نشریه علمی «علوم و فنون بسته بندی»
سال دوازدهم، شماره ۴۸، زمستان ۱۴۰۰؛ ص ۵۳-۳۵

علمی – مروری

مروری بر کاربرد نانوکامپوزیت‌های فعال در افزایش طول عمر مواد غذایی

محمدیار حسینی[1*]، سارا خدری[2]، حامد حسن‌زاده[3]، بابک قنبرزاده[4]

۱- استادیار گروه علوم و مهندسی صنایع غذایی دانشگاه ایلام، ایلام، ایران ۲-دانش آموخته کارشناسی ارشد کنترل کیفی مواد غذایی دانشگاه علوم پزشکی کرمانشاه، کرمانشاه، ایران ۳- استادیار گروه علوم و مهندسی صنایع غذایی دانشگاه ایلام، ایلام، ایران ۴- استاد گروه علوم و مهندسی صنایع غذایی دانشگاه تبریز، ایران

(دریافت:۱۴۰۰/۱۰/۰۷ ، پذیرش: ۱۴۰۱/۰۳/۰۳)

چکیده

نانوکامپوزیت‌های موجود در بسته‌بندی‌های فعال در مقایسه با بسته‌بندی‌های معمولی که تنها به‌عنوان یک مانع در جهت محافظت از مواد غذایی در برابر محیط بیرونی طراحی شده‌اند، دارای عملکرد و فواید بیشتری هستند. هنگام استفاده از این بسته‌بندی‌ها باید به جنبه‌های سلامت غذا نیز توجه شود و میزان مهاجرت نانوذرات به سطوح مواد خوراکی تحت کنترل قرار گیرد؛ زیرا امکان بلعیدن این ذرات به همراه مواد غذایی وجود دارد. همچنین علاوه‌بر ایجاد مشکلات پوستی، به دلیل قابلیت رها شدن در محیط، می‌تواند منجر به بروز مشکلات تنفسی نیز شود. اغلب سیستم‌های فعال بسته‌بندی شامل ترکیبات ضدمیکروبی هستند که هم‌زمان با رشد و تکثیر میکروارگانیسم‌ها، در سطح ماده‌ی غذایی آزاد و موجب بازداری از رشد آن‌ها و جلوگیری از فساد مواد غذایی می‌شوند که شدت این اثر به ماهیت ماده‌ی ضدمیکروبی بستگی دارد. در این میان سیستم‌های فعال نانوکامپوزیتی، شامل عوامل ضدمیکروبی در مقیاس نانو است که به دلیل افزایش نسبت سطح به حجم، قادر است سطح درگیر در واکنش میان ماده‌ی غذایی و اجزای ضدمیکروبی را گسترش دهد و به‌نحو کارآمدتری در مقایسه با ترکیبات همانند خود در جهت افزایش عمر مفید مواد غذایی ایفای نقش نماید.

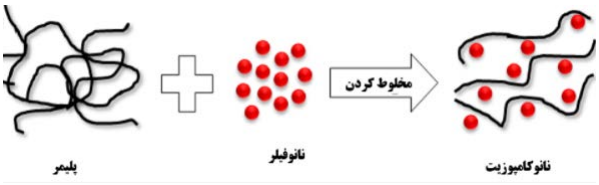
واژگان کلیدی: بسته‌بندی فعال، نانوکامپوزیت، خاصیت ضدمیکروبی نانوذرات

[*]نویسنده مسئول: m.hosseini@ilam.ac.ir

۱- مقدمه

امروزه آماده‌سازی آسان محصولات غذایی تازه برای جهانی شدن تجارت مواد غذایی، حمل‌ونقل و ذخیره‌سازی با حداقل پردازش از چالش‌های عمده برای حفظ ایمنی و کیفیت مواد غذایی است. آلودگی‌های میکروبی کیفیت و ماندگاری مواد غذایی را کاهش می‌دهد و همچنین برخی از میکروب‌ها بیماری‌زا هستند و موجب ایجاد مسمومیت‌های غذایی و بیماری‌های دیگر می‌گردند. از طرفی، برای حفظ کیفیت غذاهای تازه، امکان استفاده از برخی روش‌های رایج نگهداری مانند استریلیزاسیون و خشک کردن وجود ندارد. بسته‌بندی‌های ضدمیکروبی روش مناسبی برای غلبه بر این مشکلات است. بیشتر سیستم‌های فعال بسته‌بندی مواد غذایی شامل عوامل ضدمیکروبی است که به‌تدریج آن را در سطح ماده‌ی غذایی آزاد می‌کند و به این ترتیب، مانع از رشد میکروب و درنتیجه فساد ماده‌ی غذایی می‌شود. سیستم‌های فعال بسته‌بندی مواد غذایی، نقش دیگری غیر از مانع بی‌اثر در برابر شرایط خارجی را دارد. این بسته‌بندی‌های فعال، علاوه بر داشتن خواص بسته‌بندی‌های رایج نظیر بازدارندگی در برابر گازها، بخار آب و تنش‌های مکانیکی، به علت داشتن مواد فعال، موجب افزایش کیفیت و ایمنی مواد غذایی نیز می‌شود. در این نوع بسته بندی‌ها، انتشار مواد زیست‌فعال (مانند مواد ضدمیکروبی و آنتی‌اکسیدان‌ها) از ماتریس پلیمری به سطح ماده‌ی غذایی به صورت آهسته و در زمان طولانی انجام می‌شود؛ درنتیجه برای مدت طولانی غلظت بالایی از ماده‌ی زیست‌فعال در سطح فرآورده وجود خواهد داشت [۱و۲]. افزودن مستقیم داروهای ضدمیکروبی به‌دلیل شسته شدن در ماتریس غذا و واکنش متقابل با سایر مواد غذایی اجزایی، ممکن است منجر به از دست دادن عملکرد مطلوب شود. بنابراین، استفاده از فیلم‌های بسته‌بندی حاوی عوامل ضدمیکروبی با کنترل مهاجرت ترکیب ضدمیکروبی و آزادسازی تدریجی در سطح ماده‌ی غذایی، علاوه بر اینکه اجازه‌ی مهار اولیه‌ی میکروارگانیسم‌های نامطلوب را می‌دهد، با حفظ عملکرد در طول زمان، هنگام حمل‌ونقل و ذخیره‌ی مواد غذایی می‌تواند در این زمینه کارآمدتر باشد. اخیراً، مطالعات گسترده‌ای برای توسعه‌ی تکنیک‌های پردازش غیرحرارتی به‌منظور حفظ شادابی غذا همراه با افزایش ماندگاری آن انجام شده است. اگرچه برخی از این فناوری‌ها قادر به ضدعفونی کردن مواد غذایی هستند، اما انرژی زیادی مصرف می‌کنند و به تجهیزات پرهزینه نیاز دارند. ازاین‌رو با استفاده از تکنولوژی بسته‌بندی مناسب و با مصرف هزینه‌ی کمتر می‌توان تلفات غذایی را به حداقل رساند. بسته‌بندی فعال و ضدمیکروبی مواد غذایی با فناوری نانو تأثیر عمده‌ای در حفظ و نگهداری مواد غذایی دارد [۳]. تحقیقات در مورد استفاده از نانوکامپوزیت‌ها برای بسته‌بندی مواد غذایی از دهه‌ی ۱۹۹۰ آغاز شد. این ترکیبات با قابلیت ایجاد برهمکنش با سایر مواد و ظهور خواص آنتی‌اکسیدانی و ضدمیکروبی خود، بسیار در صنعت مورد توجه قرار گرفته‌اند. پیش‌بینی شده است در آینده‌ی نزدیک بسته‌بندی‌های نانوکامپوزیت بخش قابل توجهی از بسته‌بندی مواد غذایی را در بازارهای جهانی تشکیل می‌دهند. لازم به ذکر است مواد مرکب یا کامپوزیت به ترکیبی از مواد مختلف و متفاوت در شکل و ساختار گفته می‌شود که اجزای تشکیل‌دهنده‌ی هویت خود را حفظ می‌کنند و با هم ترکیب نمی‌شوند. نانوکامپوزیت به دسته‌ای از کامپوزیت‌ها اطلاق می‌شود که حداقل یکی از اجزای آن‌ها در مقیاس نانو باشد. در واقع نانوکامپوزیت یک سیستم چند فازه از مواد جامد است که در آن پلیمرها به‌عنوان فاز پیوسته و مواد با ساختار نانو به‌عنوان فاز پراکنده قرار گرفته‌اند [۴]. دسته‌بندی نانوکامپوزیت‌ها بر اساس طبیعی یا مصنوعی بودن و همچنین نوع زمینه (فلز، پلیمر یا سرامیک) صورت می‌گیرد. نانوکامپوزیت‌های فلزی، نسل جدیدی از بسته‌بندی مواد غذایی هستند که عمدتاً با ترکیب نانوذرات فلز در فیلم و پوشش‌های بیوپلیمری ساخته می‌شوند. سیستم‌های نانوکامپوزیت شامل عوامل ضدمیکروبی در مقیاس نانو است که به‌عنوان عوامل بازدارنده یا مهارکننده‌ی رشد میکروبی مورد بررسی قرار می‌گیرد، به این صورت که با گسترش فاز کمون (دوره‌ی رشد نکزدن میکروارگانیسم‌ها در منحنی رشد آن‌ها)، سرعت رشد میکروارگانیسم‌ها را کاهش می‌دهد و بنابراین باعث افزایش عمر مفید و حفظ کیفیت و ایمنی مواد غذایی تازه می‌شود. به دلیل افزایش نسبت سطح به حجم در ابعاد نانو، این سیستم‌ها قادر به غیر فعال کردن سلول‌های میکروبی بیشتری در مقایسه با مواد همانند خود است [۵]. نانوی مواد فلز و اکسید فلز که معمولاً به‌عنوان یک ماده‌ی ضدمیکروبی استفاده می‌شود شامل نقره، طلا، اکسید روی، دی‌اکسیدتیتانیوم و اکسیدهای‌آهن در طیفی گسترده از پلیمرها مانند پلی‌اتیلن، ژلاتین، کیتوزان، پلی‌وینیل کلراید و نشاسته است [۶]. این پلیمرها اساس تشکیل فیلم و پوشش‌های خوراکی و سنتزی است که فیلم‌های خوراکی به دلیل زیست تخریب‌پذیری و داشتن ویژگی‌های بارز، نسبت به پوشش‌های سنتزی ارجحیت دارند. پلیمرهای اصلی تشکیل دهنده‌ی فیلم‌ها و پوشش‌های خوراکی شامل پروتئین‌ها، چربی‌ها و پلی‌ساکاریدها هستند، این مواد به‌تنهایی یا در ترکیب با هم به کار می‌روند. فیلم‌ها و پوشش‌های خوراکی به‌صورت لایه‌های نازکی از مواد خوراکی بر روی سطح مواد غذایی یا میان ترکیبات آن‌ها قرار می‌گیرند و به‌عنوان یکی از راه‌های اساسی کنترل تغییرات فیزیولوژیکی، میکروبی و فیزیکوشیمیایی در مواد غذایی مطرح هستند و قادرند با جلوگیری از مهاجرت رطوبت و انتشار

گازهای دخیل در فساد ماده‌ی غذایی نظیر اکسیژن یا دی اکسیدکربن از محصول غذایی، محافظت کنند. آن‌ها همچنین می توانند باعث بهبود کیفیت و ظاهر محصول غذایی با جلوگیری از مهاجرت طعم و آروما شوند. به‌علاوه به‌عنوان حاملان مواد ضدمیکروبی، آنتی‌اکسیدان‌ها، مواد مغذی، رنگ، مواد دارویی و ادویه‌جات عمل کنند و به‌عنوان سیستم‌های فعال بسته‌بندی به کار روند [۷]. از آنجایی که پلیمرهای خوراکی نسبت به پلیمرهای سنتزی دارای استحکام کمتر و خواص مکانیکی ضعیف تری هستند و در رطوبت‌های کم دچار شکنندگی می‌شوند، استفاده از نانوکامپوزیت‌ها، یعنی پراکندگی ذرات نانو در ماتریس آن‌ها، منجر به استحکام بخشیدن و تقویت شبکه‌ی این بیوپلیمرها می‌شود [۸]. این مقاله مروری است بر نانوذرات ضدمیکروبی که با سیستم‌های فعال بسته‌بندی مواد غذایی سازگارند. نانوذرات کیتوزان، نانوکامپوزیت‌های فعال حاوی نانوذرات سلولز، نانوکامپوزیت‌های فعال با نانوذرات رس، نانوکامپوزیت‌های فعال با نانوذرات نقره، نانوکامپوزیت‌های فعال با نانوذرات مس و نانوکامپوزیت‌های فعال با نانوذرات اکسید فلزی انواع نانوکامپوزیت‌های مورد استفاده در صنعت بسته‌بندی هستند که به ترتیب با زمینه‌های پلیمری، فلزی و اکسیدها مورد بحث قرار خواهند گرفت.



شکل (۱): ساختار نانوکامپوزیت

۲- کاربرد نانوکامپوزیت‌های کیتوزان در بسته‌بندی و افزایش طول عمر مواد غذایی

نانوذرات کیتوزان نسبت به کیتوزان به دلیل فراهم کردن سطوح واکنش‌پذیری بیشتر با سلول‌های باکتری دارای اثرات ضد میکروبی گسترده‌تری هستند که مکانیسم آن ایجاد فعل و انفعالات کاتیونی کیتوزان با غشای سلولی آنیونی است که منجر به افزایش نفوذپذیری غشا و پارگی و نشت مواد سلول به بیرون و در نهایت مرگ سلول می‌شود [۹].

جعفری کلیجی و همکاران (۱۳۹۶)، اثرات ضدمیکروبی و آنتی‌اکسیدانی پوشش نانوکامپوزیت کیتوزان و عصاره‌ی رزماری را بر روی فیله‌ی فیل‌ماهی که با لیستریا مونوسیتوژنز تلقیح و در دمای یخچال نگهداری شد، مطالعه نمودند. فیله‌ها به ۴ گروه دسته‌بندی شدند و در پوشش‌های حاوی ۰/۵درصد رزماری، ۱ درصد کیتوزان، فیله‌ی بدون پوشش به‌عنوان شاهد و ترکیب ۱درصد کیتوزان و ۰/۵ درصد رزماری به‌عنوان تیمار نانوکامپوزیت قرار گرفتند. سپس تمامی نمونه‌ها با *Listeria monocytogenes* تلقیح شدند. پارامترهای شیمیایی شامل عدد پراکسید، بازهای نیتروژنی فعال، pH، تیوباربیتوریک اسید و نیز ویژگی‌های ضدمیکروبی نمونه‌ها در طی مدت زمان ۱۶ روز در دمای ۴ درجه‌ی سانتی‌گراد ارزیابی شدند. نتایج نشان داد که بسته‌های حاوی نانوکامپوزیت کیتوزان قادرند به طور معنی‌داری رشد لستریا را نسبت به نمونه‌ی شاهد کاهش دهند و پس از آن به ترتیب تیمارهای کیتوزان ۱درصد و عصاره‌ی رزماری ۰/۵درصد نیز این قابلیت را نشان دادند. به‌علاوه پوشش نانوکامپوزیت علاوه بر داشتن پایین‌ترین میزان pH در ماهی و بازهای نیتروژنی فرار، توانست اکسیداسیون لیپید را با کاهش تیوباربیتوریک اسید و عدد پراکسید در نمونه‌ها در مقایسه با تیمار شاهد به تعویق بیندازد [۱۰]. زارعی و همکاران (۱۳۹۸)، به تهیه‌ی پوشش‌های زیست تخریب‌پذیر ضدمیکروبی نانو کامپوزیت بر پایه‌ی نشاسته پرداختند و قابلیت آن‌ها را برای بسته‌بندی نان ارزیابی نمودند. فیلم‌ها به روش ریخته‌گری محلول تهیه شدند و از آلوئه‌ورا در سه سطح (۰، ۱۰ و ۲۰ درصد) و نانوذرات کیتوزان در سه سطح (۰/۵، ۲/۵ و ۵ درصد) به‌عنوان عوامل تقویت‌کننده و ضدمیکروبی استفاده کردند. سپس ویژگی های مورفولوژیکی، مکانیکی، نفوذپذیری به بخار آب، شفافیت و خاصیت ضدمیکروبی بر روی باکتری‌های گرم مثبت و گرم منفی در فیلم‌های تولید شده مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آزمون‌های مکانیکی نشان داد که نانوذرات کیتوزان منجر به افزایش مقاوت به کشش فیلم و صمغ آلوئه‌ورا موجب کاهش استحکام کششی در فیلم نانوکامپوزیتی گردیدند. درحالی‌که در فیلم‌های محتوی هر دو عامل با برهمکنش نانوکیتوزان و آلوئه‌ورا میزان استحکام کششی و ازدیاد طول نسبت به نمونه‌ی شاهد افزایش یافت. همچنین این برهمکنش منجر به بهبود نفوذپذیری فیلم‌های نانوکامپوزیت و کاهش شفافیت آن‌ها نسبت به بیوپلیمر شاهد شد که این کاهش از طریق آلوئه‌ورا بیشتر از کیتوزان بود. نتایج آنالیز SEM[1]، ساختاری همگن و نیمه‌کروی با پخش یکنواخت و بدون تجمع نانوذرات کیتوزان را در ماتریس پلیمر نشان داد. به‌علاوه، خواص ضدمیکروبی فیلم‌های تولیدشده بر روی دو پاتوژن مواد غذایی شامل استافیلوکوکوس اورئوس و اشریشیا کلای مورد

[1] Scanning Electron Microscope

مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان داد که با افزایش غلظت نانوذرات کیتوزان و آلوئه‌ورا، خواص ضدمیکروبی فیلم‌های تولیدشده بهطور معناداری نسبت به نمونه‌ی شاهد افزایش یافت. همچنین قطر هاله‌ی تشکیل‌شده در فیلم‌های حاوی نانوکیتوزان بیشتر از فیلم های حاوی آلوئه‌ورا بود. بر اساس این پژوهش فیلم‌های نانوکامپوزیت حاوی ۲۰ درصد آلوئه‌ورا و ۵ درصد نانوکیتوزان، بیشترین خاصیت ضد باکتریایی را از خود نشان داد؛ بنابراین به‌عنوان تیمار بهینه معرفی شدند [۱۱].

۳- کاربرد نانوکامپوزیت‌های فعال حاوی نانو ذرات سلولز در بسته‌بندی و افزایش طول عمر مواد غذایی

سلولز به دلیل طبیعت آب‌دوستی که دارد مانع خوبی در برابر عبور روغن‌ها به شمار می‌رود. نانوکریستال‌های سلولزی به‌طور وسیع جهت بهبود ویژگی‌های بیوپلیمرها کاربرد دارند. نانوفیبرهای سلولزی به دلیل قدرت کریستالی بالا، تجدیدپذیری و خصوصیات کشش‌پذیری خوب، همچنین به دلیل داشتن سطح ویژه‌ی زیاد و چگالی کم به‌عنوان تقویت‌کننده ماتریس پلیمری مورد توجه زیادی قرار گرفته‌اند. نانوذرات سلولز در مقایسه با سایر نانوپرکن‌هایی که قابلیت بهبود خواص پوشش‌ها را دارند، از قیمت پایین و زیست تخریب‌پذیری بالایی برخوردارند. در کاربردهای خوراکی، سلولز باکتریایی دارای ظرفیت نگهداری آب بالا و بافت نرم یکنواخت و نیز میزان فیبر زیادی است که به‌عنوان یک غلیظ‌کننده و پایدارکننده مناسب، قابلیت مصرف به‌عنوان یک تقویت‌کننده در ساخت ژل‌های کامپوزیتی خوراکی و بسیاری از فرآیندهای مواد غذایی را دارد و به علت در دسترس بودن، به سلولز گیاهی ترجیح داده می‌شود [۱۲].

رنجبریان و همکاران (۱۳۹۵)، تأثیر پوشش کازئینات‌سدیم حاوی نانوفیبر سلولز و اسانس دارچین را در حفظ کیفیت فیله‌ی سینه‌ی مرغ طی نگهداری در یخچال به مدت ۱۲ روز گزارش کردند. فیله‌ها با محلول کازئینات‌سدیم با ۵ درصد اسانس دارچین و ۲/۵ و ۵ درصد نانوفیبر سلولز پوشانده و در یخچال نگهداری شدند. آزمون‌های شیمیایی و میکروبی و ارزیابی حسی، در مدت ۴ تا ۱۲ روز بر روی آن‌ها انجام شد. پوشش‌ها شامل کازئینات سدیم خالص، کازئینات سدیم همراه با اسانس دارچین، و کازئینات سدیم همراه با اسانس دارچین و نانوذرات سلولز بودند. نتایج نشان داد که فیلم کازئینات سدیم خالص نقش چندانی در ماندگاری فیله‌ی مرغ ندارد و تنها قادر است مانع نفوذ هوا و اکسیداسیون شود. درحالی‌که تأثیر ضدمیکروبی بر روی محصول ندارد. پس از ۴ روز نگهداری نمونه‌ها در یخچال مشاهده شد که به جز نمونه‌ی شاهد (کازئینات سدیم خالص)، سایر نمونه‌ها قابلیت مصرف را دارند و در روز هشتم به‌جز نمونه‌های بسته‌بندی شده با نانوکامپوزیت و اسانس، سایر نمونه‌ها قابلیت مصرف را نداشتند که بیانگر قدرت بالای نگهداری در فیلم‌های نانوکامپوزیت است. زیرا علاوه بر اینکه فیلم نانوکامپوزیت باعث کاهش خواص ضدمیکروبی و اثرات آنتی‌اکسیدانی اسانس نشده، بلکه با کنترل رهایش اسانس نقش بسزایی در ماندگاری محصول داشته است. میزان بار میکروبی نمونه‌های بسته‌بندی شده با فیلم نانوکامپوزیتی و اسانس دارچین، به مدت ۱۲ روز قابلیت مصرف برای انسان را داشتند؛ درحالی‌که بار میکروبی در سایر نمونه‌ها شامل نمونه‌ی شاهد و نمونه‌های بسته‌بندی شده با کازئینات سدیم و اسانس دارچین بیشتر از حد مجاز بود، به‌طوری‌که بیشترین بارمیکروبی در نمونه‌های شاهد و کمترین میزان در بسته‌های شامل ۲/۵ درصد نانوفیبر سلولز به همراه اسانس دارچین مشاهده شد [۱۳]. در یک مطالعه، محققان تأثیر خواص ضدمیکروبی نانوکامپوزیت کیتوزان- نانوسلولز را بر روی ماندگاری گوشت چرخ‌کرده گزارش نمودند. نتایج پژوهش نشان داد که نانوکامپوزیت‌های کیتوزان ـ نانوسلولز که ترکیبی با ثبات حرارتی بالا هستند قادرند به میزان سطح تماس خود نسبت به باکتری های گرم مثبت و گرم منفی، از جمله اشریشیاکلی، سالمونلا انتریتیدیس و استافیلوکوکوس آئوروس خاصیت کشندگی نشان دهند، همچنین خاصیت ضدمیکربی نانوکامپوزیت‌ها مستقل از غلظت کیتوزان و نانوسلولز مصرفی برای تهیه‌ی پوشش‌ها بود. علاوه‌براین نانوکامپوزیت‌ها با اثرگذاری بر روی گوشت چرخ‌کرده توانستند جمعیت باکتری‌های اسیدلاکتیک محصول را نسبت به نمونه‌ی شاهد (نایلون) کاهش دهند که این میزان در دمای یخچال تا ۱/۳سیکل لگاریتمی و در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد تا ۳ سیکل لگاریتمی بود. کمترین تأثیر بازدارندگی نانوکامپوزیت در مقایسه با نمونه‌ی شاهد مربوط به گوشت نگهداری‌شده به مدت ۲ روز در دمای ۲۵ درجه‌ی سانتی گراد و بیشترین تأثیر بازدارندگی در مقایسه با نمونه‌ی کنترل، متعلق به گوشت‌های نگهداری‌شده طی مدت زمان ۴ تا ۶ روز در همان دما بود. به‌علاوه بر اساس نتایج آزمون pH، نانوکامپوزیت توانست pH گوشت را در مقایسه با نمونه‌ی شاهد در حد پایین‌تری حفظ کند. بنابراین برای بسته‌بندی محصولات گوشتی که ماندگاری کم و فسادپذیری بالایی دارد مناسب است [۱۴]. حشمدار راوی و همکاران (۱۳۹۵)، با افزودن مخلوط سه ماده‌ی نانوذرات نشاسته، نانوذرات سلولز و عصاره‌ی سیر به پلیمر پلی اتیلن به تهیه‌ی بیوفیلم نانوکامپوزیت پرداختند. در این پژوهش، خاصیت ضدمیکروبی نمونه‌ها بر روی طول مدت زمان ماندگاری شیر آلوده به‌مدت ۵ هفته بررسی شد. نتایج نشان داد که

فیلم‌های تهیه شده در برابر اشریشیاکلی بالاترین خاصیت ضدمیکروبی را داشتند. همچنین اثر ضدمیکروبی بسته‌بندی نانوکامپوزیت برروی شیر آلوده به‌طور معناداری نسبت به نمونه‌ی کنترل که حاوی هیچ‌گونه بیوفیلمی نبود، بالاتر بود. به‌طوری‌که هم باکتری‌های گرم منفی و هم باکتری‌های گرم مثبت و هم کپک و مخمرها نسبت به خاصیت ضدمیکروبی نانوکامپوزیت حساس بودند و در حضور آن قادر به رشد نبودند. این نتیجه در ۳ هفته بهترین کارایی را داشت و پس از آن از تأثیرش کاسته شد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که تا ۳ هفته از گذشت زمان نگهداری بیوفیلم سنتزشده تقریباً همه‌ی مواد ضدمیکروب خود را آزاد کرده، بنابراین بار میکروبی محصول تقریباً صفر شده است و پس از آن مجدداً بار میکروبی شروع به افزایش نمود [۱۵]. بر اساس یافته‌های شاویسی و همکاران (۲۰۱۷)، مبنی بر افزایش طول عمر گوشت چرخ‌کرده‌ی گاو از طریق فیلم‌های نانوکامپوزیت تولید شده بر اساس پلی‌لاکتیک اسید (PLA)، نانوسلولز به همراه عصاره‌ی اتانولی بره موم و نوعی اسانس، مشاهده شد که نانوکامپوزیت‌های تشکیل‌شده قادرند گوشت‌های چرخ‌شده را به مدت ۱۱ روز بدون هیچ‌گونه تغییرات نامطلوب در ویژگی‌های ارگانولیپتیکی حفظ نمایند. فیلم‌ها با غلظت‌های متفاوت از این ترکیبات تهیه شدند، سپس پژوهشگران گوشت‌ها را درون پوشش‌های تولید شده به مدت ۱۱ روز در دمای یخچال نگهداری نمودند. نتایج نشان داد که با گذشت زمان، اندیس پراکسید تیمارها نسبت به نمونه‌ی شاهد (بدون پوشش) افزایش کمتری داشتند. افت رنگ و بدطعمی نیز به مرور زمان در تمامی نمونه‌ها مشاهده شد که این میزان پس از پایان دوره نگهداری، در بعضی از تیمارها تفاوت کمی نسبت به روزهای اولیه داشت. بهینه‌ی این ویژگی‌ها پس از مدت ۱۱ روز در تیمار ۱درصد نانوسلولز، ۲ درصد اسانس و ۲ درصد عصاره مشاهده شد. نتایج میکروبی نیز بر روی میزان میکروارگانیسم‌های انتروباکتر، سایروتروف و سودوموناس نشان داد که بار میکروبی در تمامی نمونه‌های تیمارشده نسبت به نمونه‌ی شاهد به‌طور معناداری کاهش یافت که بهینه‌ی حالت آن متعلق به تیمار ۱درصد نانوسلولز، ۲ درصد اسانس و ۲ درصد عصاره بود [۱۶].

۴- کاربرد نانوکامپوزیت‌های فعال با نانوذرات رس در بسته‌بندی و افزایش طول عمر مواد غذایی

نانوذرات رس در اشکال مختلف به دلیل ثبات بالا، پردازش آسان، در دسترس بودن و هزینه‌ی کم در تولید نانوکامپوزیت‌ها به کار می‌رود. افزایش نانوذرات رس در ساختار پلیمرها موجب کاهش نفوذپذیری نایلون در مقابل گازها و حفاظت از ترکیبات حساس به اکسیژن می‌شود و با خاصیت ضدمیکروبی در افزایش طول عمر مواد غذایی مؤثر است [۱۷].

باریکلو و احمدی (۲۰۱۸) پوشش‌های نانوکامپوزیت مبتنی بر پلی‌اتیلن و نانوذرات رس را به‌منظور افزایش عمر توت‌فرنگی پیشنهاد کردند. خواص فیزیکی شامل تغییرات وزن و رنگ نمونه‌ها، خواص شیمیایی شامل pH و درصد بریکس و خواص مکانیکی نمونه‌ها در طول نگهداری طی ده روز در دو دمای ۴ و ۲۵ درجه‌ی سانتی‌گراد بر روی توت‌فرنگی‌های پوشش داده شده یا بدون پوشش با کیتوزان، در بسته‌های پلی‌اتیلن و پوشش‌های نانوکامپوزیت رس ارزیابی شد. نتایج حاکی از تأثیر معنی‌دار پوشش‌های نانوکامپوزیت بر روی فاکتورهای وزن، درصد بریکس، pH، استحکام و مدول الاستیسیته بود. در این پژوهش، نمونه‌های پوشش داده شده با کیتوزان در فیلم نانوکامپوزیت خاک رس از نظر تغییرات فیزیکی، شیمیایی و مکانیکی بهینه‌ترین حالت را در طول دوره‌ی ذخیره‌سازی داشتند. همچنین میزان تغییرات در دمای ۴ درجه‌ی سانتی‌گراد کمتر بود. نتایج نشان داد که فیلم نانوکامپوزیت دارای توزیع یکنواخت و بدون تجمع نانوذرات در سطح فیلم بود. ویژگی‌های مکانیکی شامل استحکام و مدول الاستیک در تیمارها با گذشت زمان کاهش یافت که میزان تغییرات در فیلم‌های پلی‌اتیلن بیشتر از نانوکامپوزیت‌ها بود. همچنین کمترین تغییرات pH و بریکس در نمونه‌های پوشش داده شده با کیتوزان در بسته‌های نانوکامپوزیت و بیشترین تغییرات مربوط به تیمار بدون پوشش در پوشش پلی‌اتیلن بود. تغییرات وزن و رنگ با گذشت زمان در تمام تیمارها بیشتر شد که کمترین میزان آن مربوط به نمونه‌های پوشش داده شده با کیتوزان در بسته‌های نانوکامپوزیت و بیشترین میزان مربوط به نمونه‌های بدون پوشش در بسته‌های پلی‌اتیلن بود. بنابراین، مشاهده شد که پوشش‌های فیلم نانوکامپوزیت رس قابلیت افزایش طول عمر توت‌فرنگی را داشتند [۱۸]. خزریان و شهبازی (۲۰۱۸) طول مدت زمان نگهداری گوشت چرخ‌کرده‌ی شتر را در بسته‌های نانوکامپوزیت کیتوزان ـ مونت‌موریلونیت و کربوکسی متیل سلولز- مونت‌موریلونیت افزایش دادند. ویژگی‌های نمونه‌ها از قبیل خواص شیمیایی، حسی و میکروبی پس از طی دوره‌ی نگهداری در یخچال مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که در تمام تیمارهای نانوکامپوزیت میزان بارمیکروبی، میزان pH، اندیس‌پراکسید و TVB-N نسبت به شاهد کاهش یافت. همچنین صفات حسی شامل بو، رنگ و پذیرش کلی در نمونه‌های گوشت تیمار شده درون پوشش‌های نانوکامپوزیت به‌طور قابل توجهی بهبود یافت. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که این نانوکامپوزیت‌ها قادرند مدت زمان ماندگاری گوشت شتر را در یخچال افزایش

دهند [۱۹]. از آنجایی‌که سالمونلا تیفی موریوم و اشریشیا کلی مسئول افزایش شیوع بیماری‌های مرتبط با محصولات تازه مانند برگ‌های جوان اسفناج در دو دهه‌ی اخیر بوده‌اند، ایسا و همکاران (۲۰۱۷)، سیستم‌های بسته‌بندی زیست تخریب‌پذیر را جهت بازدارندگی رشد این میکروارگانیسم‌ها در محصولات تهیه نمودند. در این پژوهش فیلم‌های نانوکامپوزیت از ترکیب نشاسته‌ی سیب زمینی شیرین، نانوذرات رس (مونت‌موریلونیت) و اسانس آویشن تهیه شده و ویژگی‌های حسی برگ‌های جوان اسفناج طی دوره‌ی نگهداری ۸روزه در یخچال مورد ارزیابی قرار گرفت. نمونه‌های بسته‌بندی‌شده نسبت به نمونه‌های بدون بسته‌بندی، به دلیل رنگ و ظاهر مطلوب‌تر، از میزان پذیرش بیشتری برخوردار بودند. به‌علاوه این فیلم‌ها نه‌تنها هیچ‌گونه اثر سوئی بر ویژگی‌های حسی برگ‌های اسفناج نداشتند، بلکه میزان پذیرش نانوکامپوزیت‌های محتوی اسانس به‌دلیل رنگ و بوی مطلوب‌تر بیشتر از سایر بسته‌ها بود. نتایج نشان داد که فیلم‌های نانوکامپوزیت زیست تخریب‌پذیر قادرند میزان ماندگاری محصول را نسبت به محصولات بدون پوشش در بازه‌ی زمانی ۸ روز افزایش دهند. نتایج نشان داد که با افزایش زمان نگهداری محصول، اثربخشی فیلم‌های نانوکامپوزیت افزایش یافت. به‌طوری‌که با گذشت زمان، رشد کپک و مخمر و شمارش کلی باکتری‌ها در بسته‌های فعال کاهش یافت. نکته‌ی حائز اهمیت این است که فعالیت ضدباکتریایی فیلم‌ها براساس میزان انتشار عوامل ضدباکتری تعیین می‌شود. چنانچه سرعت انتشار خیلی کند باشد، رشد میکروبی به‌اندازه‌ی کافی مهار نمی‌شود و اگر آزادسازی با سرعت زیاد اتفاق بیفتد، مهار میکروارگانیسم پایدار نخواهد بود و کنترل آزادسازی عوامل ضدمیکروبی در این فیلم‌ها به عهده‌ی نانوذرات رس است [۲۰]. عاطفه بکران و همکاران (۱۳۹۶)، گزارش کردند که پوشش‌های پلی‌اتیلن و پلی‌پروپیلن حاوی نانوسیلیکات رس قادرند ماندگاری انار ملس ساوه را افزایش دهند. در این پژوهش نمونه‌ها به‌منظور بررسی، به مدت ۲ و ۴ ماه در پوشش‌های نانوکامپوزیت در انبار معمولی نگهداری شدند. نتایج نشان داد که پس از ۴ ماه نگهداری، پوشش‌های فعال با نانوذرات، به‌طور معناداری، رطوبت پوست انار را در مقایسه با نمونه‌های شاهد حفظ کردند، به‌طوری‌که تیمار شاهد (پلی‌اتیلن و پلی‌پروپیلن) دارای کمترین ضخامت پوست در نمونه‌ها بود. نتایج نشان داد که پوشش پلی‌پروپیلن حاوی نانوسیلیکات رس باعث حفظ بیشترین محتوی فنل، فلاونویید و آنتوسیانین کل در مقایسه با سایر نمونه‌ها بود. همچنین پوشش‌های حاوی نانوسیلیکات موجب کند شدن تغییرات ویتامین ث و حفظ بیشتر آن شد، ولی بر pH اثر معنی‌داری نداشت. میزان آنتوسیانین آب‌میوه‌ی انار در همه‌ی تیمارها پس از دو ماه کاهش یافت و کمترین مقدار آن در میوه‌های شاهد بعد از ۴ ماه انبارمانی مشاهده شد. بیشترین آلودگی میوه‌ها و همچنین بیشترین میزان کاهش وزن مربوط به نمونه‌ی شاهد بعد از چهار ماه انبارداری بود. درحالی‌که تیمارهای پلی‌اتیلن و پلی‌پروپیلن حاوی نانوسیلیکات رس، کمترین میزان کاهش وزن نمونه را نشان دادند. همچنین فعالیت آنتی‌اکسیدانی در همه‌ی تیمارها با گذشت زمان کاهش یافت که کمترین میزان آن مربوط به نمونه‌ی شاهد پس از ۴ ماه نگهداری بود. بنابر نتایج مستخرج از این پژوهش، مشاهده شد که استفاده از پوشش‌های پلی‌اتیلن و پلی‌پروپیلن حاوی نانوسیلیکات رس، با کاهش ورود اکسیژن و خروج دی‌اکسیدکربن منجر به کاهش تنفس میوه و تأخیر در روند پیری آن شد و با حفظ طراوت و تازگی میوه‌ها و کاهش سرعت مصرف آنتی‌اکسیدان‌ها، تأثیر چشمگیری در حفظ کیفیت و افزایش عمر انباری میوه‌ها به مدت ۴ ماه داشتند [۲۱]. ابراهیمی و همکاران (۱۳۹۶)، به‌منظور افزایش طول عمر هلو پس از برداشت، که به‌علت محتوای آب زیاد و سرعت تنفس بالا عمر انبارمانی کوتاهی دارد، از بسته‌های نانوکامپوزیت رس و پوشش‌های پلی‌اتیلن استفاده کردند. در این پژوهش، میوه‌های هلو به مدت شش هفته در دمای ۲درجه‌ی سانتی‌گراد و رطوبت نسبی ۹۰ درصد نگهداری شدند و پس از این مدت ویژگی‌های کیفیتی آن‌ها مورد بررسی قرار گرفت. به همین منظور درصد کاهش وزن، سفتی میوه، شاخص قهوه‌ای شدن، بار میکروبی و فعالیت آنزیم پلی‌فنل‌اکسیداز به‌طور هفتگی ارزیابی شد. نتایج نشان داد که هر دو نوع پوشش توانستند کیفیت میوه‌ها را بهتر از نمونه‌ی شاهد حفظ کنند. پوشش‌ها موجب تأخیر در روند نرم شدن میوه، تیرگی و قهوه‌ای شدن، همچنین کاهش معنادار در میزان اتلاف وزن و فعالیت آنزیم پلی‌فنل اکسیداز نسبت به شاهد (بدون پوشش) شدند؛ به‌طوری‌که تأثیر پوشش‌های نانوکامپوزیت نسبت به بسته‌های پلی‌اتیلن در حفظ ویژگی‌های کیفی هلو بیشتر بود. با گذشت زمان فعالیت آنزیم و شاخص قهوه‌ای شدن در همه‌ی تیمارها افزایش یافت که در پایان زمان انبارمانی، کمترین میزان فعالیت آنزیم پلی‌فنل اکسیداز و کمترین میزان قهوه‌ای شدن میوه در بسته‌های نانوکامپوزیت مشاهده شد. به علاوه، با افزایش طول نگهداری، میزان تأثیر نانوکامپوزیت در حفظ درخشندگی میوه‌ها بیشتر مشخص شد. علاوه بر این درصد بریکس و pH عصاره‌ی میوه بسته‌بندی‌شده نسبت به نمونه‌ی شاهد، کمتر دچار تغییر شد. بار میکروبی نیز با گذشت زمان در همه‌ی تیمارها افزایش یافت که کمترین میزان آن در پایان هفته ی ششم در بسته‌های نانوکامپوزیت مشاهده شد و بیشترین میزان آن متعلق به بسته‌های پلی‌اتیلن بود که تفاوت معنی‌داری با دو تیمار دیگر داشت. بنابراین نتایج نشان داد که فیلم‌های نانوکامپوزیت رس پوشش‌های مناسبی برای حفظ کیفیت میوه‌ی

هلو در طی ۶ هفته انبارمانی هستند [۲۲]. شریعتمداری و همکاران (۱۳۹۳)، تأثیر پوشش نانوکامپوزیت کیتوزان-کتیرا-نانورس را بر روی میزان نگهداری محصولات شیلاتی گزارش کردند. ویژگی‌های ظاهری فیلم‌ها شامل کدورت، رطوبت و انتقال نور فیلم‌ها مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان داد که نانوکامپوزیت زیست تخریب‌پذیر تهیه‌شده با حفظ رطوبت، شفافیت و جذب نور فرابنفش قادر است از محصولات محافظت نماید [۲۳]. در یک مطالعه از ترکیب کیتوزان و نانورس‌بنتونیت به‌منظور تهیه‌ی فیلم‌های زیست تخریب‌پذیر نانوکامپوزیت و بررسی خواص مکانیکی، نفوذپذیری به بخار آب و ریزساختار آن‌ها استفاده شد. محلول‌های آبی بیوپلیمر کیتوزان با غلظت‌های ۲ و ۳ درصد (وزنی-حجمی) و محلول نانورس بنتونیت با نسبت ۱ و ۳ درصد وزنی بر پایه‌ی کیتوزان به‌طور جداگانه تهیه شدند. سپس به‌منظور تهیه‌ی فیلم‌های نانو کامپوزیت، این دو محلول در دمای ۵۵ درجه‌ی سانتی‌گراد با یکدیگر مخلوط شدند. فیلم‌ها به روش قالب‌گیری تولید شدند. همچنین فیلم‌های شاهد از بیوپلیمرکیتوزان خالص در دو غلظت ۲ و ۳ درصد تهیه شدند. نتایج حاکی از آن بود که غلظت نانورس اثر معناداری بر روی استحکام کششی و میزان نفوذپذیری به بخار آب داشته است. تصاویر حاصل از میکروسکوپ الکترونی روبشی نشان داد که در ترکیب کیتوزان با نانورس، نسبت به کیتوزان خالص ساختمان فیلم به‌صورت کمی ناپیوسته و خلل‌وفرج‌دار شده است که فیلم نانوکامپوزیت محتوی ۱درصد نانورس در مقایسه با فیلم شاهد در هر دو غلظت کیتوزان دارای ساختار یکنواخت‌تری نسبت به فیلم متشکل از ۳ درصد نانورس بود. افزایش ۱ درصد از نانورس به هر دو نسبت کیتوزان منجر به افزایش معنادار استحکام کششی و کاهش درصد کشیدگی تا نقطه‌ی پارگی فیلم‌ها شد. نتایج حاکی از این است که افزایش نانورس منجر به افزایش استحکام کششی نانوکامپوزیت‌ها در مقایسه با فیلم محتوای کیتوزان خالص شد که بیشترین افزایش مربوط به غلظت ۱ درصد نانورس در هر دو نسبت کیتوزان بود. با افزایش بیشتر نانورس به میزان ۳درصد، درصد کشیدگی و نفوذپذیری به بخار آب در فیلم‌ها نسبت به نمونه‌ی شاهد کاهش یافت. کمترین میزان انتقال بخار آب متعلق به فیلم نانوکامپوزیت با ۲درصد کیتوزان و۳درصد نانورس بود. بر اساس یافته‌های این پژوهش، افزودن نانورس به بیوپلیمر کیتوزان، سبب اصلاح خواص مورفولوژیکی، مکانیکی و نفوذپذیری بخار آب در فیلم‌های نانوکامپوزیت شد و از آنجایی که پیوستگی در ساختمان بیوفیلم و بالا بودن استحکام کششی از الزامات اساسی در بسته‌بندی مواد غذایی محسوب می‌شود، می‌توان نتیجه گرفت که فیلم‌های نانوکامپوزیت با غلظت ۱درصد نانورس در هر دو تیمار کیتوزان به دلیل سطح یکنواخت‌تر، برای بسته‌بندی مواد غذایی مناسب هستند [۲۴].

۵- کاربرد نانوکامپوزیت‌های فعال با نانوذرات نقره در بسته‌بندی و افزایش طول عمر مواد غذایی

خاصیت ضد میکروبی بسته‌های محتوی نانوذرات نقره به دلیل انتشار یون‌های نقره به داخل سلول باکتری و کاهشATP مورد نیاز برای همانندسازی کروموزوم، توانایی تقسیم سلولی و تکثیر را از آن گرفته و با حمله به زنجیره‌ی تنفسی باکتری منجر به مرگ سلول می‌شود. همچنین این بسته‌ها قابلیت تخریب غشای سلولی و تولید اکسیژن فعال را دارد. علاوه بر این، نقره در برابر حرارت پایدار و طیف گسترده‌ای از خواص ضدمیکروبی را در برابر باکتری‌های گرم مثبت و گرم منفی، قارچ‌ها و ویروس‌های خاص دارا است [۱و۲۵].

در یک مطالعه، محققان غلظت‌های مختلف نانوذرات نقره را در تهیه‌ی نانوکامپوزیت‌های ترکیبی ژلاتین –کیتوزان مورد استفاده قرار دادند. نتایج نشان داد که افزودن نانوذرات نقره به ماتریس فیلم، منجر به بهبود خواص مکانیکی فیلم‌ها و کاهش انتقال نور در طیف نور مرئی شد. به‌علاوه بررسی شفافیت، الگوی پراش اشعه X و تصاویر میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی SEM، توزیع یکنواخت و همگن اجزا را در تمام فیلم‌های تهیه شده تأیید نمود. مطالعات بیشتر در مورد بسته‌بندی انگور قرمز با مواد پلاستیکی و همچنین فیلم‌های ترکیبی ژلاتین-کیتوزان نشان داد که افزایش نانوذرات نقره در غلظت ۰/۱ گرم در صد گرم فیلم ترکیبی ژلاتین ـ کیتوزان (۰/۱درصد)، قادر است ماندگاری میوه را به مدت دو هفته افزایش دهد [۲۶]. زهرا ربیعی و همکاران (۱۳۹۸)، استفاده از بسته‌های نانوکامپوزیت نقره ـ کیتوزان را به‌منظور ممانعت از رشد باکتری *زانتوموناس پرفورنس* که عامل ایجاد لکه‌ی سیاه در گوجه‌فرنگی است، پیشنهاد کردند. این باکتری با ایجاد لکه‌های سیاه روی گوجه فرنگی منجر به کاهش افت کیفی و کمی آن می‌شود. به‌منظور بررسی فعالیت ضدباکتریایی نانوذرات در شرایط گلخانه، گوجه فرنگی‌ها با محلول نانوذرات نقره، کیتوزان و نانوکامپوزیت نقره ـ کیتوزان در غلظت‌های مختلف محلول‌پاشی شدند. سپس نمونه‌ها به‌مدت یک ماه در دمای ۳۲-۲۸ درجه‌ی سانتی‌گراد و رطوبت نسبی تقریبی ۷۰درصد نگهداری شدند. تصویر نانوکامپوزیت نقره-کیتوزان از طریق میکروسکوپ الکترونی روبشی به شکل کروی مشاهده شد. اثر ضد باکتریایی غلظت‌های مختلف نانوذرات نقره، کیتوزان و نانوکامپوزیت در شرایط آزمایشگاه حاکی از اختلاف معنی‌دار بین تیمارها و نمونه‌ی شاهد بود. مدت زمان مرگ تمام

سلول‌های باکتری در سوسپانسیون‌های حاوی نانوذرات نقره، کیتوزان و نانوکامپوزیت نقره–کیتوزان به ترتیب ۵، ۲۰ و ۲۵ دقیقه بود. شدت بیماری با استفاده از نانوکامپوزیت نقره-کیتوزان در سطح معناداری کاهش یافت. در آزمایشات گلخانه‌ای نیز نانوذرات نقره شدت بیماری لکه‌ی باکتریایی گوجه‌فرنگی را در مقایسه با نمونه‌ی شاهد به‌طور چشمگیری کاهش دادند که بیشترین کاهش مربوط به بالاترین غلظت آن‌ها بود. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که نانوکامپوزیت کیتوزان ـ نقره با خاصیت ضدمیکروبی بر روی باکتری عامل لکه، مدت زمان نگهداری محصول را افزایش دهد [۲۷]. در یک مطالعه محققان از بسته‌بندی نانوکامپوزیت به‌منظور افزایش زمان ماندگاری فیله‌های سینه‌ی مرغ استفاده کردند. این بسته‌ها با غلظت‌های مختلف ۰/۵ و ۱ درصد وزن پلیمر (وزنی وزنی) نانوذرات نقره بر پایه‌ی پلی‌اتیلن کم دانسیته LDPE از طریق اکستروژن تهیه شدند. ویژگی‌های مکانیکی و ضدمیکروبی فیله‌ها در بسته‌های نانوکامپوزیت همراه با اتمسفر اصلاح شده (۴۰ درصد کربن‌دی اکسید و۶۰ درصد نیتروژن) نسبت به نمونه‌ی شاهد (شرایطMAP بدون ذرات نقره) در طی ۱۲ روز مقایسه شد. نتایج حاکی از کاهش معنادار مقاومت کششی و درصد کشیدگی تا پاره شدن فیلم‌های نانو کامپوزیت در مقایسه با نمونه‌ی شاهد بود. مستقل از غلظت نانوذرات مشاهده شد که فیلم‌های نانوکامپوزیت میزان مقاومت به اکسیداسیون و مدت زمان ماندگاری فیله‌های مرغ را به‌طور معناداری نسبت به نمونه‌ی شاهد افزایش دادند. بیشترین اثر ضدمیکروبی در برابر باکتری‌ها مربوط به تیمار نانوکامپوزیت حاوی ۱درصد نانوذرات نقره بود. همچنین pH فیله‌ها با گذشت زمان در همه‌ی بسته‌ها کاهش یافت و با ایجاد محیط اسیدی میکروارگانسیم‌های اصلی فسادگر در فیله‌ها که لاکتو باسیلوس‌ها بودند به میزان بیشتری رشد نمودند. با گذشت زمان در تمامی پوشش‌ها میزان اکسیداسیون چربی افزایش یافت که کمترین میزان آن در تیمار نانوکامپوزیت حاوی ۱درصد نانوذره مشاهده شد. نتایج نشان داد که این نوع از فیلم‌های نانوکامپوزیت پتانسیل استفاده به‌عنوان بسته‌بندی‌های ضدمیکروبی را برای مواد غذایی غیراسیدی مانند فیله‌ی سینه مرغ دارند [۲۸]. محققان مطالعه‌ای در رابطه با بسته‌بندی زرشک با نانوکامپوزیت‌های محتوی نانوذرات نقره در ۳ غلظت مختلف (۲۰۰ppm) نمونه‌ی شماره‌ی ۱، (۱درصد) نمونه‌ی شماره‌ی ۲ و (۲ درصد) نمونه‌ی شماره‌ی ۳ انجام دادند و نتایج حاصل را با بسته‌های پلی‌اتیلن معمولی یکی به‌صورت سلفون، نمونه‌ی شماره ی ۴ و دیگری به شکل قوطی مدور، نمونه‌ی شماره‌ی ۵ مقایسه نمودند. پس از گذشت زمان ۵ ماه و بررسی هفتگی مداوم نمونه‌ها، نتایج حاصل از آزمون‌های میکروبی نشان داد که بـه جـز نمونـه‌ی ۱، کلنـی‌های کپک و همچنین کلنی‌های مشاهده شده از آزمایشات شمارش کلی باکتری‌ها در نمونه‌های ۲ و ۳ کمتر از نمونه‌های ۴ و ۵ بود، به‌طوری‌که بـا گذشـت زمـان، این اختلاف بیشتر شـد. به‌علاوه با افزایش در غلظت نانوذرات، کاهش بیشتری در تعداد کلنی‌ها در بسته‌های نانوکامپوزیت مشاهده شد. همچنین با گذشت زمان، درصد روشنایی و رنگ قرمز زرشک‌ها در نمونه‌های ۲ و ۳ نسبت به نمونه‌های ۴ و ۵ دچار تغییرات کمتری شدند. همچنین، با افزایش غلظت نانوذرات به بسته‌های نانوکامپوزیت، درصد روشنایی و عدد مربوط به رنگ قرمز افزایش یافت. اما در مورد نمونه‌ی ۱ به دلیل غلظت کم نانوذرات، تغییر زیادی در رنـگ ظاهری و نتایج میکروبی نسبت به نمونه‌های ۴ و ۵ گزارش نشد [۲۹]. فهیمی‌نیا و ناصری (۱۳۹۳)، تأثیر بسته‌های نانوکامپوزیت را بر طول نگهداری میوه‌های آلو بیان کردند و نتایج را با بسته‌بندی پلی‌اتیلن معمولی به‌عنوان شاهد مقایسه نمودند. در این پژوهش، بسته‌های نانوکامپوزیتی در چهار شکل مختلف شامل بسته‌های پلی‌اتیلن حاوی نانونقره، پلی‌پروپیلن حاوی نانونقره، پلی‌اتیلن حاوی نانوسیلیکات و پلی‌پروپیلن حاوی نانوسیلیکات تهیه شدند. سپس نمونه‌ها در زمان ۴۵ روز در دمای ۱ درجه‌ی سانتی‌گراد و رطوبت ۹۰درصد نگهداری شدند. پارامترهای کیفی میوه شامل فعالیت آنتی‌اکسیدانی، میزان اسیدآسکوربیک (ویتامین C)، اسیدیته، درصد کاهش وزن میوه، سفتی بافت و میزان پوسیدگی میوه، طی دو دوره ۲۲ و ۴۵روزه اندازه‌گیری شدند. نتایج نشان داد که بسته‌های نانو در مقایسه با ظروف پلی‌اتیلنی معمولی، خواص کیفیتی و طول عمر میوه را به طور معناداری افزایش دادند؛ به‌طوری‌که بیشترین فعالیت آنتی‌اکسیدانی، سفتی بافت، ویتامین ث، اسیدیته و کمترین درصد کاهش وزن میوه و میزان پوسیدگی در بسته‌های نانوکامپوزیتی مشاهده گردید. به‌علاوه مشخص شد که در میان بسته‌بندی‌های نانوکامپوزیت، بسته‌های حاوی نانوذرات نقره در حفظ کیفیت آلو در طول مدت زمان نگهداری، تأثیر بیشتری داشتند؛ زیرا میوه‌های درون ظروف حاوی نانوذرات نقره، مستعد پوسیدگی کمتری نسبت به سایر بسته‌بندی‌ها شدند. به نظر می‌رسد بسته‌های نانو با کاهش ورود اکسیژن و خروج دی اکسیدکربن سرعت رسیدن و پیری را در میوه‌ها به تأخیر می‌اندازند و منجر به حفظ کیفیت و افزایش ماندگاری آن‌ها می‌شوند [۳۰]. محمدی و همکاران (۱۳۹۳)، به مطالعه بر روی تأثیر بسته‌بندی نانوکامپوزیت حاوی نانوذرات نقره بر پایه‌ی دی اکسیدتیتانیوم بر فلور قارچی انواع نان مصرفی پرداختند و نتایج ماندگاری را در طی ۲۸ روز با بسته‌های رایج پلی‌اتیلن معمولی مقایسه کردند. نتایج نشان داد که فیلم‌های نانویی با قابلیت کاهش فلور قارچی در نان، نسبت به بسته‌های پلی‌اتیلنی برای

حفاظت از اقلام مختلف نان مناسب‌تر هستند. ماندگاری نان به دو عامل نوع فیلم و مدت زمان نگهداری وابسته بود؛ به طوری‌که در حضور نانوذرات، فلور میکروبی کاهش یافت و افزایش در مدت زمان نگهداری نان‌ها، باعث افزایش فلور قارچی شد. همچنین بیشترین شمارش فلور قارچی در پوشش پلی‌اتیلن مشاهده شد و افزایش ذرات نانوی نقره تا ۵ درصد، شمارش انواع قارچ را کاهش داد. از آنجایی که در بین غلظت‌های ۳ و ۵درصد نانوذرات نقره در کاهش فلور میکروبی اختلاف معناداری مشاهده نشد، بنابراین در این مطالعه غلظت ۳درصد به‌منظور کاهش هزینه‌ها و غلظت ۵درصد به دلیل اثرگذاری بیشتر، به‌عنوان غلظت پیشنهادی نانوذرات نقره برای ایجاد بسته‌بندی نانوکامپوزیت و به‌منظور افزایش طول عمر نان پیشنهاد شد. به‌علاوه در این پژوهش مشاهده شد که نوع نان نیز در تعیین فلور میکروبی مؤثر است؛ زیرا نان‌های مختلف قادرند شرایط متفاوتی را جهت رشد انواع قارچ فراهم سازند [۳۱]. بدیعی و همکاران (۱۳۹۵)، نانوکامپوزیت‌هایی بر پایه‌ی نشاسته و کیتوزان همراه با نانوذرات نقره در غلظت‌های ۲۵۰ppm و ۵۰۰ppm تولید و برخی خواص از جمله خصوصیات مکانیکی، حلالیت، تورم، تغییرات رنگ و نفوذپذیری نسبت به بخار آب، همچنین خصوصیات ضدمیکروبی فیلم‌های زیست تخریب‌پذیر را با استفاده از ۳ نوع میکروارگانیسم آسپرژیلوس نایجر، کاندیدا آلبیکنس و استافیلوکوکوس آورئوس بررسی و نسبت به نمونه‌های شاهد (کیتوزان خالص و نشاسته‌ی خالص) مقایسه نمودند. نتایج حاکی از بهبود مقاومت کششی نانوکامپوزیت‌ها بود که این ویژگی در رابطه با فیلم‌های کیتوزان معنادار ولی در رابطه با فیلم‌های نشاسته معنادار نبود. همچنین افزایش طول نیز به طور معنی‌داری با افزودن نانوذرات نقره افزایش یافت. نتایج نشان داد که فیلم‌های حاوی نانو ذرات نقره به‌طور معناداری دارای خواص ضدمیکروبی علیه تمامی میکروب‌های مورد آزمایش بودند که این ویژگی با افزایش در میزان نانوذرات افزایش یافت. بنابراین خصوصیات فیلم‌های تولیدی متأثر از مقدار نانوی نقره بود و به استثنای مورد نفوذپذیری به بخار آب، موجب بهبود در سایر خواص فیلم‌های خوراکی شدند. همچنین بیان شد که فیلم‌های ساخته شده از نشاسته‌ی خالص خاصیت ضد میکروبی نداشتند اما در فیلم‌های تولید شده بر پایه‌ی کیتوزان این ویژگی مشاهده شد. نتایج نشان داد که فیلم نشاسته همراه با غلظت ۵۰۰ppm از نانوذره بهترین هاله‌ی عدم رشد را به ترتیب در مورد *Aspergillus niger* و *Candida albicans* داشت و فیلم کیتوزان همراه با غلظت ppm ۵۰۰ از نانوذره به‌ترتیب بهترین هاله‌ی عدم رشد را به‌ترتیب در مورد *Aspergillus niger* و *Staphylococcus aureus* نشان داد. همچنین تصاویر حاصل از میکروسکوپ الکترونی روبشی بیانگر پراکندگی یکنواخت بدون تجمع و انباشتگی نانو ذرات نقره در میان اجزای تشکیل‌دهنده‌ی فیلم بود. درحالی‌که نتایج حاصل از آزمون رنگ‌سنجی مشخص کرد که میزان قرمزی و زردی فیلم‌ها با افزودن نانوذرات نقره افزایش یافت و از میزان روشنایی و سفیدی آن‌ها کاسته شد که این موضوع می‌تواند از مقبولیت و بازارپسندی پوشش تولیدی بکاهد. پژوهشگران اعلام کردند که می‌توان از این بیوفیلم‌های نانوکامپوزیت در جهت بسته‌بندی و افزایش طول عمر انواع گوشت و فراورده‌های گوشتی، نان، میوه و سبزیجات استفاده کرد [۳۲]. فیلم‌های نانوکامپوزیت پلی‌ونیل الکل ـ نقره و پلی‌ونیل‌الکل ـ پلی‌آنیلین ـ نقره به‌منظور بررسی ویژگی‌های مختلف مورد مطالعه قرار گرفتند. تهیه این نانوکامپوزیت‌ها از طریق افزایش پلی‌آنیلین و نانوذرات نقره به محلول پلی‌وینیل الکل صورت گرفت و از میکروسکوپ الکترونی روبشی، تبدیل فوریه مادون قرمز، آنالیز ترموگراویمتری و انرژی پرتوی ایکس به‌منظور بررسی خواص نانو کامپوزیت‌ها استفاده شد. نتایج آنالیز TGA[1] نشان داد که نانوذرات نقره با غلظت ۳ درصد منجر به بهبود پایداری حرارتی نانوکامپوزیت در مقایسه با پلی‌ونیل الکل خالص در دمای بالا شدند. حضور پیک‌های شاخص اجزای تشکیل‌دهنده نانوکامپوزیت در طیف FTIR[2] نشان‌دهنده سازگاری هر سه جز با یکدیگر بود. در تصاویر میکروسکوپ الکترونی نانوکامپوزیت پلی‌آنیلین ـ پلی وینیل الکل ـ نانوذرات نقره در بزرگ‌نمایی‌های مختلف، نانوذرات نقره به‌صورت یکنواخت در تمام منطقه‌ی سطح فیلم پخش شده بود. بررسی خواص مکانیکی نشان داد که افزایش نانوذرات نقره در غلظت‌های ۱، ۳ و ۵ درصد به پلی‌ونیل الکل خالص منجر به تقویت استحکام کششی شد. که غلظت ۳درصد از نانو نقره در حالت بهینه تولید نانوکامپوزیت قرار داشت. همچنین مشخص شد که نانوکامپوزیت پلی‌ونیل الکل ـ پلی‌آنیلین ـ نقره به‌ترتیب با درصدهای وزنی ۸۸ـ۹ـ۳ با داشتن بیشترین استحکام کششی در حالت بهینه‌ی تولید این نانوکامپوزیت‌ها قرار داشت. افزایش درصد وزنی پلی‌آنیلین یا کاهش درصد وزنی پلی‌ونیل الکل منجر به کاهش میزان استحکام کششی شد. همچنین هر دو نوع نانوکامپوزیت‌های ساخته شده دارای اثرات بازدارندگی در مقابل باکتری‌های گرم مثبت و گرم منفی بودند که اثر مهارکنندگی نانوکامپوزیت‌ها روی باکتری‌های اشریشیا کلای نسبت به استافیلوکوکوس اورئوس بیشتر بود [۳۳].

[1] Thermo Gravimetric Analysis
[2] .Fourier Transform Infrared Spectrometer

۶- کاربرد نانوکامپوزیت‌های فعال با نانوذرات مس در بسته‌بندی و افزایش طول عمر مواد غذایی

اثر ضدعفونی‌کننده مس در اندازه‌ی کوچک ذرات نانو که به خوبی در محلول‌های آبی پراکنده می‌شوند افزایش می‌یابد. بر این اساس، یون‌های مس آزاد شده با تحرک بالاتر، راحت‌تر با غشای سلول برخورد کرده و واکنش نشان می‌دهند [۱۷]. ابراهیمی اصل و همکاران (۱۳۹۶)، تأثیر بسته‌بندی‌های نانوکامپوزیتی حاوی ذرات مس را بر روی فلور میکروبی و خواص فیزیکی شیر بررسی و با بسته‌های پلی‌اتیلن معمولی مقایسه نمودند. در این مطالعه پایداری میکروبی شیر، پایداری حرارتی، میزان تغییرات pH، و میزان مقاومت در برابر رطوبت، همچنین میزان مهاجرت نانوذرات طی ۴۵ روز نگهداری شیر بررسی شد. نتایج نشان داد که نانوکامپوزیت تهیه شده به میزان چشمگیری موجب افزایش ماندگاری شیر در طی دوره‌ی نگهداری شد. در این مطالعه شیر موجود در بسته‌های پلی‌اتیلن سبک با ۱۰درصد نانوکامپوزیت مس پس از ۴۱ روز انبارداری کمترین رشد میکروبی را نسبت به سایر بسته‌ها به خود اختصاص داد. در بسته‌های پلی‌اتیلن معمولی پس از ۱۷روز انبارمانی افزایش فلور میکروبی هم‌زمان با افت pH رخ داد و درنتیجه پایداری حرارتی کاهش یافت و منجر به لخته‌شدگی شیر شد. این زمان در نمونه‌های شیر بسته‌بندی شده در نانو کامپوزیت مس، با ترکیب ۵ و ۱۰ درصد به ترتیب به ۳۸ و ۴۱ روز افزایش یافت. اندازه‌گیری میزان مهاجرت نانوذرات مس از فیلم نانوکامپوزیت به شیر نشان داد که پس از گذشت بیش از ۴۵ روز، میزان نانوذرات موجود در شیر بسیار محدود است. به‌علاوه میزان نفوذ این ذرات با افزایش ترکیب نانوذرات مس از ۵ به ۱۰ درصد افزایش می‌یابد [۳۴]. لومات و همکاران (۲۰۱۸)، نانوکامپوزیت مس ـ پلی‌اتیلن LDPE را به‌منظور افزایش طول ماندگاری نوعی محصول لبنی شیرین متعلق به هند پیشنهاد نمودند. در این پژوهش نانوذرات مس در سطوح مختلف ۰/۵ تا ۳ درصد، به پلی‌اتیلن افزوده شد و تأثیر غلظت‌های مختلف آن بر خواص مکانیکی، آنتی‌باکتریال و نفوذپذیری به بخار در فیلم‌ها ارزیابی شد. نتایج نشان داد که تیمار LDPE Cu - توانست میزان جذب طول موج نور UV را نسبت به نمونه‌ی شاهد به‌طور چشمگیری افزایش دهد. میزان نفوذپذیری فیلم‌ها نسبت به بخار آب با افزایش غلظت مس، کاهش یافت. همچنین مقاومت کششی و درصد کشش‌پذیری نیز افزایش یافت که بر طبق شواهد تا ۴۰ درصد بهبود در خواص مکانیکی مشاهده شد. به‌علاوه خاصیت ضدمیکروبی فیلم‌ها در تیمار LDPE -Cu نسبت به شاهد افزایش یافت، به‌طوری‌که با افزایش غلظت مس، قطر هاله ممانعت از رشد باکتری بیشتر شد. بنابراین این مطالعه نشان داد که فیلم‌های نانوکامپوزیت مس ـ پلی‌اتیلن قادر به افزایش مدت ماندگاری مواد غذایی هستند [۳۵].

۷- کاربرد نانوکامپوزیت‌های فعال با نانوذرات اکسید فلزی در بسته‌بندی و افزایش طول عمر مواد غذایی

مزیت مهم اکسیدهای فلزی پایداری بیشتر آن‌ها نسبت به سایر عوامل ضدمیکروبی آلی است. از جمله اکسیدهای فلزی گزارش شده با خاصیت ضدمیکروبی می‌توان به اکسیدروی، اکسیدمنیزیم و دی‌اکسید تیتانیوم اشاره کرد. بافت هدف دی‌اکسید تیتانیوم اغلب غشای میکروارگانیسم است که با افزایش پراکسیداسیون فسفولیپیدهای غشا منجر به نابودی یکپارچگی آن می‌شود. فعالیت اکسیدروی را نیز به تولید انواع اکسیژن واکنش‌پذیر ROS نسبت داده‌اند که مشاهده شد اثرات ضدمیکروبی آن بر روی باکتری‌های گرم مثبت بارزتر از باکتری‌های گرم منفی است [۳۶].

فیلم‌های زیست تخریب‌پذیر ترکیبی نانوکامپوزیت مبتنی بر ژلاتین و کیتوزان به همراه اکسید روی در سطوح (۱، ۲ و۴ درصد) تهیه شده و مطالعه بر روی فعالیت میکروبی آن‌ها در مقابل باکتری‌های گرم منفی و گرم مثبت شامل *Escherichia coli* و *Staphylococcus aureus* انجام شد. نتایج نشان داد که افزایش نانو ذرات منجر به افزایش ضخامت، بهبود پایداری حرارتی و افزایش درصد کشیدگی فیلم‌ها می‌شود. درحالی‌که مقاومت کششی نسبت به نمونه‌ی شاهد کاهش یافت. کمترین میزان TS[1] در فیلم‌های محتوی بیشترین سطح نانو ذره مشاهده شد که به دلیل تشکیل پیوندهای ضعیف هیدروژنی میان پلیمرها و اکسید روی بود. همچنین فیلم‌ها نیمه‌شفاف بود و افزودن نانوذرات تأثیری بر این ویژگی نداشت. پوشش‌های توسعه‌یافته با ۲ و ۴ درصد از نانوذرات اکسید روی سطح صاف و ساختار یکنواخت‌تری را در مقایسه با نمونه‌های شاهد (ترکیب کیتوزان ـ ژلاتین) نشان دادند. نتایج حاکی از آن است که نانوذرات کاملاً به ماتریس پلیمرها چسبیده و منجر به بهبود خواص فیزیکی و بافتی فیلم‌ها شده است. همچنین با افزایش نانوذره به فیلم‌ها قابلیت جذب نور مرئی و UV افزایش یافت که در سطوح بالاتر این ویژگی بیشتر مشاهده شد. در این پژوهش، هدف بهبود ویژگی ضدمیکروبی فیلم از طریق افزودن نانوذرات به کیتوزان بود که مشاهده شد این نانوکامپوزیت از خاصیت ضدمیکروبی خوبی در برابر اشریشیاکلای برخوردار است. بنابراین فیلم

[1] Tensile Strength

نانوکامپوزیت قادر است به‌عنوان یک بسته‌بندی جایگزین پوشش‌های معمولی، منجر به افزایش طول عمر مواد غذایی شود [۳۷]. حیدری مجد و همکاران (۲۰۱۹)، به تهیه‌ی بسته‌بندی‌های فعال مبتنی بر پلی‌لاکتیک اسید PLA شامل ۱/۵درصد (وزنی ـ وزنی) اکسید روی و غلظت‌های مختلف (۰/۵، ۱ و ۱/۵ درصد) از دو نوع اسانس پرداختند. تأثیر فیلم‌های فعال بر ماندگاری فیله‌ی نوعی ماهی به نام *ruber Otolithes* در طی ۱۶روز نگهداری در دمای یخچال ارزیابی شد. ترکیبات شیمیایی شامل TBA[1] و TVB-N[2] و فعالیت ضدمیکروبی فیلم‌ها در مقابل ۵ میکروب پاتوژن متداول از جمله اشریشیاکلی، سالمونلا، سودوموناس، استافیلوکوکوس آورئوس و باسیلوس سرئوس بررسی شدند. نتایج نشان داد که نانوذره‌ی اکسید روی قادر است کارایی بسته‌بندی بر پایه‌ی PLA را ارتقا دهد. فیلم‌های فعال نانوکامپوزیت به‌همراه اسانس‌ها خاصیت ضدمیکروبی و آنتی‌اکسیدانی را به‌طور معناداری نسبت به نمونه‌ی شاهد (PLA خالص) تقویت کردند و مدت زمان ماندگاری فیله‌های ماهی را از ۸ روز به ۱۶روز افزایش دادند. همچنین در این پژوهش، میزان مهاجرت نانوذرات روی زیر حد مجاز استاندارد تعیین شده بود که نشان‌دهنده‌ی ایمنی فیلم کامپوزیت است [۳۸]. غلامی و احمدی (۱۳۹۸)، به‌منظور افزایش مدت نگهداری قارچ‌های سفید دکمه‌ای، به تولید پوشش‌های نانو کامپوزیت بر پایه‌ی کیتوزان، نانواکسید سیلیس با اتمسفر اصلاح‌شده پرداختند. قارچ‌های برداشت شده در دو گروه بدون پوشش و دارای پوشش کیتوزان (به روش غوطه‌وری و به منظور جذب رطوبت قارچ) و در سه نوع مختلف بسته‌بندی (بسته‌بندی معمولی پلی‌اتیلن، بسته‌بندی با استفاده از فیلم پلی‌اتیلن سبک حاوی ذرات نانو اکسید سیلیس و بسته‌بندی با فیلم پلی‌اتیلن سبک حاوی ذرات نانواکسید سیلیس تحت شرایط اتمسفر اصلاح‌شده) قرار گرفتند. بسته‌های نانو حاوی ۸۰ درصد نیتروژن، ۱۰درصد اکسیژن و ۱۰درصد دی اکسیدکربن بودند. تمامی بسته‌ها به دو گروه تقسیم شدند و در دو دمای متفاوت ۴ و ۲۵ درجه‌ی سانتی‌گراد نگهداری شدند. نمونه‌های نگهداری شده در دمای ۲۵ درجه‌ی سانتی‌گراد بعد از ۴ روز به‌طور کامل فاسد شدند. سایر نمونه‌ها در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱۰ روز قرار داده شدند و مطالعات بر روی این گروه صورت گرفت. علاوه‌بر ارزیابی تغییرات گازهای اکسیژن و دی‌اکسیدکربن موجود در بسته‌بندی در طول زمان نگهداری، پارامترهای فیزیکی، شیمیایی و مکانیکی به‌صورت یک روز در میان طی ۱۰ روز محاسبه شدند. نتایج نشان داد که رطوبت در تمامی تیمارها در طول دوره نگهداری روند کاهشی داشته است به‌طوری‌که در پایان دوره‌ی نگهداری بیشترین افت رطوبت در نمونه‌های بدون پوشش نگهداری شده در بسته‌بندی فیلم معمولی بود و کمترین میزان افت رطوبت در نمونه‌های بدون پوشش نگهداری شده در بسته‌های نانو با اتمسفر اصلاح شده مشاهده گردید. همچنین در تمامی بسته‌ها با گذشت زمان و هم‌زمان با تنفس قارچ‌ها از میزان اکسیژن بسته‌ها کاسته شده و بر مقدار دی‌اکسیدکربن افزوده شد که در پایان دوره‌ی نگهداری کمترین مقدار اکسیژن و بیشترین مقدار دی‌اکسیدکربن در بسته بندی‌های نانو در شرایط اتمسفر اصلاح‌شده مشاهده شد. پس از اتمام طول دوره‌ی انبارمانی، بیشترین مقدار مدول الاستیسیته در نمونه‌های نگهداری شده در بسته‌های نانو با اتمسفر اصلاح‌شده و کمترین مقدار آن در نمونه‌های با پوشش کیتوزان بسته‌بندی شده در فیلم معمولی مشاهده شد. به‌علاوه، استفاده از پوشش کیتوزان تأثیر منفی در شاخص روشنایی و قهوه‌ای شدن قارچ سفید که یک فاکتور مهم در بازارپسندی محصول به حساب می‌آید نشان داد. به طوری‌که بیشترین مقدار شاخص روشنایی در نمونه‌های بدون پوشش نگهداری شده در نانو و اتمسفر اصلاح شده و کمترین مقدار در نمونه‌های با پوشش نگهداری شده در بسته‌های معمولی در پایان دوره‌ی نگهداری بود. بیشترین کنترل تغییرات شاخص روشنایی و قهوه‌ای شدن مربوط به بسته‌بندی های نانو با اتمسفر اصلاح شده به دلیل وجود دی‌اکسیدکربن بالا بود که سبب کنترل و کاهش سرعت فعالیت آنزیمی محصول گردید. همچنین شواهد نشان داد که در تمامی بسته‌ها هم‌زمان با گذشت زمان، pH نیز افزایش یافت که میزان تغییر pH در پایان دوره‌ی نگهداری، در نمونه‌های بدون پوشش در هر سه نوع بسته‌بندی کمتر از نمونه‌های پوشش داده شده از طریق کیتوزان بود، به‌طوری‌که کمترین تغییرات در نمونه‌های بدون پوشش موجود در بسته‌های نانو مشاهده شد. در پایان مدت نگهداری مشخص شد که به علت بافت اسفنجی موجود در قارچ‌ها، کیتوزان دارای تأثیر منفی بر شاخص‌های رنگ و ساختاری آن‌ها بوده است. بنابراین نتایج حاصل از بررسی خواص فیزیکی، مکانیکی و شیمیایی قارچ سفید در این پژوهش نشان داد که فیلم بسته‌بندی مجهز به ذرات نانوسیلیس همراه با اصلاح اتمسفر درونی بهترین شرایط را برای حفاظت از قارچ فراهم نموده است [۳۹]. نوشیورانی و همکاران (۲۰۱۷)، ویژگی‌های کیفی نان گندم بسته‌بندی شده را در فیلم‌های نانوکامپوزیت حاصل از کربوکسی متیل سلولز- کیتوزان و نانواکسید روی، گزارش نمودند. میزان بیاتی و رشد قارچ در برش‌های نان گندم به‌منظور بررسی مدت زمان ماندگاری آن‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج حاکی از حفظ رطوبت نان در نمونه‌های موجود در بسته‌های فعال در

[1] Thiobarbituric Acid
[2] Total Volatile Basic Nitrogen

مقایسه با شاهد (نان بدون پوشش) بود. پوشش‌های فعال با حفظ رطوبت از تجمع آمیلوز و آمیلوپکتین در نان ممانعت کردند و به این ترتیب موجب کند شدن بیاتی نان شدند. همچنین نفوذپذیری فیلم‌ها نیز با افزودن نانواکسید روی به‌طور معناداری کاهش یافت. به‌طوری‌که کمترین میزان آن متعلق به بالاترین غلظت نانوذره بود. نتایج نمودار DSC[1] حاکی از رتروگراداسیون کمتر آمیلوپکتین‌ها در پوشش‌های نانوکامپوزیت بود. نتایج آزمایش میکروبی، افزایش طول عمر نمونه‌ها را به مدت ۳ تا ۳۵ روز در بسته‌های نانوکامپوزیت حاوی ۲درصد نانواکسید روی نسبت به نمونه‌ی شاهد نشان داد. پس از طی ۱۵روز ذخیره‌سازی در دمای ۲۵درجه‌ی سانتی‌گراد، بیشترین میزان سفتی بافت و بیاتی متعلق به نان‌های بدون پوشش بود؛ درحالی‌که همه‌ی پوشش‌های فعال در طی ۱۵ روز تعداد کپک و مخمر موجود در قطعات نان را کاهش دادند، بیشترین خاصیت ضدمیکروبی در غلظت‌های ۱ و ۲ درصد نانوذره بدون رشد قارچ‌ها مشاهده شد. بنابراین نتایج حاصل از این پژوهش گزارش کرد که فیلم‌های نانوکامپوزیت با کنترل فاکتورهای مؤثر در فساد، توانستند ماندگاری نان ساندویچی تهیه شده از گندم را افزایش دهند [۴۰]. لی و همکاران (۲۰۱۱)، گزارش کردند که بسته‌های نانوکامپوزیت حاوی نانواکسید روی می‌توانند طول عمر میوه‌ها و سبزیجات تازه‌ی خردشده را به میزان بیشتری نسبت به بسته‌های معمولی افزایش دهند. در این مطالعه، بسته‌های مبتنی بر پلی‌ونیل کلراید فعال با نانواکسید روی تهیه شد و برش‌های سیب تازه به‌مدت ۱۲ روز در دمای ۴ درجه‌ی سانتی‌گراد درون آن‌ها قرار گرفت. نتایج نشان داد که بسته‌های نانو میزان پوسیدگی سیب‌ها را نسبت به نمونه‌ی شاهد (PVC) به‌طور معناداری کاهش داده است. برش سیب‌ها باعث افزایش سطح اتیلن و مالون‌دی‌آلدهید در نمونه‌های شاهد شد که این اتفاق در بسته‌های نانو مهار شد. همچنین میزان پلی‌فنل‌اکسیداز و پراکسیدازها نیز در بسته‌های نانو نسبت به شاهد کاهش یافت. به علاوه شکل ظاهری برش‌های سیب نیز حفظ شد، شاخص قهوه‌ای شدن نیز در مقایسه با نمونه‌های شاهد کاهش یافت [۴۱]. الماسی و همکاران (۱۳۹۸)، تأثیر نانوکامپوزیت‌های حاوی نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم را در افزایش ماندگاری قارچ دکمه‌ای *Agaricus bisporus* گزارش نمودند. به همین منظور، نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم در سه سطح صفر، ۰/۵و ۱/۵ درصد به فیلم پلی‌اتیلن دارای دانسیته‌ی کم (LDPE) اضافه شد و از تابش نور UV[2] به‌مدت ۱۵ دقیقه و به‌منظور تحریک فعالیت ضدمیکروبی فیلم‌ها استفاده شد. آزمون‌های فیزیکوشیمیایی و بررسی کیفیت میکروبی روی نمونه‌های قارچ پس از نگهداری به‌مدت ۱۵روز در دمای یخچال انجام شد. اگرچه با گذشت زمان، بار میکروبی نمونه‌ها افزایش یافت، اما فیلم‌های فعال توانستند میزان این افزایش را کنترل کنند. در این پژوهش، شمارش کلی باکتری‌های هوازی، باکتری‌های سرمادوست و کپک و مخمر مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج حاکی از این بود که با افزایش غلظت‌دی‌اکسید تیتانیوم، بار میکروبی به دلیل اثر ضدمیکروبی ذرات نانو، کاهش نفوذپذیری بسته نسبت به اکسیژن و مصرف اکسیژن محتوی بسته که شرایط رشد را برای میکروارگانیسم‌ها نامساعد می‌کند، به طور چشمگیری کاهش یافت. به طوری‌که افزودن دی‌اکسید تیتانیوم و تابش UV منجر به بازدارندگی از رشد باکتری‌های *Escherichia coli* و *Staphylococcus aureus* شد که این میزان در سطح ۱/۵ درصد از نانوذرات بیشترین هاله‌ی عدم رشد را نشان داد، که قطر این هاله در مقابل باکتری گرم مثبت بیشتر از باکتری گرم منفی بود. به‌علاوه بسته‌بندی‌های نانوکامپوزیت بر روی شمارش کپک و مخمر نیز که از عوامل فساد قارچ هستند، مؤثر بودند و کمترین رشد آن‌ها در تیمار۱/۵ درصد دی‌اکسید تیتانیوم در تابش UV مشاهده شد. درحالی‌که فیلم خالص LDPE هیچ‌گونه هاله‌ی عدم رشد و اثر ضدمیکروبی در برابر هیچ کدام از باکتری‌ها نشان نداد. همچنین میزان افت وزن، کاهش ویتامین C و کاهش ترکیبات فنولی در اثر استفاده از بسته‌بندی‌های نانوکامپوزیت نسبت به نمونه‌ی شاهد (پلی‌اتیلن) به‌طور قابل توجهی کاهش یافت که این تأثیر با افزایش میزان دی‌اکسید تیتانیوم بیشتر شد. بیشترین میزان ویتامین C و فنول کل و کمترین افت وزن در تیمار ۱/۵درصد دی‌اکسید تیتانیوم در تابش UV مشاهده شد. به‌علاوه، میزان اختلاف رنگ نمونه با قارچ تازه و شاخص قهوه‌ای شدن با گذشت زمان بیشتر شد که در پایان دوره‌ی نگهداری، کمترین میزان مربوط به نمونه‌های بسته‌بندی شده در فیلم حاوی بالاترین سطح دی‌اکسید تیتانیوم پرتو داده شده بود. همچنین سرعت اکسیداسیون ترکیبات فنولی نیز با تابش پرتو UV به دلیل غیرفعال کردن آنزیم تیروزیناز کاهش یافت. به طور کلی پژوهش حاضر نشان داد که تولید این نوع از نانوکامپوزیت‌ها به‌عنوان بسته‌بندی فعال به‌همراه تابش دهی نور UV می‌تواند ماندگاری قارچ و سایر محصولات کشاورزی را که مصرف تازه‌خوری دارند افزایش دهد و کیفیت این محصولات را در طول مدت عرضه، در سطح مطلوبی حفظ کند [۴۲]. در مطالعه‌ی دیگر، محققان با تهیه‌ی نانوکامپوزیت‌هایی بر پایه‌ی ژلاتین و نانواکسید روی در غلظت‌های مختلف (۰، ۰/۵ ، ۱/۵ و ۳ درصد) تأثیر این نانوذره را بر خواص فیزیکی و مکانیکی فیلم ژلاتین گزارش نمودند. بر اساس نتایج حاصل از این پژوهش

[1] .differential scanning calorimetry
[2] .Ultraviolet

مشاهده شد که نانواکسید روی در غلظت‌های افزوده شده می‌تواند با گروه‌های هیدروکسیلی بیوپلیمر ژلاتین پیوندهای قوی برقرار نماید و به این وسیله منجر به بهبود خواص مکانیکی شود، علاوه‌بر این درگیر شدن گروه‌های هیدروکسیل در ساختار بیوپلیمر با نانو، منجر به کاهش خاصیت آب‌دوستی فیلم و بهبود خواص فیزیکی آن شد. با افزایش درصد نانواکسید روی نسبت به ماده‌ی خشک، خواص مکانیکی از قبیل استحکام کششی و مدول یانگ در فیلم افزایش و درصد ازیاد طول در بیوفیلم نانوکامپوزیت نسبت به فیلم ژلاتین به‌طور معناداری کاهش یافت. به‌علاوه در بیوفیلم ساخته‌شده با بیشترین درصد از نانوذره (۳ درصد)، میزان حلالیت و رطوبت به‌دلیل کاهش ویژگی آب‌دوستی ژلاتین در کمترین مقدار مشاهده شد. بنابراین مشاهده شد که استفاده از این نوع بیوپلیمرهای نانوکامپوزیت قابلیت افزایش طول عمر نگهداری در مواد غذایی را دارد [۴۳]. شهابی قهفرخی و بابایی قزوینی (۱۳۹۷)، به‌منظور بررسی ویژگی‌های نانوکامپوزیت، به تهیه‌ی فیلم‌های زیست تخریب‌پذیر نشاسته ـ کفیران ـ اکسید روی به روش قالب‌گیری پرداختند. غلظت‌های مختلف از نانوذرات اکسید روی (۱ ، ۳ و ۵ درصد) با هموژنایزر اولتراسونیک به‌صورت یکنواخت درآمد و به محلول نشاسته ـ کفیران اضافه شد. ویژگی‌های فیلم خوراکی از قبیل ضخامت، نفوذپذیری به بخار آب، محتوای رطوبت، ویژگی‌های سطحی و خواص مکانیکی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که با افزایش مقدار نانوذرات تا غلظت ۱درصد زاویه‌ی تماس به‌طور معناداری افزایش یافت که به معنای بهبود خواص سطحی و آب‌گریزی در بیوفیلم‌ها بود. همچنین با افزایش اکسید روی به میزان ۳درصد ضخامت و نفوذپذیری نمونه‌ها نسبت به بخار آب کاهش یافت، ولی در میزان جذب رطوبت تغییر چشمگیری مشاهده نشد. همچنین افزایش نانوذرات تا غلظت ۱درصد نانوکامپوزیت‌های نشاسته ـ کفیران، منجر به کاهش معنادار در انحلال‌پذیری اکسیدروی در آب شد که با افزایش بیشتر نانوذره تا ۵درصد این میزان بهطور چشمگیری افزایش یافت. علت این افزایش می‌تواند به دلیل تجمع ذرات اکسید روی در سطح ۵ درصد باشد. به‌علاوه نتایج آزمون مکانیکی نشان داد که با افزایش مقدار نانوذره تا غلظت ۳درصد مدول یانگ و استحکام کششی بیوفیلم‌ها افزایش و ازدیاد طول در نقطه‌ی پاره شدن کاهش می‌یابد. با افزایش بیشتر نانوذرات تا غلظت ۵درصد خواص مکانیکی به علت برهم‌ریختگی ماتریس پلیمر در اثر مجتمع شدن نانوذرات در جهت عکس تغییر کرد. نتایج حاصل از این پژوهش حاکی از این است که افزودن نانوذرات به بیوفیلم‌ها در مقادیر کم (۱درصد)، منجر به بهبود مشخصات مکانیکی، فیزیکی و مقادیر نفوذپذیری به بخار آب شد که دلیل این امر پراکندگی مناسب نانوذره در غلظت کم و تجمع نکردن آن در ماتریس پلیمر بود. بنابراین نانوذرات اکسید روی توانستند با ایجاد برهمکنش قوی با ماتریکس نشاسته ـ کفیران خواص بیونانوکامپوزیت‌ها را بهبود بخشند؛ بنابراین برای بسته‌بندی محصولاتی با میزان رطوبت کم قابل استفاده هستند [۴۴].

۸- نانوکامپوزیت‌های متشکل از ترکیب نانوذرات مختلف و کاربرد آن‌ها در افزایش طول عمر مواد غذایی

ستاری و همکاران (۱۳۸۸)، با مطالعه بر روی ۷ نوع از بسته‌بندی‌های نانوکامپوزیت و بررسی تأثیر هرکدام بر روی ویژگی‌های ارگانولپتیک (حسی) و میکروبی نان بیان کردند که این پوشش‌ها قادرند زمان بیاتی نان را به تعویق بیندازند. در این پژوهش، تیمارها شامل نانوذرات نقره بر پایه‌ی پلی‌اتیلن در غلظت‌های ۰/۵، ۱ ، ۱/۵ و ۲ درصد و ترکیبی از نانو نقره به همراه نانوذرات رس در غلظت‌های ۱، ۲ و ۳ درصد و نیز پوشش‌های معمولی بدون ذرات‌نانو به‌عنوان نمونه‌ی شاهد بودند. مقادیر مورد استفاده نانوذرات نقره از ۲۵۰ ppm تا ۱۰۰۰ بود که اولی تأثیر کمی بر ویژگی‌های ضدمیکروبی داشت و دومی مقرون به‌صرفه نبود و فیلم نانویی شامل ۵۰۰ppm نقره (۱/۵ درصد) از نظر کاهش تعداد کپک‌ها و میکروب‌ها به‌عنوان بهترین فیلم شناخته شد. ارزیابی‌های ارگانولپتیکی در طول ۳ هفته و در سه دمای مختلف نگهداری ۵، ۲۰ و ۳۵ درجه‌ی سانتی‌گراد و شمارش میکروبی نیز در همان دماها و در روز چهاردهم انجام شد. نتایج نشان داد که چندین فاکتور شامل نوع فیلم، دما و مدت زمان نگهداری تأثیر معناداری بر بیاتی نان داشتند. بیشترین مقدار شمارش کلی میکروب‌ها و کپک‌ها در هر سه دما مربوط به نمونه‌ی شاهد بود و با افزایش مقدار نانونقره شمارش کلی میکروب‌ها کاهش یافت. همچنین کمترین تعداد شمارش میکروبی و کپک‌ها مربوط به دمای ۵°C و بیشترین میزان مربوط به دمای ۳۵ درجه‌ی سانتی‌گراد بود. اگرچه در دمای ۵ درجه‌ی سانتی‌گراد نسبت به دو دمای دیگر نان زودتر بیات می‌شود؛ ولی در کل ماندگاری نان در دمای ۵ درجه‌ی سانتی‌گراد به دلیل تأخیر در ظهور لکه‌های کپک بیشتر است. بیشترین میزان بیاتی بعد از ۱۴روز مربوط به بسته‌های شاهد و کمترین میزان بیاتی نان مربوط به فیلم نانویی ترکیبی۳ درصد (۵۰۰ ppm نانونقره و ۴۵۰ ppm نانورس) بود که این پوشش به دلیل هزینه‌ی ساخت کمتر و حفظ بیشتر تازگی نان به‌عنوان بسته‌بندی بهینه معرفی شد و توانست زمان بیاتی نان را ۴۰ تا ۶۰ درصد افزایش دهد [۴۵]. در یک مطالعه به‌منظور افزایش زمان نگهداری گوشت بره،

محققان استفاده از نانوکامپوزیت‌هایی براساس ایزوله پروتئین آب پنیر، نانوالیاف سلولزی و دی‌اکسید تیتانیوم را پیشنهاد نمودند. در این پژوهش، گوشت‌های بره را در پوشش‌های تهیه شده به مدت ۱۵روز در دمای یخچال نگهداری نمودند و خواص حسی و بار میکروبی گوشت‌ها را نسبت به نمونه‌های بدون پوشش مقایسه کردند. نتایج مطالعه نشان داد که فیلم‌های نانوکامپوزیت بار میکروبی را به میزان قابل توجهی نسبت به نمونه‌ی شاهد کاهش دادند؛ به‌طوری که تمامی میکروب‌های مورد بررسی در نمونه‌ی تیمارشده کاهش یافت. همچنین قابلیت مهار رشد در باکتری‌های گرم مثبت، بیشتر از باکتری‌های گرم منفی بود(p< ۰/۰۵). به‌علاوه ارزیابان ارزیابی حسی بر روی فاکتورهای رنگ، طعم، بافت و میزان پذیرش کلی انجام دادند. نتایج حاکی از این است که از روز سوم به بعد تمامی ویژگی‌های حسی در نمونه‌های گوشت تیمارشده تفاوت معناداری نسبت به نمونه‌ی شاهد داشتند. در نهایت محققان به این نتیجه رسیدند که فیلم‌های نانوکامپوزیت حاصل با حفظ کیفیت گوشت بره قادرند زمان ماندگاری آن را به‌طور چشمگیری از ۶ روز در نمونه‌ی شاهد به‌مدت ۱۵روز افزایش دهند [۴۶]. کاستا و همکاران (۲۰۱۱)، به‌منظور افزایش طول عمر سالاد متشکل از برش‌های میوه‌های تازه از نانوکامپوزیت‌های حاوی مونت‌موریلونیت و نقره استفاده کردند. پس از بسته‌بندی سالادها با پوشش‌های نانوکامپوزیت تهیه‌شده‌ی حاوی غلظت‌های ۱۵،۱۰ و۲۰ میلی‌گرم از نانوذرات، ارزیابی بار میکروبی و کیفیت حسی نمونه‌های نگهداری شده آغاز شد. محققان خواص ضدمیکروبی پوشش‌ها را بر روی باکتری‌های مزوفیل، کلی‌فرم، باکتری‌های اسید لاکتیک، همچنین کپک و مخمرها بررسی کردند. به‌علاوه نظارت بر رنگ، بو، سفتی بافت و میزان پذیرش کلی، معیار ارزیابی حسی محصول قرار گرفت. نتایج حاکی از خواص ضد میکروبی بسته‌های تولیدشده و افزایش طول عمر محصولات در این بسته‌ها نسبت به نمونه‌ی شاهد بود. به‌علاوه بالاترین کیفیت حسی و بیشترین میزان پذیرش مربوط به نمونه‌های داخل نانوکامپوزیت بود. نتایج نشان داد که در بالاترین غلظت از نانوذرات، کمترین میزان رشد میکروبی و کمترین مقدار پوسیدگی در نمونه‌ها مشاهده شد. همچنین این تیمار بیشترین میزان پذیرش را طی ارزیابی حسی به خود اختصاص داد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که نانوذرات نقره ـ مونت‌موریلونیت در یک سیستم بسته‌بندی مناسب قادرند به‌عنوان یک راه کنترل پوسیدگی برش‌های میوه‌های تازه به کار روند [۴۷]. میرزایی مقدم و همکاران (۱۳۹۳)، تأثیر فیلم‌های نانوکامپوزیتی شامل نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم و رس با زمینه‌ی پلی‌اتیلن را بر ویژگی‌های ارگانولپتیکی میوه‌ی کیوی گزارش نمودند. از فیلم‌های پلی‌اتیلن خالص نیز به‌عنوان شاهد استفاده شد. نمونه‌ها در رطوبت نسبی ۳۰درصد و دمای ۵ درجه‌ی سانتی‌گراد، به مدت شش هفته نگهداری شدند و در پایان هفته‌ی ششم آزمون ارزیابی حسی بر روی تغییرات میوه، متأثر از پوشش‌های نانوکامپوزیت انجام گرفت. نتایج نشان داد که ارزیابان بالاترین امتیاز ارزیابی حسی از لحاظ طعم، مزه، بو، رنگ و شکل ظاهری و مطلوبیت کلی را به نمونه‌های بسته‌بندی شده با فیلم‌های نانوکامپوزیت دادند. علاوه‌بر این طیف حاصل از پراش اشعه‌ی ایکس، نمایانگر پخش مناسب صفحات نانورس در نانوکامپوزیت تولیدی به دلیل حضور نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم بود. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که این نانوکامپوزیت‌ها قابلیت افزایش کیفیت میوه را در طول دوره‌ی نگهداری آن، نسبت به بسته‌بندی‌های معمولی دارند [۴۸]. نتایج حاصل از یافته‌های عسگری و همکاران (۱۳۹۴)، از بهبود ویژگی‌های خرمای مضافتی در پوشش‌های نانوکامپوزیت خبر داد. در این پژوهش از نانوذرات اکسید روی و نانولوله‌های کربنی در سه سطح ۰/۱، ۱ و ۲درصد در تولید فیلم‌های نانوکامپوزیت استفاده شد. نتایج حاصل از بررسی نمونه‌ها پس از طی ۹۰ روز انبارمانی نشان داد که بار میکروبی خرمای موجود در پوشش‌های نانوکامپوزیت نسبت به بسته‌های پلی‌اتیلن به‌طور معناداری کاهش یافت و میزان بهینه در غلظت ۲درصد مشاهده شد؛ به طوری‌که تعداد باکتری‌های لاکتیکی در این سطح به میزان ۰/۸۳درصد لگاریتمی کاهش یافتند. به‌علاوه در ارزیابی حسی، ارزیابان بعد از انبارمانی به مدت ۹۰ روز، مشاهده کردند که خرمای مضافتی در بسته‌های نانوکامپوزیت امتیاز بالاتری نسبت به بسته‌های پلی‌اتیلن به خود اختصاص داد. نمونه‌ها در بسته‌های شاهد به دلیل تغییر طعم و بو قابل مصرف نبودند. همچنین پارامترهای عطر و طعم نیز در بسته‌های حاوی ۲درصد نانواکسید روی بیشترین مقبولیت را داشتند. اگرچه در آزمون بافت تفاوت معناداری نسبت به نمونه‌ی شاهد مشاهده نشد [۴۹]. در یک مطالعه، محققان به‌منظور بسته بندی پنیر لیقوان از فیلم‌های نانوکامپوزیت پلی‌اتیلن LDPE حاوی خاک رس آلی (کلوزیت) اصلاح‌شده با نانوفلزات استفاده کردند. آزمون‌های فیزیکی، میکربی و شیمیایی بر روی پنیر بسته بندی شده به‌مدت ۲۸ روز نگهداری در دمای ۴ درجه‌ی سانتی گراد انجام شد. پوشش‌ها شامل پلی‌اتیلن خالص، پلی‌اتیلن + کلوزیت و نانوکامپوزیت‌های پلی‌اتیلن + کلوزیت + نانوذرات نقره و مس بودند. نتایج نشان داد که سرعت رشد باکتری‌های فسادگر در پنیر لیقوان بسته‌بندی‌شده در پوشش‌های نانوکامپوزیتی اصلاح‌شده با فلزات نقره و مس در طول دوره‌ی انبارمانی به‌صورت معناداری کاهش یافت؛ به طوری‌که بیشترین میزان باکتری‌های کلی فرم و *Staphylococcus aureus* مربوط به نمونه‌های درون

پلی‌اتیلن خالص و کمترین میزان مربوط به تیمار پلی‌اتیلن + کلوزیت + نانوذرات، پس از طی دوره‌ی انبارمانی بود. درصورتی‌که این بسته‌بندی تأثیر قابل‌توجهی بر روی فلور میکربی پنیر نداشت. بنابراین با رعایت حد مجاز نانوذرات، بسته‌های نانوکامپوزیت قادرند در طول ماندگاری این نوع پنیر مؤثر باشند [۵۰]. فیلم نانوکامپوزیت رس-دی‌اکسید تیتانیوم با اختلاط نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم و نانوذرات رس کلویزیت (۲۰ آ) به روش مخلوط واکنش مذاب در ماتریس پلی‌اتیلن و به‌منظور بررسی تأثیر بر ماندگاری میوه‌ی زردآلوی تازه تهیه شد. قابلیت ضدمیکروبی فیلم‌ها نسبت به باکتری سودوموناس و مخمر ردوترولا به دلیل شیوع بیشتر در میان میوه‌ها و سبزی‌ها بررسی شد. زردآلوهای تازه و بسته‌بندی‌شده در فیلم‌های نانوکامپوزیت و فیلم پلی‌اتیلن خالص در سردخانه به‌مدت ۱۷روز در دمای ۵ درجه‌ی سانتی‌گراد و تحت تابش نور UV قرارگرفتند. نتایج نشان داد که بسته‌های شاهد هیچ‌گونه خاصیت ضدمیکروبی در برابر دو میکروارگانیسم مورد مطالعه نداشتند. درحالی‌که فیلم‌های نانوکامپوزیت پس از ۳ ساعت پرتودهی تحت تابش فلوئورسنت توانستند در شرایط سردخانه، میزان میکروارگانیسم‌های مزوفیل و مخمر را به طور معناداری نسبت به پلی‌اتیلن خالص کاهش دهند. بنابراین در این پژوهش، مشاهده شد که نانوکامپوزیت‌ها قادرند زمان ماندگاری محصولات غذایی تازه را به طور چشمگیری افزایش دهند [۵۱]. کاستا و همکاران (۲۰۱۲)، به منظور افزایش طول عمر برش‌های هویج تازه، فیلم‌های نانوکامپوزیت نقره ـ مونت موریلونیت را پیشنهاد کردند. در این پژوهش، خواص حسی و ضدمیکروبی نمونه‌ها در پوشش‌های نانوکامپوزیت در طول مدت انبارمانی بررسی شد. ویژگی‌های ضدمیکروبی و ویژگی‌های حسی شامل رنگ، بو، سفتی بافت و پذیرش کلی محصول در پایان انبارمانی ارزیابی شد. داده‌ها حاکی از وجود اختلاف معنادار در نتایج میکروبی میان پوشش‌های نانوکامپوزیت و شاهد (بدون پوشش یا در پوشش پلی‌پروپیلن) بودند. به‌طوری‌که کمترین رشد میکروارگانیسم‌ها مربوط به نمونه‌های نگهداری شده در بسته‌های فعال بود. علاوه بر این بسته‌های فعال خواص حسی نمونه را به شکل مطلوب‌تری حفظ کردند. نتایج این پژوهش نشان داد که می‌توان با استفاده از این نانوکامپوزیت‌ها، با کنترل بار میکروبی و میزان آب محصول، مدت زمان ماندگاری برش‌های هویج را را نسبت به نمونه‌های بدون پوشش به مدت ۲ ماه افزایش داد [۵۲]. پیغمبردوست و پورشریف (۱۳۹۴)، با قرار دادن آب پرتقال تازه در بسته‌های نانوکامپوزیت پلی‌اتیلنی LDPE حاوی نانوذرات رس (کلویزیت خالص و اصلاح‌شده با یون‌های فلزی) و نانوذرات فلزی مس، نقره و اکسید روی به بررسی خواص کیفی، حسی و میکروبی آن پرداختند. شاخص‌های رنگ، pH، ویتامین C، پایداری میکروبی و ارزیابی حسی محصول در طول زمان ۵۶ روز نگهداری در دمای یخچال مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان داد که با گذشت زمان، pH آب‌میوه در همه‌ی بسته‌ها افزایش یافت که کمترین میزان آن در نانوکامپوزیت‌های حاوی نانوفلز بود. درحالی‌که شاخص قهوه‌ای‌شدن در فیلم‌های بدون نانوذرات فلزی به‌طور معناداری کمتر از فیلم شاهد بود و در فیلم‌های شاهد و فیلم‌های حاوی نانوذرات فلزی بیشتر بود. همچنین فیلم‌های حاوی نانو ذرات رس کمترین میزان کاهش اسید آسکوربیک را نشان دادند. در این پژوهش، سطح باکتری‌های اسیددوست، مزوفیل هوازی و کپک و مخمر در نانوکامپوزیت‌های حاوی نانوذرات فلزی به‌طور معناداری نسبت به فیلم شاهد (پلی‌اتیلن خالص) و فیلم حاوی نانورس کمتر بود. تعداد کپک و مخمر طی ۷ روز در بسته‌های شاهد افزایش یافت. پس از ۷ روز نگهداری، شمارش کلی باکتری‌ها در تمام بسته‌های نانوکامپوزیت کاهش یافت که این کاهش در فیلم‌های حاوی نانوذرات فلزی معنادارتر بود. همچنین فیلم‌های حاوی نانوذرات فلزی بیشترین اثر ضدمیکروبی را پس از ۲۸ روز نشان دادند و از نظر خواص ضدقارچی و ضدباکتری بهتر از فیلم‌های حاوی نانورس عمل کردند. به غیر از رنگ، سایر فاکتورهای حسی از قبیل طعم و بو در نمونه‌های شاهد کمترین امتیاز را در میان ارزیاب‌ها کسب نمودند. بیشترین پذیرش کلی و بالاترین امتیاز حسی مربوط به آب‌میوه‌ی موجود در بسته‌های نانوکامپوزیت حاوی فلز و کمترین میزان آن متعلق به نمونه‌های شاهد بود. به‌علاوه میزان مهاجرت یون‌های فلزی کمتر از حد مجاز بود. بنابراین می‌توان گفت که نانوکامپوزیت‌های تولید شده قابلیت افزایش مدت زمان نگهداری آب‌میوه‌ی تازه را داشتند [۵۳]. در یک مطالعه‌ی دیگر، محققان از تکنولوژی نانو به‌منظور بسته‌بندی و افزایش طول عمر خرمای مضافتی استفاده کردند. در این پژوهش از ترکیبات پلی‌اتیلن همراه با نانوکامپوزیت‌های نقره و دی‌اکسید تیتانیوم استفاده شد و ماندگاری محصول طی نگهداری به مدت ۴ ماه در دمای ۴ و ۲۵ درجه‌ی سانتی‌گراد با بسته‌های پلی‌اتیلن خالص به‌عنوان شاهد مقایسه شد. نتایج این مطالعه نشان داد که بار میکروبی خرما طی دوره‌ی زمانی ۱۲۰ روزه نسبت به نمونه‌ی شاهد به‌طور معنی‌داری کاهش یافت. به طوری‌که محققان کاهش ۹۳/۶ درصدی تعداد کپک و مخمر و کاهش ۹۰/۴ درصدی کل باکترهای هوازی مزوفیل و نیز کاهش ۸۸/۸ درصدی تعداد کلیفرم‌ها در دمای ۲۵ درجه‌ی سانتی‌گراد را گزارش دادند؛ همچنین کاهش ۹۳/۸ درصدی تعداد کپک و مخمر، ۹۰/۹ درصدی تعداد کلیفرم‌ها و کاهش ۹۶/۳ درصدی

تعداد کل مزوفیل‌های هوازی در دمای ۴ درجه‌ی سانتی‌گراد در بسته‌بندی نانوکامپوزیت ذرات‌نقره و دی‌اکسید تیتانیوم نسبت به نمونه‌ی شاهد مشاهده شد. بنابراین استفاده از تکنولوژی نانو در بسته‌بندی محصولاتی نظیر خرما که به دلیل شرایط خاص برداشت، بسته‌بندی و نگهداری، دارای بار میکروبی بالایی هستند، قادر است تأثیر قابل‌توجهی در افزایش زمان ماندگاری محصول اعمال نماید [۵۴]. بر اساس نتایج حاصل از یافته‌های امامی‌فر و همکاران (۱۳۸۹)، در ارتباط با بسته‌بندی آب پرتقال تازه با استفاده از فیلم‌های پلی‌اتیلن حاوی نانوذرات نقره و اکسید روی، مشاهده شد که این نانوکامپوزیت‌ها قادر به افزایش ماندگاری آب‌میوه بودند. در این پژوهش، فیلم‌ها شامل پلی‌اتیلن سبک حاوی ۰/۵ و ۱/۵ درصد نانوکامپوزیت نقره و پلی‌اتیلن سبک حاوی ۱ و ۰/۲۵ درصد اکسید روی بودند و از پلی‌اتیلن خالص نیز به‌عنوان شاهد استفاده شد. پایداری میکروبی، شاخص قهوه‌ای‌شدن، میزان اسید آسکوربیک، ویژگی‌های حسی و کیفیت رنگ آب پرتقال در هفته‌های اول، چهارم و هشتم انبارداری در دمای ۴ درجه‌ی سانتی‌گراد ارزیابی شد. یافته‌ها نشان داد که سرعت رشد کپک و مخمر و شمارش کلی باکتری‌ها در آب پرتقال تازه، با استفاده از بسته‌بندی‌های فعال تا هفته‌ی چهارم پس از انبارمانی به‌صورت معناداری نسبت به نمونه‌ی شاهد کاهش یافت. به‌علاوه میزان نابودی آسکوربیک اسید و تولید ترکیبات قهوه‌ای نیز در بسته‌های نانوکامپوزیتی حاوی ۰/۲۵درصد نانواکسید روی نیز بدون تأثیر منفی بر روی خواص حسی، کاهش معناداری نشان داد. همچنین ویژگی‌های حسی شامل بو، مزه و پذیرش کلی برای آب پرتقال موجود در بسته های نانو نقره و اکسید روی، بیشترین پذیرش را بعد از ۲۸ روز نسبت به نمونه‌ی شاهد داشت. ارزیاب‌ها بعد از این مدت، آب میوه‌ی موجود در بسته‌های پلی‌اتیلن سبک حاوی ۰/۲۵درصد نانواکسید روی را به‌عنوان بهترین و سپس پلی‌اتیلن سبک با ۰/۵ درصد نانوکامپوزیت نقره را برگزیدند. همچنین پلی‌اتیلن سبک حاوی ۱/۵ درصد نانوکامپوزیت نقره را نسبت به نمونه‌ی شاهد قابل‌قبول دانستند [۱]. اولیایی و همکاران (۱۳۹۴)، تأثیر نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم و مونت موریلونیت را بر روی ویژگی‌های نوری، حرارتی و توپوگرافی بیوفیلم‌های نانوکامپوزیت مبتنی بر نشاسته بررسی کردند. این نانوکامپوزیت‌ها حاوی نانوذرات سه بعدی دی‌اکسید تیتانیوم و دو بعدی سدیم‌مونت موریلونیت بودند که به روش قالب‌ریزی تهیه شدند. ساختار شیمیایی فیلم‌ها و توپوگرافی سطح از طریق طیف‌سنجی فروسرخ (FTIR) و میکروسکوپ نیروی اتمی بررسی شد. اگرچه تصاویر سه‌بعدی میکروسکوپ نیروی اتمی (AFT) در مخلوط دوجزئی نشاسته و مونت‌موریلونیت، پخش یکنواخت لایه‌های ورقه‌ای‌شده نانورس را در ماتریس پلیمر نمایش دادند، ساختار سه‌جزئی حاصل از افزودن دی‌اکسید تیتانیوم به بیوفیلم حاوی ۳درصد نانورس نمایانگر توزیع یکنواخت‌تر، زبری کمتر و سطح صاف‌تر نسبت به فیلم‌های دوجزئی بود. نتایج حاصل از FTIR وجود پیوندهای هیدروژنی و برهمکنش‌های الکترواستاتیک را میان ذرات نانو با زنجیره‌های نشاسته تأیید کرد. همچنین نتایج حاصل از آزمون گرماسنجی تفاضلی DSC[1] حاکی از افزایش دمای ذوب و دمای انتقال شیشه با افزایش غلظت دی‌اکسید تیتانیوم نسبت به نانوکامپوزیت نشاسته و مونت‌موریلونیت بود که بیانگر پایداری حرارتی بیشتر در نانوکامپوزیت سه‌جزئی حاصل است. اگرچه نانورس به‌تنهایی تأثیر معناداری بر اندیس شفافیت فیلم‌ها نداشت، اما با افزایش دی‌اکسید تیتانیوم در فیلم حاوی ۳درصد نانورس اندیس سفیدی و شفافیت فیلم‌ها افزایش یافت و از میزان زردی و قرمزی آن‌ها کاسته شد که این نتیجه حاکی از تأثیر سفیدکنندگی قوی دی‌اکسید تیتانیوم است. به‌علاوه به‌منظور بررسی کدورت فیلم‌ها و نیز میزان جذب نور مرئی و UV از دستگاه اسپکتروفتومتری UV-Vis در دامنه‌ی طول موج ۸۰۰-۲۰۰ نانومتر استفاده شد که نتایج حاصل از این بررسی، فیلم‌های نانوکامپوزیت سه‌جزئی تهیه‌شده را با اختلاف معنادار نسبت به نانوکامپوزیت‌های دو جزئی، به‌عنوان محافظ پرتوهای نور مرئی و فرابنفش و پیشگیری از اکسیداسیون محصولات تأیید نمود. به طوری که پلیمر دارای ۱درصد نانوذره‌ی دی‌اکسید تیتانیوم قادر به بلوکه نمودن ۷۷/۲ درصد پرتوهای نور مرئی و بیش از ۹۹درصد امواج فرابنفش بود [۵۵]. در یک مطالعه بر روی فیلم نانوکامپوزیت حاوی پلی‌اتیلن به همراه نانوذرات خاک رس اصلاح شده با نانوذرات مس، محققان ویژگی‌های فیزیکی، مکانیکی و ضد میکروبی فیلم‌ها را ارزیابی نمودند. در این پژوهش، نانوذرات رس در دو نوع کلویزیت ۳۰ب و مونت‌موریلونیت آزمایش شدند. آزمون پراش پرتو ایکس نشان داد که نانوذرات در ماتریکس پلی اتیلن به‌طور یکنواخت پخش شده‌اند. تصاویر حاصل از میکروسکوپ الکترونی روبشی حاکی از این بود که فیلم‌های نانوکامپوزیت مورفولوژی ناهمگن‌تر و زبرتری نسبت به پلی اتیلن خالص داشتند. این تصاویر مقطع عرضی یکنواخت‌تری را برای فیلم‌های نانوکامپوزیت حاوی خاک رس اصلاح شده در مقایسه با فیلم‌های نانوکامپوزیت اصلاح‌نشده نشان دادند. نتایج نشان داد که ویژگی‌های مکانیکی فیلم‌های پلی‌اتیلنی با افزایش خاک رس اصلاح‌شده با مس به مقدار زیادی بهبود یافت؛ به این

[1] Differential Scanning Calorimetry

صورت که افزودن نانوذرات مس به ماتریس پلیمر، منجر به تقویت برهم‌کنش میان نانو ذرات و افزایش استحکام فیزیکی فیلم شد. بیشترین میزان استحکام کششی و درصد افزایش طول، مربوط به تیمار پلی‌اتیلن+ کلویزیت اصلاح‌شده با مس بود. همچنین داده‌های این پژوهش حاکی از تقویت اثر ضدمیکروبی در برابر باکتری‌های *coli Escherichia* و *coli Escherichia* در فیلم‌های حاوی خاک رس اصلاح‌شده بود که این خاصیت در نانوکامپوزیت‌ها نسبت به باکتری‌های گرم‌منفی بارزتر بود. به‌علاوه مشاهدات حاکی از تأثیر بیشتر خواص ضدمیکروبی نانوکامپوزیت‌های نوع کلویزیت اصلاح‌شده با یون مس نسبت به نوع مونت‌موریلونیت بود [۵۶].

۹- نتیجه‌گیری

نانوکامپوزیت‌های ضدمیکروبی قادرند در قالب بسته‌بندی به منظور بازدارندگی از رشد میکروارگانیسم‌ها در سطح غذا به‌کار روند و با کاهش سرعت فساد، عمر مفید مواد غذایی را افزایش دهند. در این راستا باید به جنبه‌های سلامت غذا نیز توجه شود و میزان مهاجرت نانوذرات از بسته‌بندی به سطوح مواد خوراکی تحت کنترل قرار گیرد. زیرا نتایج حاکی از این است که قرار گرفتن در معرض نانوذرات موجود در بسته‌بندی‌های فعال، علاوه بر ایجاد تماس پوستی، اثرات تنفسی و امکان بلعیدن آن‌ها را همراه با مواد غذایی فراهم می‌کند. به‌علاوه این ذرات قابلیت رها شدن در محیط را دارد و بنابراین قادر است به‌طور غیرمستقیم وارد زنجیره‌ی غذایی شود. به دلیل اینکه در زمینه‌ی مهاجرت نانوذرات از بسته‌بندی مواد غذایی اطلاعات محدودی وجود دارد، پیشنهاد می‌شود که در ارتباط با میزان مجاز مهاجرت و تعیین سمی‌بودن این اجزا و میزان تأثیرات نانوذرات بر روی سلامتی مطالعات بیشتری صورت گیرد. داده‌های مندرج در این مقاله حاکی از قابلیت افزایش چشمگیر طول عمر مواد غذایی و ارتقای زمان ماندگاری آن‌ها از طریق نانوکامپوزیت‌ها است. اما استفاده از این ترکیبات، نیازمند تحقیقات بیشتر پیرامون مسمومیت ایجادشده جهت اطمینان از سلامت مصرف‌کننده است [۵۷].

۱۰- مراجع

[1] A. Emamifar, M. Kadivar, M. Shahedi, and S. Soleimanian-Zad, “Evaluation of nanocomposite packaging containing Ag and ZnO on shelf life of fresh orange juice,” Innovative Food Science & Emerging Technologies, vol. 11(4), pp. 742-748, 2010.

[2] A.L. Brody , B. Bugusu, J.H, J.H. Han,C.K. Sand and T.H. McHug. Innovative food packaging solutions Journal of food science,vol. 73(8), pp. 107-116, 2008.

[3] S. Samuei, J. Fakkar, Z. Rezvani, A. Shomali, and B. Habibi. Synthesis and characterization of graphene quantum dots/CoNiAl-layered double-hydroxide nanocomposite: Application as a glucose sensor. Analytical biochemistry, vol. 521, pp. 31-39, 2017.

[4] P. Kanmani and J. W. Rhim. Physical. Mechanical and antimicrobial properties of gelatin based active nanocomposite films containing AgNPs and nanoclay. Food Hydrocolloids, vol. 35, pp. 644-652,. 2014.

[5] H.M. De Azeredo. Antimicrobial nanostructures in food packaging. Trends in food science & technology, vol. 30(1), pp. 56-69,. 2013.

[6] Q. Chaudhry, M. Scotter, J. Blackburn, B.Ross, A. Boxall, L. Castle and R.Watkins. Applications and implications of nanotechnologies for the food sector. Food additives and contaminants, vol. 25(3), pp. 241-258,. 2008.

[7] M.E. Embuscado and K.C Huber. Edible films and coatings for food applications vol. 222: Springer. 2009.

[8] F. Xie, E. Pollet, P.J. Halley and L. Averous. Starch-based nano-biocomposites. Progress in Polymer Science,vol. 38(10-11), pp. 1590-1628,. 2013.

[9] L. Qi, Z. Xu, X. Jiang, C. Hu, and X. Zou, "Preparation and antibacterial activity of chitosan nanoparticles," Carbohydrate research, vol. 339(16), pp. 2693-2700, 2004.

[10] A. JafariKaliji, S. A. Jafarpour, and R. Safari, "Effect of Chitosan Nanocomposites and Rosemary Extract (Rosmarinus officinalis L.) Coating on Chemical Properties of Inoculated Fillet of Huso huso with Listeria monocytogenes during Refrigerated Storage," [Full text in Persian], 2017.

[11] M. Zarei, A. Hassani, and Z. Hijri, "Synthesis and Characterization of Biodegradable and Antibacterial Coverage Based on Aloe vera/Nanochitosan for Bread Packaging," Journal of Nanomaterials, 2019. (In Persian)

[12] F. Xie, E. Pollet, P. J. Halley, and L. Averous, "Starch-based nano-biocomposites. Progress in Polymer Science," vol. 38(10-11), pp. 1590-1628, 2013.

[13] S. Ranjbaryan, B. M. Rezazadeh, H. Almasi, and S. Amiri, "Effect of sodium caseinate based nanocomposite active films and coatings containing cinnamon essential oil on the quality improving and shelf life extension of chicken fillets," [Full text in Persian], 2018.

[14] D. Dehnad, H. Mirzaei, Z. Emam-Jomeh, S. Jafari, and S. Dadash, "Assessing thermal and antimicrobial properties of chitosan-nanocellulose nanocomposites to enhance the shelf life of ground meat," Iranian Journal of Nutrition Sciences & Food Technology, vol. 8(4), pp. 163-173, 2014.

[15] R. F. Hashamdar, A. S. Yasini and M. S. Hekmati, "The Synthesis of a New Biofilm Containing Nano-Starch

[27] Z. Rabiee, F. Shahiyari and S. Sadghian, "Antibacterial Activity of Synthesized Silver Nanoparticles Using Sumac Aqueous Extract and Silver-Chitosan Nanocomposite against Xanthomonas perforans," Journal of Applied Research in Plant Protection, vol. 9(1), pp. 31-43, [Full text in Persian], 2020.

[28] S. Azlin-Hasim, M.C. Cruz-Romero, M.A. Morris, E. Cummins and J. P. Kerry, "Effects of a combination of antimicrobial silver low density polyethylene nanocomposite films and modified atmosphere packaging on the shelf life of chicken breast fillets," Food packaging and shelf life, vol. 4, pp. 26-35, 2015.

[29] N. Motlagh, M. Mosavian and S. Mortazavi, "The comparison effect of nanosilver packages on the quality and shelf time of barberry with polyethylene packaging," Iranian Food Science & Technology Research Journal, vol. 5(2), pp. 75-87, [Full text in Persian], 2009.

[30] S. Fahiminia and L. Naseri, " Effect of nano-composite packages on quality properties and shelf life of santa rosa plam (prunus salicinal)," [Full text in Persian], 2015.

[31] H. Mohammadi, S. A. A. Anvar, P. Qajarbeygi, H. Ahari, and I. Toomari, "Assessment of Packaging Covers with 3% and 5% Nano Silver Based on Titanium Dioxide on the Fungal Growth of Bread," Journal of Food Technology and Nutrition, vol. 13(1), pp. 75-86. [Full text in Persian], 2015.

[32] Z. Badiei, A. S. Yasini, and M. Mirjalili, "Study of Nano Composite Films Made of Starch and Chitosan with Silver Nanoparticles and Comparison of their Antimicrobial Effects," [Full text in Persian], 2018.

[33] A. Khoshkbar Sadeghi, and M. Farbodi, "Preparation of Polyaniline/Polyvinyl Alcohol/Ag Nanocomposite and Characterization of Its Physicochemical and Antibacterial Properties," Modares Journal of Biotechnology, vol. 9(4), pp. 603-609, [Full text in Persian], 2018.

[34] S. Ebrahimiasl, C. A. Soltani and A. Javadi, "Effects of Nanocoatings Containing Copper on the Microbial and Physical Characteristics of Milk as Compared to Regular Polyethylene Packaging," [Full text in Persian], 2018.

[35] G. B. Lomate, B. Dandi and S. Mishra, "Development of antimicrobial LDPE/Cu nanocomposite food packaging film for extended shelf life of peda," Food packaging and shelf life, vol. 16, pp. 211-219, 2018.

[36] M. Premanathan, K. Karthikeyan, K. Jeyasubramanian, and G. Manivannan, "Selective toxicity of ZnO nanoparticles toward Gram-positive bacteria and cancer cells by apoptosis through lipid peroxidation," Nanomedicine: Nanotechnology, Biology and Medicine, vol. 7(2), pp. 184-192, 2011.

[37] S. Kumar, A. Mudai, B. Roy, I. B. Basumatary, A. Mukherjee, and J. Dutta, "Biodegradable Hybrid Nanocomposite of Chitosan/Gelatin and Green Synthesized Zinc Oxide Nanoparticles for Food Packaging," Foods, vol. 9(9), p. 1143, 2020.

,Nano-Cellulose and Garlic Extract, and Assessment of Its Antimicrobial Activity for Use in Food Packaging," [Full text in Persian], 2018.

[16] N. Shavisi, A. Khanjari, A. A. Basti, A. Misaghi, and Y. Shahbazi, "Effect of PLA films containing propolis ethanolic extract, cellulose nanoparticle and Ziziphora clinopodioides essential oil on chemical, microbial and sensory properties of minced beef," Meat science,vol. 124, pp. 95-104, 2017.

[17] M. A. Emamhadi, M. Sarafraz, M. Akbari, Y. Fakhri, Y. N. T. T. Linh and A. M. Khaneghah, "Nanomaterials for food packaging applications: A systematic review. Food and Chemical Toxicology," vol. 1(11), pp. 8-25, 2020.

[18] H. Barikloo, and E. Ahmadi, "Effect of nanocomposite-based packaging and chitosan coating on the physical, chemical, and mechanical traits of strawberry during storage," Journal of Food Measurement and Characterization, vol. 12(3), pp.1795-1817, 2018.

[19] A. Khezrian and Y. Shahbazi, "Application of nanocompostie chitosan and carboxymethyl cellulose films containing natural preservative compounds in minced camel's meat. International journal of biological macromolecules, vol. 106, pp. 1146-1158, 2018.

[20] A. Issa, S. A. Ibrahim, and R. Tahergorabi, "Impact of sweet potato starch-based nanocomposite films activated with thyme essential oil on the shelf-life of baby spinach leaves," Foods, vol. 6(6), pp. 43-53, 2017.

[21] A. Bekran, E. Seifi, and F. Varasteh, "A Study on the Effect of Nanosilicate-Based Coatings on Storage Life of Pomegranate Cultivar Malas-E-Saveh," [Full text in Persian], 2019.

[22] H. Ebrahimi, B. Abedi, H. Bodaghi, G. H. Davarynejad, and H. Harati Zadeh, "Effect of Nano-composite and Polyethylene Films on Postharvest Quality of Peach Fruit," [Full text in Persian], 2019.

[23] F. Shariatmadari, S. Ojagh, M. Abdollahi and A. Adeli, "Effect of Salvia essential oils on the nanocomposite chitosan-katira as a coating for fishery products," [Full text in Persian], 2016.

[24] S. J. Hashemi, M. NEVES, and M. NAKAJIMA, "Effects of Chitosan/Nanoclay Bentonite on the Mechanical Properties, Water Permeability and Microstructure of Nanocomposite Film," Journal of Food Processing and Preservation, vol. 10(1), pp. 33-46, [Full text in Persian], 2018.

[25] A. Emamifar, M. Kadivar, M. Shahedi and S. Soleimanian-Zad, "Effect of nanocomposite packaging containing Ag and ZnO on inactivation of Lactobacillus plantarum in orange juice," Food Control, vol. 22(3-4), pp. 408-413, 2011.

[26] S. Kumar, A. Shukla, P. P. Baul, A. Mitra, and D. Halder, "Biodegradable hybrid nanocomposites of chitosan/gelatin and silver nanoparticles for active food packaging applications. Food packaging and shelf life," vol. 16, pp. 178-184, 2018.

(polyethylene and titanium dioxide nanoparticles and clay nanoparticles) on the organoleptic properties of kiwi fruit," Khorasan Razavi Agricultural and Natural Resources Research Center, 2014. (In Persian)

[49] P. Asgari, O. Moradi, and B. Tajodin, "The Effect of Nano-composite Packaging Carbon Nanotube and Zinc Oxside Nanoparticles Base on Organoleptic and Microbial Properties of Mazafati Brand Dates," [Full text in Persian], 2015.

[50] P. Abdossattari, S. Peighambardoust, J. Hesari, S. Peighambardoust, and M. Rezaie, "Application of LDPE nanocomposite films incorporating organoclay modified with nanometals in packaging of Lighvan cheese," Iranian Journal of Nutrition Sciences & Food Technology, vol. 10(3), pp. 47-56. [Full text in Persian], 2015.

[51]H. Bodaghi, Y. Mostofi, A. Oromiehie, Z. Zamani, B. Ghanbarzadeh, and Z. Ghasimi Hagh,"Control of microbial population using of nanocomposite film in vitro and in vivo tests. Iranian Journal Food Science and Technology Research," vol. 11(5), pp. 707-708. [Full text in Persian], 2015.

[52] C. Costa, A. Conte, G. Buonocore, M. Lavorgna, and M. A. Del Nobile, "Calcium-alginate coating loaded with silver-montmorillonite nanoparticles to prolong the shelf-life of fresh-cut carrots," Food research international, vol. 48(1), pp. 164-169, 2012.

[53] H. Peighambardoust and L. Poursharif, "Quality, sensory and microbial characteristics of fresh orange juice packed in LDPE nanocomposite films incorporating organoclay, modified nanoclays and Ag, Cu and ZnO nanoparticles," Iranian Journal of Biosystems Engineering, vol. 47(3), pp. 393-403, [Full text in Persian], 2016.

[54] M. Binesh, S. Mortazavi, M. Armin, and M. Moradi, "Investigation the effect of application of nano-composite of sil and TIO2 on polyethylene packing for preserving the date against microbial variations during warehousing," [Full text in Persian], 2010.

[55] S. A. Oleyaei, B. Ghanbarzadeh, A. A. Moayedi, and F. Abbasi, "The Effects of TiO2 and MontmorilloniteNanofillers on Structural, Thermal and Optical Properties of Starch based Nanobiocomposite Films," Iranian Journal Food Science and Technology Research, vol. 12(5), pp. 678-695, [Full text in Persian], 2016.

[56] S. Peighambardoust, S. Samadpour Hendvari, and S. Peighambardoust, "Production and investigating the properties of Low Density Polyethylene (LDPE) films incorporating nanoclays modified with copper nanoparticles," Iranian Journal of Nutrition Sciences & Food Technology, vol. 11(3), pp. 103-114. [Full text in Persian], 2016.

[57] J. An, M. Zhang, S. Wang, and J. Tang, "Physical, chemical and microbiological changes in stored green asparagus spears as affected by coating of silver nanoparticles-PVP. LWT-Food Science and Technology," vol. 41(6), pp. 1100-1107, 2008.

[38] M. Heydari-Majd, B. Ghanbarzadeh, M. Shahidi-Noghabi, M. A. Najafi, and M. Hossein, "A new active nanocomposite film based on PLA/ZnO nanoparticle/essential oils for the preservation of refrigerated Otolithes ruber fillets," Food packaging and shelf life, vol. 19, pp. 94-103, 2019.

[39] R. Gholami and E. Ahmadi, "Evaluation the Effect of Nano Silica Packaging Film on the Properties of Button Mushroom during Storage Time. Iranian Journal of Biosystems Engineering," vol. 50(4), pp. 895-907, [Full text in Persian], 2020.

[40] N. Noshirvani, B. Ghanbarzadeh, R. P. Mokarram, and M. Hashemi, "Novel active packaging based on carboxymethyl cellulose-chitosan-ZnO NPs nanocomposite for increasing the shelf life of bread," Food packaging and shelf life, p. 11, vol. 106-114, 2017.

[41] X. Li, W. Li, Y. Jiang, Y. Ding, J. Yun, Y. Tang, and P. Zhang, "Effect of nano-ZnO- coated active packaging on quality of fresh cut 'Fuji'apple. International Journal of Food Science & Technology," vol. 46(9), pp. 1947-1955, 2011.

[42] H. Almasi, B. Pourfatahi, and R. M. Zonouzi, "Studying of the effect of low density poly ethylene (LDPE) based antimicrobial nanocomposite packaging containing TiO2 nanoparticles on the shelf-life extension of button mushroom (Agaricus bisporus)," [Full text in Persian], 2017.

[43] S. Eshagh, F. M. H. Abbaspour, F. Hosseini, F and M. Tabasizadeh, "Effect of Zinc Oxide Nanoparticles on Mechanical, Thermal and Biodegradability of Gelatin-Based Biocomposite Properties Films," [Full text in Persian], 2020.

[44] I. Shahabi-Ghahfarrokhi and A. Babaei-Ghazvini, "Production of Biodegradable Packaging Material Based on Starch-kefiran-ZnO: Physical and Mechanical Characterization. Iranian Journal of Biosystems Engineering, vol. 49(4), pp. 557-565, [Full text in Persian], 2019.

[45] M. Sattari, S. Minaee, M. Azizi, and H. Afshari, "Effects of nanofilms packaging on organoleptic and microbial properties of bread," Iranian Journal of Nutrition Sciences & Food Technology, vol. 4(4), pp. 65-74, [Full text in Persian], 2010.

[46] M. A. Sani, A. Ehsani and M. Hashemi. Whey protein isolate/cellulose nanofibre/TiO2 nanoparticle/rosemary essential oil nanocomposite film: Its effect on microbial and sensory quality of lamb meat and growth of common foodborne pathogenic bacteria during refrigeration. International journal of food microbiology, vol. 251, pp. 8-14,. 2017.

[47] C. Costa, A. Conte, G. G. Buonocore, and M. A. Del Nobile, "Antimicrobial silver-montmorillonite nanoparticles to prolong the shelf life of fresh fruit salad," International journal of food microbiology, vol. 148(3), pp. 164-167, 2011.

[48] H. Mirzaei Moghaddam, M. H. Khoshtaghaza, A. Salimi and M. Barzegar, "Investigation of the effect of packages produced from nanocomposite films

A Review on the Application of Active Nanocomposites to Increase the Shelf Life of Foodstuffs

Mohammadyar Hosseini*, Sara Khedri, Hamed Hassanzadeh, Babak Ghanbarzadeh

*Assistant Professor, Food Science Department, Ilam University, Ilam, Iran

(Received: 28/12/2021; Accepted: 24/05/2022)

Abstract

Active packaging systems for food have more benefits and performance than conventional packaging which are designed only as a barrier to protect food against the external environment. Most active packages contain antimicrobial compounds. Since these particles may be swallowed with food when using active packaging, the food safety aspects should be considered and the migration of nanoparticles from packaging to food surfaces should be controlled. In addition, these particles can also cause respiratory and skin problems due to their ability to be released into the environment. Most active packaging systems contain antimicrobial compounds that are released at the food surface as microorganisms grow and multiply, therefore prevent the growth of germs and spoilage of food. The severity of this effect depends on the nature of the antimicrobial agent. Among these, nanocomposite systems have been designed with antibacterial properties which include antimicrobial agents at the nanoscale. They are able to expand the level involved in the reaction between food and antimicrobial components due to increasing surface to volume ratio. Therefore, these systems play a more effective role in increasing the shelf life of food compared to similar compounds.

Keywords: Active Packaging, Nanocomposite; Antimicrobial Properties of Nanoparticles.

*Corresponding Author E-mail: m.hosseini@ilam.ac.ir