechnology,
biodegradable,
shelf-life

(*) To whom correspondence should be addressed.
E-mail: omiddaliry@yahoo.com

مرور کلی بر کاربرد نانومواد و پلیمرهای زیست تخریب پذیر در صنعت بسته بندی مواد غذایی

امید دلیری شمس آبادی

اصفهان، شهرضا، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد شهرضا، دانشکده مهندسی شیمی، گروه مهندسی شیمی،

کد پستی ۸۶۴۸۱۴۶۴۱۱

دریافت: ۱۴۰۰/۷/۲۱، پذیرش: ۱۴۰۱/۱/۱۷

محصولات برپایه نفت، تمدن درخشان و باشکوهی را برای توسعه جامعه بشری به دنبال داشته است، اما این مواد، آسیب جدی به محیط زیست و سلامت انسان نیز وارد کرده اند. پوشش دهی مواد غذایی با پلیمرهای زیست تخریب پذیر و نانومواد، می تواند باعث افزایش حفظ ارزش غذایی و عمر انباری، بهبود کیفیت و افزایش ایمنی ماده غذایی شود و جایگزین طبیعی و مناسبی برای مواد پلاستیکی رایج در صنعت بسته بندی باشد. تضمین حفاظت از کیفیت و طعم محصولات غذایی، افزایش ماندگاری و کاهش ضایعات فیلم های بسته بندی از اولویت پژوهشگران است. پلاستیک های سنتزی، کاربرد زیادی به ویژه در صنعت بسته بندی مواد غذایی دارند و در دفع و بازیافت مشکلاتی را به وجود می آورند. این مسئله باعث نگرانی های روزافزون درباره آلودگی و تخریب محیط زیست شده است. بنابراین با کمک توسعه نانومواد و پلیمرهای زیست تخریب پذیر در صنعت بسته بندی غذایی، می توان این چالش ها را برطرف کرد. افزون بر این، مصرف کنندگان خواستار مواد بسته بندی پایدار (بادوامی) هستند که مشکلات زیست محیطی مرتبط با زباله های پلاستیکی را کاهش دهند. در این مقاله، کاربردهای نانومواد و پلیمرهای زیست تخریب پذیر در بسته بندی محصولات غذایی مرور می شود. در این مواد کامپوزیتی، نانوذرات مؤثر (مانند نانوذرات طلا، مس، مس اکسید و نقره) با پلیمرهای زیست تخریب پذیر و دوستدار محیط زیست (مانند ژلاتین و سلولوز به دست آمده از منابع طبیعی) ترکیب شده اند.

بسیار

فصلنامه علمی

سال سیزدهم، شماره ۱،

صفحه ۲۸-۱۹، ۱۴۰۲

ISSN: 2252-0449

چکیده



امید دلیری شمس آبادی

واژگان کلیدی

صنعت بسته بندی،

پوشش،

نانوفناوری،

زیست تخریب پذیر،

عمر انباری

مقدمه

بیماری‌های غذازاد یا بیماری‌های ناشی از غذا، یک نگرانی جهانی در حوزه بهداشت و سلامت عمومی هستند. هر سال ۶۰۰ میلیون مورد بیماری، ناشی از غذای آلوده است و سالانه ۴۲۰۰۰۰ نفر در اثر این بیماری‌ها جان خود را از دست می‌دهند. در اروپا سالانه ۲۳ میلیون نفر در اثر مصرف غذاهای آلوده بیمار می‌شوند. علائم بیماری‌های غذازاد از ناراحتی‌های خفیف ناشی از استفراغ تا تب و اسهال متغیر هستند. افزون بر این، شیوع بیماری‌های غذازاد پیامدهای اقتصادی جدی نیز دربردارد، زیرا باعث از بین رفتن اعتبار و شهرت برندهای غذایی می‌شوند. بسته‌بندی محصول غذایی در حفظ امنیت و کیفیت آن‌ها، از مرحله فراوری و ساخت تا حمل و نقل، انبارش و رساندن به دست مصرف‌کننده ضروری است. مواد پلاستیکی برپایه نفت مانند پلی اتیلن ترفتالات، پلی پروپیلن و پلی استیرن برای مدت زیادی در صنعت بسته‌بندی مواد غذایی استفاده می‌شوند تا (۱) محصولات غذایی از خطر فاسد و آلوده شدن حفظ شوند و (۲) حمل و نقل و ذخیره‌سازی آن‌ها آسان شده و از آسیب‌های فیزیکی و صدمات جلوگیری شود. نکته مهم اینکه پلاستیک‌های زیست‌تخریب‌ناپذیر سبب بروز مشکلات جدی بوم‌شناختی شده‌اند، چرا که بسته‌بندی‌های پلاستیکی محصولات غذایی معمولاً در محیط زیست رها شده و باعث آلودگی آن می‌شوند. حجم زیاد رهاسازی ضایعات پلیمری در طبیعت، لزوم استفاده از پلیمرهای زیست‌تخریب‌پذیر را نشان می‌دهد. افزون بر این، افزودنی‌های جدید برپایه نانوذرات فعال در تهیه فیلم‌های بسته‌بندی استفاده شده‌اند تا قابلیت فیلم‌های پلیمری زیست‌تخریب‌پذیر دوست‌دار محیط زیست در حفظ مواد غذایی در برابر نور، رطوبت، اکسیژن و سایر عوامل محیطی فاسدکننده تقویت شود.

تعریفی که از بسته‌بندی فعال در مقررات اروپایی به شماره ۴۵۰/۲۰۰۹ ارائه شده، بدین شرح است: بسته‌بندی‌های فعال، سامانه‌هایی هستند که اجزای فعالی را دربردارند و در ماده غذایی یا محیط اطراف آن منتشر می‌شوند. بسته‌بندی فعال از طریق برهم‌کنش میان فیلم بسته‌بندی، ماده غذایی و محیط داخلی و بیرونی، کیفیت و سلامت محصولات غذایی را تضمین می‌کند [۱]. این فناوری شامل افزودن ترکیبات فعال به فیلم بسته‌بندی است. بسته‌بندی فعال ضدباکتری، نسخه‌ای از بسته‌بندی فعال حاوی مواد ضد میکروب است که می‌تواند با فضای خالی بالای محصول بسته‌بندی شده یا خود محصول غذایی، برهم‌کنش داشته باشد. عملکرد بسته‌بندی ضدباکتری بدین صورت است که مواد



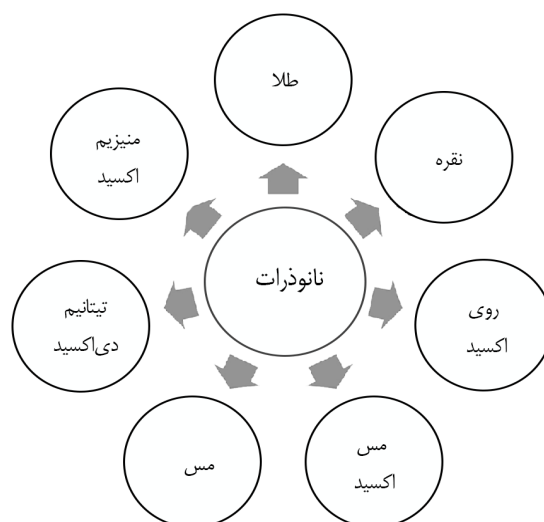
شکل ۱- ویژگی‌ها و کاربردهای نانومواد در صنعت بسته‌بندی مواد غذایی [۲].

فعال را در محصول غذایی یا محیط اطراف آن پراکنده می‌کند تا از رشد ریزاندامگان موجود در سطح ماده غذایی بسته‌بندی شده جلوگیری شود. افزون بر این، بهبود شرایط نگهداری می‌تواند تازگی و ماندگاری ماده غذایی را افزایش دهد و کیفیت و سلامت ماده غذایی را حفظ کند. خواص بی‌نظیر نانو ساختارها و نانومواد، نظیر کوچکی اندازه، زیادبودن نسبت سطح به حجم و داشتن آثار کوانتومی، آن‌ها را به گزینه‌های مناسبی برای استفاده در زمینه‌های مختلف صنایع غذایی تبدیل کرده است (شکل ۱).

نانوذرات فلزی و اکسید فلزی به دلیل فعالیت ضدباکتری ذاتی، توجه بسیاری را در صنایع غذایی به خود جلب کرده‌اند. نانومواد ضد میکروب در بسته‌بندی فعال، مواد غذایی را در برابر باکتری‌های فاسدکننده ایمن نگه می‌دارد. بدین ترتیب به ماده غذایی ذخیره شده کمک می‌کند تا به مدت طولانی طراوت و تازگی آن حفظ شود و راحتی هرچه بیشتر مصرف‌کنندگان را فراهم می‌کند. افزون بر این، ترکیب نانوذرات ضد میکروب فعال با فیلم‌های بسته‌بندی سبب می‌شود، بسته‌بندی‌ها سبک‌تر و قوی‌تر (افزایش استحکام مکانیکی) شده و نفوذ اکسیژن به آن‌ها کمتر شود. در این مقاله، به دلیل نیاز زیاد به توسعه صنعت بسته‌بندی مواد غذایی از منابع تجدیدپذیر و با خواص بهتر، نانوذرات استفاده‌شده در صنعت بسته‌بندی مطالعه شده‌اند. در شکل ۲، برخی از نانوذرات استفاده‌شده در بسته‌بندی مواد غذایی نشان داده شده است.

پلیمرهای زیست‌تخریب‌پذیر

از ویژگی بارز پلاستیک می‌توان به سبکی وزن، استحکام پوشش، عایق کاری گرمایی خوب، عدم تأثیر مواد شیمیایی، قیمت به نسبت



شکل ۲- نانوذرات استفاده شده در صنعت بسته بندی.

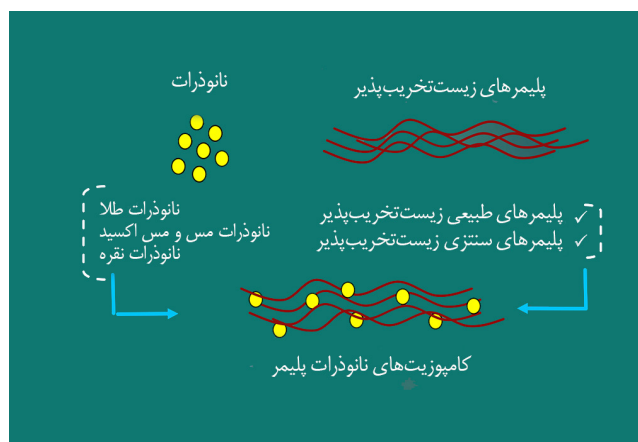
زیادی درباره آثار مخرب آنها بر سلامت انسان به وجود آمده است [۶،۷]. این مسئله جوامع علمی و سیاست گذار را ترغیب می کند تا همه منابع موجود را به منظور بررسی دقیق تر و در نهایت، کاهش آثار منفی پلاستیک ها بر انسان و محیط زیست به کار گیرند. در این راستا، فناوری های جدیدی کشف شده که هدف آنها توسعه بسته بندی های غذایی جدید پایدارتر و در عین حال برآورد انتظارات مصرف کنندگان و شرکت هاست.

برای تأیید و به رسمیت شناختن چشم انداز اقتصاد چرخشی معمول، تمام بسته بندی های پلاستیکی تا سال ۲۰۲۵، بازیافت پذیر، استفاده مجدد یا کمپوست شدن (کود) خواهند بود. همچنین، تولید و مصرف چند محصول پلاستیکی یک بار مصرف شامل نی، ظروف بسته بندی مواد غذایی و پاکت های پلاستیکی خرید از فروشگاه ها، ممنوع شده است. زیرا، بازیافت این مواد سخت بوده و اغلب در محیط زیست رها می شوند. پلیمرهای با منبع طبیعی، اولین گزینه هنگام اقدام در تهیه بسته بندی های پایدارتر با سمیت کمتر برای محصولات غذایی هستند، زیرا این پلیمرها به آسانی با فعالیت موجودات زنده تجزیه می شوند و در محیط باقی نمی ماندند [۸]. پلیمرهای طبیعی زیست تخریب پذیر (BNP)، زیست پلیمرهایی هستند که از زیست مس و سایر منابع کشاورزی تهیه می شوند.

BNP از لحاظ شیمیایی به دسته های مختلف تقسیم می شود: BNP متشکل از پلی ساکاریدها، پروتئین های حیوانی یا گیاهی، لیپیدها و پلی استرها از منابع میکروبی. در جدول ۱، فهرست دسته بندی های مختلف BNP استفاده شده در فیلم های بسته بندی ارائه شده است. پلیمرهای سنتزی زیست تخریب پذیر نیز مجموعه ای از خواص مکانیکی، فیزیکی و شیمیایی را نشان می دهند که آنها را برای کاربرد در بسته بندی مواد غذایی، مطلوب

ارزان و ظاهر زیبا اشاره کرد که باعث مصرف روزافزون آنها در صنعت شده است. خواص شیمیایی ویژه، پلاستیک ها را مستحکم و قابل استفاده مجدد می کند، مگر اینکه از طریق سوزاندن یا اکسایش در درازمدت تخریب شوند. دلیل اصلی عدم زیست تخریب پذیری پلاستیک های معمولی، دراز بودن طول مولکول پلیمر و پیوند قوی میان مونومرهای آن است که تجزیه آن را توسط موجودات با مشکل مواجه می کند. برآوردها نشان می دهد، پلاستیک ها حدود ۱۰٪ از زباله های جهان و حدود ۷۰٪ از زباله های بستر دریا را فراورده های پلاستیکی یک بار مصرف، مانند ظروف نوشیدنی ها، بسته بندی مواد غذایی و نی تشکیل می دهند [۳]. طبق پیش بینی اگر این روند ادامه یابد، در دهه آینده مقدار زباله های پلاستیکی حتی بیش از این ها خواهد بود [۴].

پلیمرهای برپایه نفت به دلیل تخریب بسیار آهسته، تحت فرایند مکانیکی، تکه تکه شده و به میکروپلاستیک ها (با اندازه کمتر از ۵ mm) و نانوپلاستیک ها (با اندازه کمتر از ۱۰۰ nm) تبدیل می شوند. زیست لایه های میکروبی موجود روی میکروپلاستیک ها (تشکیل زیست بوم ناخواسته روی پلاستیک های دورریز انسان) یا پلاستیک گوی (plastisphere) نوعی نگرانی خاص به شمار می روند. زیرا پلاستیک گوی می تواند به عنوان سامانه انتقال عوامل بیماری زا عمل کنند و شنواری ذرات و سرعت تخریب پلیمرها را تغییر دهند. از این رو، بر توزیع کلی آلاینده های پلاستیکی و سرنوشت آنها اثرگذارند. شواهدی مبنی بر ایجاد سمیت سلولی (cytotoxicity) و سمیت ژنی (genotoxicity) این ذرات پلاستیکی کوچک برای ماهی ها و صدف ها وجود دارد [۵]. نگرانی های



شکل ۳- ترکیب نانوذرات و پلیمرهای زیست تخریب پذیر.

جدول ۱- فهرست زیست پلیمرهای طبیعی که برای تولید فیلم‌های بسته‌بندی مواد غذایی استفاده می‌شوند.

زیست پلیمر	منبع	خواص	مرجع
زیست پلیمرهای طبیعی-کربوهیدرات‌ها			
نشاسته	ذرت، سیب‌زمینی و برنج	دردسترس، ارزان و خواص مکانیکی ضعیف	۱۱
سلولوز	ضایعات کشاورزی (ساقه ذرت و باگاس نیشکر)	فراوان‌ترین پلیمر طبیعی و قابلیت تبدیل به بلور	۱۲
کیتوسان	اسکلت خارجی سخت‌پوستان (خرچنگ و میگو)	قابلیت تشکیل فیلم خوب و حساسیت زیاد آب (مسئله انحلال‌پذیری)	۱۳
زیست پلیمرهای طبیعی-پروتئین			
ژئین	پروتئین ذرت	قابلیت ایجاد ترکیب با لیپیدها و اسیدهای چرب و نامحلول بودن در آب	۱۴
ژلاتین	پوست ماهی و پوست گاو	جذب نور، رطوبت زیاد و استحکام مکانیکی کم	۱۵

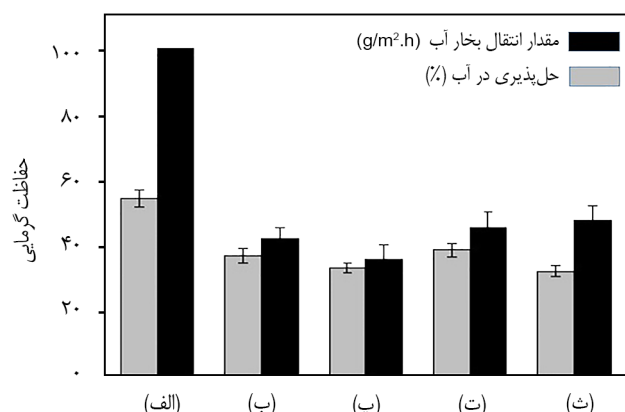
از نرم‌کننده‌های استفاده‌شده عبارت از گلیسرول، پلی‌اتیلن گلیکول، سوربیتول، پروپیلن گلیکول، اتیلن گلیکول و لیپیدها هستند. لیپیدها می‌توانند قابلیت فیلم‌های بسته‌بندی در جلوگیری از نفوذ بخار آب را بهبود بخشند. هرچند، نرم‌کننده‌ها آثار منفی ویژه‌ای نظیر تغییر عطر و بوی ماده غذایی و افزایش نفوذ اکسیژن به فیلم‌های بسته‌بندی را دارند.

نانوذرات طلا

در مقایسه با بسیاری از مواد ضد میکروب که موجب تکثیر سمیت سلولی می‌شوند، نانوذرات طلا سلول‌های باکتری را از طریق روش‌های مستقل از بین می‌برند. افزون بر این، عملکرد ضدباکتری نانوذرات طلا تا حد زیادی به اندازه ذرات، عملکرد و سویه باکتری بستگی دارد که به آن‌ها اعمال می‌شود [۱۶]. نانوذرات طلا یا به غشای باکتری متصل می‌شوند و پتانسیل آن را تغییر می‌دهند یا در سلول‌های داخلی وارد شده که سطح آدنوزین تری فسفات را کاهش می‌دهند یا با انتقال‌دهنده ریبوزوم آن را مهار می‌کنند [۱۷].

می‌سازد. زیست تخریب‌پذیری این مواد سنتزی، معمولاً ناشی از آبکافت آهسته آن‌ها در یک محیط آبی است. همچنین، خاصیت مزبور را می‌توان از طریق فرایند کاتالیز آنزیمی، بهبود بخشید. پلی‌آلفا هیدروکسی استرها نظیر پلی‌گلیکولیک اسید (PGA)، پلی‌لاکتیک اسید (PLA) و کوپلیمرهای آن‌ها، نظیر پلی‌لاکتید-co-گلیکوزید (PLGA) به‌طور گسترده در تهیه بسته‌بندی‌های ضد میکروب استفاده شده‌اند [۱۴، ۱۵].

فیلم پلی‌وینیل الکل (PVA) نسبت به سایر پلیمرهای سنتزی یک مزیت دارد و آن هم قابلیت استفاده مجدد است. مثال دیگر، کاغذ کرافت است که به‌طور گسترده در بسته‌بندی مواد غذایی استفاده می‌شود. زیرا دارای ویژگی‌هایی نظیر زیست تخریب‌پذیری و بی‌خطر بودن (ایمن بودن) است. با این حال، کاغذ کرافت به‌محض جذب آب خواص خود را از دست می‌دهد و به بستر مناسبی برای رشد ریزندامگان تبدیل می‌شود. در هنگام تهیه فیلم‌های بسته‌بندی، به‌منظور بهبود انعطاف‌پذیری و حساسیت به رطوبت معمولاً نرم‌کننده‌ها را با پلیمرهای تجزیه‌پذیر مخلوط می‌کنند. چند نمونه

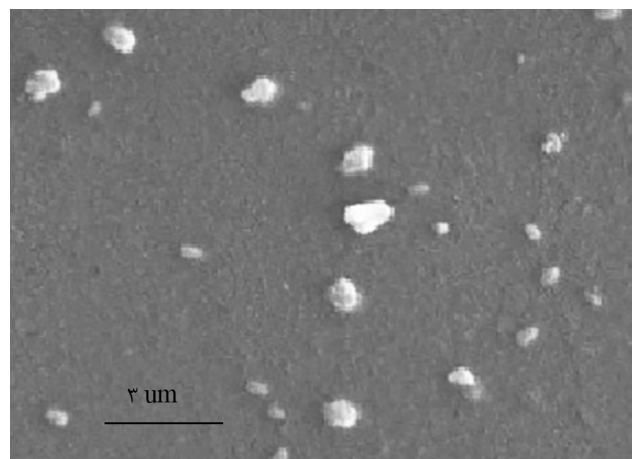


شکل ۵- نمودار بررسی میزان انتقال بخار آب و حلالیت در آب برای: (الف) پلی وینیل الکل، (ب) پلی وینیل الکل با گلیوکسال، (پ) پلی وینیل الکل با گلیوکسال همراه با نانوذرات طلا، (ت) پلی وینیل الکل و گرافن اکسید، (ث) پلی وینیل الکل و گرافن اکسید همراه با نانوذرات طلا [۱۸].

نانوذرات طلا با قطر ۱۵ nm را می توان بی ضرر در نظر گرفت. در حالی که ترکیبات ریزتر ممکن است باعث بافت مردگی (necrosis) یا مرگ موضعی بافت های آسیب دیده در سلول های پستانداران شود. نوع ماده بسته بندی با توجه به ماده غذایی دارای اهمیت زیادی است. افزودن نانوذرات طلا می تواند باعث افزایش خواص مکانیکی و خواص ضد میکروبی در مقایسه با سایر مواد شود [۲۰].

نانوذرات مس و مس اکسید

نانوذرات مس اکسید برای تقویت خواص مکانیکی (مانند استحکام کششی و مدول کشسانی) و ضد باکتری بودن پلیمرهای کربوهیدرات بررسی شده اند. اثر این نانوذرات، افزون بر زیست پلیمرهای کربوهیدرات با استفاده از آگار، آلژینات، کاراگینان، کیتوسان و کربوکسی متیل سلولوز آزمایش شد [۲۱]. همه فیلم های کامپوزیتی



شکل ۴- تصویر SEM نانوذرات طلا-پلی وینیل الکل با گلیوکسال [۱۸].

هنگامی که پلی وینیل الکل با گلیوکسال پیوند داده شد، نانوذرات طلا به عنوان عامل تقویت کننده اضافه شده و ویژگی های آب گریزی و مکانیکی را بهبود می بخشد (شکل ۴) [۱۸].

اتصال عرضی بین مولکول ها به تشکیل منافذی با ساختار فشرده در بسته بندی شده کمک می کند، سرعت انتقال بخار آب را کاهش می دهد و باعث افزایش پایداری آب و گرمای فیلم می شود (شکل ۵). نانوکامپوزیت فعالیت ضد میکروب مؤثری را در برابر باکتری اشرشیا کلی نشان داد. نانوذرات طلا از طریق مسدود کردن گروه های تیولی، سوراخ هایی را در دیواره سلول ایجاد کرده و آنزیم های باکتریایی را غیر فعال می کنند. این ماده قابلیت بسیاری برای نگهداری از موز در مقایسه با فیلم پلی وینیل الکل همراه با گرافن نشان داده است. نانوذرات طلای به سادگی قرار گرفته روی کاغذ سلولوزی، تقویت کننده امیدبخشی هستند. همچنین، نانوذرات طلا ممکن است پوشش نقره ای یک فیلم سلولوزی را افزایش دهند [۱۹]. بررسی سمیت سلولی وابسته به اندازه در آزمایشگاه نشان داد،

جدول ۲- مشخصات فیلم های پلی لاکتیک اسید، پلی اتیلن گلیکول، نانوذرات نقره و اسانس دارچین [۲۲].

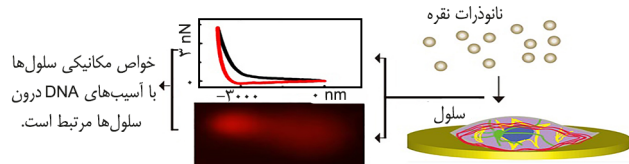
شماره نمونه فیلم	ضخامت (mm)	نفوذپذیری بخار آب (g.mm/m²)
PLA/PEG (90/10)	0.182 ± 0.005	26.9 ± 2.1
PLA/PEG/2% Ag-Cu NPs	0.183 ± 0.004	20.6 ± 1.4
PLA/PEG/4% Ag-Cu NPs	0.184 ± 0.005	16.0 ± 1.2
PLA/PEG/25% CEO	0.183 ± 0.004	32.6 ± 2.8
PLA/PEG/50% CEO	0.185 ± 0.003	40.1 ± 2.2
PLA/PEG/4% Ag-Cu NPs/50% CEO	0.186 ± 0.005	30.7 ± 3.0

نانوذرات مس اکسید حاصل دارای ساختار سطحی همگن، یکنواخت و صاف بودند، به جز فیلم نانوکامپوزیتی نانوذرات مس اکسید-آگار که ترکیبات و خوشه‌های نانوذرات مس اکسید در آن مشاهده شد. جالب توجه آنکه، ترکیب نانوذرات مس-نقره در پلیمر پلی‌لاکتیک اسید به‌طور شایان توجهی خواص مکانیکی و ضخامت فیلم را بهبود نمی‌بخشد (جدول ۲). نانوذرات مس در بسته‌بندی فعال نیز در ترکیب با نانوذرات نقره، برای دستیابی به اثر هم‌افزایی دو فلز استفاده شده است [۲۲].

نوعی نانوکامپوزیت پلی‌لاکتیک اسید پر شده با مواد معدنی نقره و نانوذرات مس اکسید از طریق فرایند قالب‌گیری تهیه شده است. فیلم پلی‌لاکتیک اسید-نانوذرات مس اکسید نقره به‌دست‌آمده در مقایسه با فیلم پلی‌لاکتیک اسید از خواص سدگری، کاهش انتقال نور، شکل‌شناسی اصلاح‌شده و پایداری گرمایی بهبود یافته برخوردار بود. در این آزمایش، نانوکامپوزیت به‌دلیل تبخیر اسانس دارچین در طول زمان سفت و سخت شده و اثر ضد میکروب آن در برابر باکتری سالمونلا تأیید شده است. از دست رفتن اسانس دارچین انتشار نانوذرات را محدود می‌کند، در نتیجه فعالیت ضد میکروب نمونه پس از ۱۵۰ روز ذخیره‌سازی در دمای ۴ °C کاهش یافت [۲۲]. ضخامت فیلم، استحکام کششی، پایداری گرمایی، سدگری اکسیژن و انتقال نور نشان داده‌شده به غلظت نانوذرات وابسته است. نانوذرات مس اکسید-مس در فیلم‌های فعال رشد باکتری را با تولید یون‌های مثبت یا آزادسازی آن‌ها مهار می‌کند. نانوذرات مس روی غشای باکتری تجمع یافته، پتانسیل الکتروشیمیایی غشایی را کاهش می‌دهند و دیواره سلول باکتری را مختل می‌کنند [۲۳]. سازوکارهای سمی مشابه نانوذرات مس-مس اکسید برای سلول‌های انسانی نیز بررسی شده است [۲۴]. کاربردهای عملی کامپوزیت‌های زیست‌پلیمر نانوذرات مس-مس اکسید به‌شدت به تثبیت نانوذرات درون فیلم کمک می‌کنند که با این کار تولید یون‌های Cu^{2+} کنترل می‌شود. بنابراین از سمیت سلولی به سلول‌های انسانی جلوگیری می‌کند.

نانوذرات نقره

نانوذرات نقره از رایج‌ترین نانوپرکننده‌های استفاده‌شده برای ایجاد خواص ضد میکروب در فیلم‌های کامپوزیتی هستند [۲۵]. سازمان غذا و داروی آمریکا، مقدار مجاز این افزودنی را $17 \mu g/kg$ اعلام کرده است [۲۶]. عملکرد ضد باکتری نانوذرات نقره بدین صورت است که این نانوذرات به غشای باکتری می‌چسبند یا به درون سلول‌های باکتری نفوذ می‌کنند. نانوذرات نقره می‌توانند با لیپیدهای



شکل ۶- ارتباط مستقیم اثر نانوذرات نقره و سمیت سلولی روی سلول‌ها [۲۹].

غشا یا با DNA و پروتئین‌های موجود در درون سلول‌ها، برهم‌کنش داشته باشند [۲۷]. همچنین نشان داده شده است، نانوذرات نقره آنزیم‌های ضد اکسند نظیر گلوکاتینون، دیسموتاز سوپراکسید و کاتالاز را تنظیم می‌کنند و سلول باکتری را از دفاع در برابر تنش اکسایشی رها می‌سازند. آنزیم‌های یادشده در محافظت از سلول‌ها در برابر تنش اکسایشی نقش مهمی را ایفا می‌کنند. حالت دیگر عملکرد نانوذرات نقره شامل انتشار یون‌های بسیار سمی نقره است که به گروه‌های سولفیدریل پروتئین متصل می‌شوند یا درون زنجیرهای DNA جای می‌گیرند. افزون بر این، یون‌های نقره (Ag^+) منتشرشده از نانوذرات نقره می‌توانند گونه‌های فعال اکسیژن (ROS) متراکمی را ایجاد کنند که با پروتئین‌های باکتریایی مربوط به زنجیره تنفسی برهم‌کنش دهند و سبب مرگ سلول شوند [۲۸]. در جدول ۳، برخی از نانوذرات استفاده‌شده در صنعت بسته‌بندی ارائه شده است. متأسفانه همان‌طور که در آزمایش‌ها نشان داده شده، نانوذرات نقره ممکن است سلول‌های انسانی را نیز بکشند [۲۹-۳۱].

در بسته‌بندی‌های فعال، نانوذرات نقره در مواد پلیمری تثبیت شده‌اند که انتشار کنترل‌شده یون نقره را امکان‌پذیر می‌سازد و بدین ترتیب، مانع بروز سمیت سلولی می‌شود. مهاجرت نقره از فیلم بسته‌بندی به ماده غذایی از طریق جداسازی نانوذرات نقره از کامپوزیت‌ها یا انحلال اکسایشی یون‌های نقره انجام می‌گیرد. معمولاً برای تهیه نانوذرات نقره کاربردی در بسته‌بندی، یک روش سنتز به‌کار گرفته می‌شود. ارتباط این نانوذرات با سمیت سلولی در شکل ۶ آمده است. Wu و همکاران، با استفاده از کیتوسان به‌عنوان ماده کاهش‌دهنده سبز و پایدارکننده توانستند با موفقیت نانوذرات نقره با لاپونیت را سنتز کنند. نانوذرات نقره و لاپونیت، خواص فیلم‌های کیتوسان را برای استفاده در بسته‌بندی میوه سرخالو بهبود بخشیدند، تراکم فیلم را افزایش و خواص مکانیکی آن را بهبود دادند و سبب همگن‌تر و یکنواخت‌تر شدن فیلم‌های بسته‌بندی شدند [۳۲].

جدول ۳- کاربرد نانوذرات طلا، مس، مس اکسید و نقره براساس نتایج فعالیت ضد میکروب در بسته بندی مواد غذایی بررسی شده است.

نانوذره	زیست پلیمر	کاربرد	نتایج-فعالیت ضد میکروبی	مرجع
طلا	میکروبلور سلولوز	بسته بندی مواد غذایی فعال	افزایش فعالیت ضد باکتری نانوذرات طلا، کاهش رشد باکتری (وانکومایسین)، باکتری های استافیلوکوکوس اورئوس و انتروکوک	۳۳
طلا	پلی وینیل الکل	بسته بندی مواد غذایی فعال برای موز	بهبود استحکام کششی و مدول یانگ، باکتری اشرشیا کلی	۱۸
طلا-نقره	سلولوز	بسته بندی مواد غذایی فعال	نانوذرات نقره دارای خواص ضد باکتری زیاد-نانوذرات طلای زیست سازگار، افزایش خواص ضد باکتری، باکتری اشرشیا کلی	۱۹
نقره	کاراگینان	بسته بندی مواد غذایی فعال	افزایش استحکام مکانیکی و پایداری گرمایی، کاهش آب گریزی، باکتری های اشرشیا کلی و لیستریا مونوسیژنوز	۳۴
نقره	نانوذرات نشاسته	بسته بندی مواد غذایی فعال	بهبود خواص مکانیکی، باکتری های اشرشیا کلی و استافیلوکوکوس اورئوس	۳۵
نقره	پلی وینیل الکل	بسته بندی مواد غذایی فعال	افزایش استحکام کششی، اثر سمیت سلولی ندارد (زنده مانی سلول ها بیش از ۹۰٪)، باکتری های اشرشیا کلی و استافیلوکوکوس اورئوس	۳۶
نقره-سلنیم	ژلاتین	بسته بندی مواد غذایی فعال	افزایش ماندگاری میوه کیوی، باکتری های اشرشیا کلی و استافیلوکوکوس اورئوس	۳۷
نقره-مس	ژلاتین پوست ماهی	بسته بندی مواد غذایی فعال با غربالگری UV	بهبود خواص مکانیکی، باکتری های لیستریا مونوسیژنوز و سالمونلا	۳۸

نتیجه گیری

نانوذرات در مواد خوراکی با بسته بندی قرار دارد. یکی از فواید کاربردی نانوفناوری، ایجاد عملکردهای جدید بسته بندی مواد غذایی با بهبود خواص مواد خوراکی در راستای سالم تر بودن، طعم بهتر و همچنین مواد غذایی با کیفیت تر است. با وجود گستردگی افق های نانوفناوری در کاربردهای مختلف پژوهشی مانند بخش غذایی، همچنان سمیت نانوذرات و کاربرد ایمن آنها اما موضوع بحث برانگیزی است. در نتیجه برای تضمین سلامت انسان ها، توجه به موارد ایمنی و آثار زیست محیطی پیش از رهاسازی نانوذرات در بازار ضروری است.

ویژگی یک فیلم خوراکی خوب، دارا بودن مجموعه ای از شرایط مهم از جمله افزایش کیفیت های حسی، خاصیت محافظتی، استحکام مکانیکی و پایداری میکروبی، عدم سمیت، بی خطری برای سلامتی، تولید آسان، غیر آلودگی و کم هزینه بودن هست. شایان ذکر است، تولید چنین فیلم هایی هنوز در مرحله آزمایشگاهی قرار دارد. همچنین، تمرکز بر به کارگیری نانوفناوری در بخش مواد غذایی بر بهبود کیفیت و ایمنی در این حیطه در قالب ترکیب

مراجع

1. Realini C.E. and Marcos B., Active and Intelligent Packaging Systems for a Modern Society, *Meat Sci.*, **98**, 404-419, 2014.
2. Jeevahan J.J., Chandrasekaran M., Venkatesan S., Sriram V., Joseph G.B., Mageshwaran G., and Durairaj R., Scaling up Difficulties and Commercial Aspects of Edible Films for Food Packaging: A Review, *Trends Food Sci. Technol.*, **100**, 210-222, 2020.
3. Barnes D.K., Galgani F., Thompson R.C., and Barlaz M., Accumulation and Fragmentation of Plastic Debris in Global Environments, *Philos. Trans. R. Soc. London, Ser. B*, **364**, 1985-1998, 2009.
4. Harrison J.P., Hoellein T.J., Sapp M., Tagg A.S., Ju-Nam Y., and Ojeda J.J., Microplastic-Associated Biofilms: A Comparison of Fresh Water and Marine Environments, In *Fresh Water Microplastics*, Springer, Cham., 181-201, 2017.
5. De Oliveira Filho J.G., Rodrigues J.M., Valadares A.C.F., de Almeida A.B., de Lima T.M., Takeuchi K.P., and Dyszy F.H., Active Food Packaging: Alginate Films with Cottonseed Protein Hydrolysates, *Food Hydrocoll.*, **92**, 267-275, 2019.
6. Da Costa J.P., Santos P.S., Duarte A.C., and Rocha-Santos T., (Nano) Plastics in the Environment—Sources, Fates and Effects, *Sci. Total Environ.*, **566**, 15-26, 2016.
7. Fadare O.O., Wan B., Guo L.-H., and Zhao L., Microplastics from Consumer Plastic Food Containers: Are We Consuming It?, *Chemosphere*, **253**, 126787, 2020.
8. Popović S.Z., Lazić V.L., Hromiš N.M., Šuput D.Z., and Bulut S.N., Biopolymer Packaging Materials for Food Shelf-Life Prolongation, In *Biopolymers for Food Design*, *Academics*, 223-277, 2018.
9. Chakravartula S.S.N., Lourenço R.V., Balestra F., Bittante A.M.Q.B., do Amaral Sobral P.J., and Dalla Rosa M., Influence of Pitanga (*Eugenia uniflora* L.) Leaf Extract and/or Natamycin on Properties of Cassava Starch/Chitosan Active Films, *Food Packag. Shelf Life*, **24**, 100498, 2020.
10. Hassan B., Chatha S.A.S., Hussain A.I., Zia K.M., and Akhter N., Recent Advances on Polysaccharides, Lipids and Protein Based Edible Films and Coatings: A Review, *Int. J. Biol. Macromol.*, **109**, 1095-1107, 2018.
11. Akhter R., Masoodi F., Wani T.A., and Rather S.A., Functional Characterization of Biopolymer Based Composite Film: Incorporation of Natural Essential Oils and Antimicrobial Agents, *Int. J. Biol. Macromol.*, **137**, 1245-1255, 2019.
12. Spasojević L., Katona J., Bučko S., Savić S.M., Petrović L., Budinić J.M., and Sharipova A., Edible Water Barrier Films Prepared from Aqueous Dispersions of Zein Nanoparticles, *LWT*, **109**, 350-358, 2019.
13. Kadam S.U., Pankaj S., Tiwari B.K., Cullen P., and O'Donnell C.P., Development of Biopolymer-Based Gelatin and Casein Films Incorporating Brown Seaweed *Ascophyllum nodosum* Extract, *Food Packag. Shelf Life*, **6**, 68-74, 2015.
14. Biswal A.K., Hariprasad P., and Saha S., Efficient and Prolonged Antibacterial Activity from Porous PLGA Microparticles and Their Application in Food Preservation, *Mater. Sci. Eng. C*, **108**, 110496, 2020.
15. Holman B.W., Kerry J.P., and Hopkins D.L., Meat Packaging Solutions to Current Industry Challenges: A Review, *Meat Sci.*, **144**, 159-168, 2018.
16. Ortiz-Benítez E.A., Velázquez-Guadarrama N., Durán Figueroa N.V., Quezada H., and Olivares-Trejo J.d.J., Antibacterial Mechanism of Gold Nanoparticles on *Streptococcus pneumoniae*, *Metallomics*, **11**, 1265-1276, 2019.
17. Cui Y., Zhao Y., Tian Y., Zhang W., Lü X., and Jiang X., The Molecular Mechanism of Action of Bactericidal Gold Nanoparticles on *Escherichia coli*, *Biomaterials*, **33**, 2327-2333, 2012.
18. Chowdhury S., Teoh Y.L., On K.M., Zaidi N.S.R., and Mah S.-K., Polyvinyl Alcohol Crosslinked Composite Packaging Film Containing Gold Nanoparticles on Shelf Life Extension of Banana, *Food Packag. Shelf Life*, **24**, 100463, 2020.
19. Tsai T.-T., Huang T.-H., Chang C.-J., Ho N.Y.-J., Tseng Y.-T., and Chen C.-F., Antibacterial Cellulose Paper Made with Silver-Coated Gold Nanoparticles, *Sci. Rep.*, **7**, 1-10, 2017.
20. Yah C.S., The Toxicity of Gold Nanoparticles in Relation to their Physiochemical Properties, *Biomed. Res. Trace Elem.*, **24**, 400-413, 2013.
21. Shankar S. and Rhim J.-W., Amino Acid Mediated Synthesis of Silver Nanoparticles and Preparation of Antimicrobial Agar/Silver Nanoparticles Composite Films, *Carbohydr. Polym.*, **130**, 353-363, 2015.
22. Ahmed J., Arfat Y.A., Bher A., Mulla M., Jacob H., and Auras R., Active Chicken Meat Packaging Based on Polylactide Films and Bimetallic Ag-Cu Nanoparticles and Essential Oil, *J. Food Sci.*, **83**, 1299-1310, 2018.
23. Din M.I., Arshad F., Hussain Z., and Mukhtar M., Green Adequacy in the Synthesis and Stabilization of Copper Nanoparticles: Catalytic, Antibacterial, Cytotoxicity, and Antioxidant Activities, *Nanoscale Res. Lett.*, **12**, 1-15, 2017.
24. Katsumiti A., Thorley A.J., Aroštegui I., Reip P., Valsami-Jones E., Tetley T.D., and Cajaraville M.P., Cytotoxicity and Cellular Mechanisms of Toxicity of CuO NPs in Mussel Cells in Vitro and Comparative Sensitivity with Human Cells, *Toxicol. In Vitro*, **48**, 146-158, 2018.

25. Shankar S., Wang L.F., and Rhim J.-W., Preparation and Properties of Carbohydrate-Based Composite Films Incorporated with CuO Nanoparticles, *Carbohydr. Polym.*, **169**, 264-271, 2017.
26. Duncan T.V., Applications of Nanotechnology in Food Packaging and Food Safety: Barrier Materials, Antimicrobials and Sensors, *J. Colloid Interface Sci.*, **363**, 1-24, 2011.
27. Yun'an Qing L.C., Li R., Liu G., Zhang Y., Tang X., Wang J., and Qin Y., Potential Antibacterial Mechanism of Silver Nanoparticles and the Optimization of Orthopedic Implants by Advanced Modification Technologies, *Int. J. Nanomed.*, **13**, 3311-3327, 2018.
28. Long Y.-M., Hu L.G., Yan X.-T., Zhao X.C., Zhou Q.-F., Cai Y., and Jiang G.-B., Surface Ligand Controls Silver Ion Release of Nanosilver and Its Antibacterial Activity Against Escherichia Coli., *Int. J. Nanomed.*, **12**, 3193-3206, 2017.
29. Carrola J., Baštos V., Jarak I., Oliveira-Silva R., Malheiro E., Daniel-da-Silva A.L., and Duarte I.F., Metabolomics of Silver Nanoparticles Toxicity in HaCaT Cells: Structure-Activity Relationships and Role of Ionic Silver and Oxidative Stress. *Curr. Nanotoxic. Prev.*, **10**, 1105-1117, 2016.
30. Jiang X., Lu C., Tang M., Yang Z., Jia W., Ma Y., and Wang H., Nanotoxicity of Silver Nanoparticles on HEK293T Cells: A Combined Study Using Biomechanical and Biological Techniques, *ACS Omega*, **3**, 6770-6778, 2018.
31. Kim M.J. and Shin S., Toxic Effects of Silver Nanoparticles and Nanowires on Erythrocyte Rheology, *Food Chem. Toxicol.*, **67**, 80-86, 2014.
32. Wu Z., Huang X., Li Y.C., Xiao H., and Wang X., Novel Chitosan Films with Laponite Immobilized Ag Nanoparticles for Active Food Packaging, *Carbohydr. Polym.*, **199**, 210-218, 2018.
33. Tran C.D., Prosenc F., and Franko M., Facile Synthesis, Structure, Biocompatibility and Antimicrobial Property of Gold Nanoparticle Composites from Cellulose and Keratin, *J. Colloid Interface Sci.*, **510**, 237-245, 2018.
34. Roy S., Shankar S., and Rhim J.-W., Melanin-Mediated Synthesis of Silver Nanoparticle and its Use for the Preparation of Carrageenan-Based Antibacterial Films, *Food Hydrocoll.*, **88**, 237-246, 2019.
35. Abreu A.S., Oliveira M., de Sá A., Rodrigues R.M., Cerqueira M.A., Vicente A.A., and Machado A., Antimicrobial Nanostructured Starch based Films for Packaging, *Carbohydr. Polym.*, **129**, 127-134, 2015.
36. Sarwar M.S., Niazi M.B.K., Jahan Z., Ahmad T., and Hussain A., Preparation and Characterization of PVA/Nanocellulose/Ag Nanocomposite Films for Antimicrobial Food Packaging, *Carbohydr. Polym.*, **184**, 453-464, 2018.
37. Jamróz E., Kopel P., Juszczak L., Kawecka A., Bytesnikova Z., Milosavljevic V., and Makarewicz M., Development of Furcellaran-Gelatin Films with Se-AgNPs as an Active Packaging System for Extension of Mini Kiwi Shelf Life, *Food Packag. Shelf Life*, **21**, 100339, 2019.
38. Arfat Y.A., Ahmed J., Hiremath N., Auras R., and Joseph A., Thermo-mechanical, Rheological, Structural, and Antimicrobial Properties of Bionanocomposite Films Based on Fish Skin Gelatin and Silver-Copper Nanoparticles, *Food Hydrocoll.*, **62**, 191-202, 2017.