کاربرد فناوری نانو در فرآوری، ایمنی و بسته‌بندی موادغذایی

طاهره نوایی دیوا*

استادیار، گروه شیمی، واحد سوادکوه، دانشگاه آزاد اسلامی، سوادکوه، ایران

*نویسنده مسئول: taherehnavaie@gmail.com

دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۸/۱۹، پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۴/۱۷

چکیده

نانوتکنولوژی به‌عنوان یک فناوری جدید و امیدوارکننده در بسیاری از زمینه‌ها ازجمله پزشکی، کشاورزی و صنایع غذایی معرفی شده است. برای صنایع غذایی، فناوری نانو به‌عنوان یک فناوری نوظهور در زمینه فرآوری، ایمنی و بسته‌بندی موادغذایی از اهمیت زیادی برخوردار است. به‌عنوان‌مثال، نانوتکنولوژی در فرآوری موادغذایی برای افزایش کیفیت کلی غذا ازجمله طعم، مزه، قابلیت جذب و افزایش عمر مفید محصول کمک می‌کند. با افزایش زمان ماندگاری و افزایش کیفیت بسته‌های خوراکی با استفاده از فناوری لایه نازک، فاسد شدن موادغذایی به تأخیر می‌افتد. با توجه به ایمنی موادغذایی، نانوتکنولوژی برای شناسایی عوامل بیماری‌زا و سموم در محصولات غذایی استفاده می‌شود. ازنظر بسته‌بندی، فناوری نانو با جلوگیری از تجزیه و از بین رفتن مواد مغذی، ایمنی و درنتیجه ماندگاری طولانی‌تر موادغذایی را تضمین می‌کند. بسته‌بندی فعال علاوه بر محافظت در برابر شرایط محیطی، نقش مهمی در حفظ موادغذایی دارد. علاوه بر این، فناوری نانو به‌طور گسترده در بسته‌بندی موادغذایی به‌عنوان یک ضدمیکروب و برای تولید بسته‌بندی هوشمند استفاده می‌شود. بااین‌حال، نانوذرات ممکن است خطر سمیت بالقوه‌ای برای سلامت انسان داشته باشند؛ بنابراین، ایجاد یک سیستم نظارتی کافی برای مدیریت خطرات بالقوه مرتبط با کاربردهای فناوری نانو توصیه می‌شود. سازمان همکاری و توسعه اقتصادی توصیه می‌کند که از دستورالعمل‌های تست استاندارد برای ارزیابی خطر نانومواد برای ایمنی شیمیایی استفاده شود. این بررسی، استفاده از فناوری نانو در فراوری، ایمنی و بسته‌بندی موادغذایی را پوشش می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: نانوفناوری، موادغذایی، فراوری، ایمنی، بسته‌بندی

مقدمه

نانو در زبان یونانی به معنی کوتوله است. در مجامع علمی نیز به‌عنوان یک مقیاس بسیار کوچک برای اندازه‌گیری به کار می‌رود. در واقع اگر یک متر، به یک میلیارد قسمت مساوی تقسیم شود، هر یک از آن قسمت‌ها، یک نانومتر است؛ بنابراین یک نانومتر، یک میلیاردم متر یا 10^{-9} متر است. به‌طور خاص، هنگامی‌که اندازه ذرات مواد از ابتدا به حدود ۱ تا ۱۰۰ نانومتر کاهش می‌یابد، خواص فیزیکی، شیمیایی، مکانیکی و یا حتی ترمودینامیکی مواد به دلیل نسبت سطح به حجم بالای آن‌ها تفاوت‌های قابل‌توجهی در مقایسه با مواد اولیه نشان می‌دهند. همین موضوع سبب شده است تا نانومواد پنجره‌ای نو به روی کاربردهایی پیشرفته و نوین در همه رشته‌ها خصوصاً صنایع غذایی، کشاورزی و پزشکی باز کنند (۴-۱). نگرانی فزاینده مصرف‌کنندگان در مورد کیفیت و ایمنی غذا و مزایای سلامتی، محققان را وادار می‌کند تا از نانوتکنولوژی به‌عنوان یک فناوری امیدوارکننده برای حل مشکلات از طریق راه‌حل‌های نوآورانه‌ای که به ایمنی، فراوری و بسته‌بندی موادغذایی مرتبط، استفاده کنند (۵). تقاضا برای مواد مبتنی بر نانوذرات در صنایع غذایی افزایش یافته است زیرا بسیاری از آن‌ها حاوی عناصر ضروری و غیرسمی و پایدار در دما و فشار بالا هستند (۷-۶) کاربردهای نانوتکنولوژی در موادغذایی را می‌توان در دو گروه اصلی ترکیبات نانوساختار موادغذایی و نانوحسگر موادغذایی تقسیم کرد. موادغذایی با

ترکیبات حاوی نانوساختار، محدوده وسیعی از فرآوری تا بسته‌بندی موادغذایی را در بر می‌گیرد. در فرآوری موادغذایی، این نانوساختارها را می‌توان به‌عنوان افزودنی‌های موادغذایی، حامل‌هایی برای تحویل هوشمند مواد مغذی و حمل ترکیبات فعال زیستی به ناحیه موردنظر، حمل آنتی‌بیوتیک‌ها، عوامل ضدمیکروبی، پرکننده‌ها برای بهبود استحکام مکانیکی و دوام مواد بسته‌بندی و غیره استفاده کرد. درحالی‌که نانوحسگرهای موادغذایی برای دستیابی به افزایش کیفیت و ایمنی موادغذایی به کار می‌روند (۸). از نانوکپسول‌ها و نانوذرات به‌منظور حفظ و نگهداری ویتامین‌ها، آنتی‌اکسیدان‌ها، داروها، آنزیم‌ها، نگهدارنده‌ها، آهن، مواد مغذی با ارزش و غیره استفاده می‌شود. مواد نانوساختار عمدتاً از نقاط کوانتومی[1]، نانومیله‌ها، نانوذرات، نانوسیم‌ها، نانوصفحه و غیره تشکیل شده‌اند و عمدتاً ساختارهای لایه‌ای، اتمی و سیمی دارند. نانوساختارها با استفاده از موادغذایی به سادگی از طریق تکنیک‌های لایه به لایه تولید می‌شوند . سه روش برای سنتز انواع نانومواد وجود دارد: ۱. روش فیزیکی: در این روش از نیروهای مکانیکی و تبخیر برای سنتز نانومواد استفاده می‌شود که شامل آسیاب کردن، امولسیون‌سازی اولتراسوند، همگن‌سازی و میکروسیال سازی می‌باشد.۲. روش شیمیایی: این روش‌ها نسبت به روش‌های فیزیکی مزایای خاصی دارند ازجمله: سادگی در عملیات، سنتز در دمای پایین (کمتر از ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد)، تبدیل آسان محصول مایع به لایه‌های نازک یا پودر خشک، گزینه‌های متنوع برای اشکال و اندازه‌های مختلف از نانوذرات و مواد معدنی مفید در طول سنتز.۳. روش بیولوژیکی: این روش به دلیل مزایایی مانند بی‌خطر بودن، عدم استفاده از مواد شیمیایی سمی، سازگار بودن با محیط‌زیست، ارزان بودن، تکرارپذیری در تولید، مقیاس‌بندی آسان و مورفولوژی، توجه منحصربه‌فردی را در بین محققان به خود جلب کرده است. در بیوسنتز، نانوذرات توسط عصاره‌های گیاهی و میکروارگانیسم‌هایی مانند باکتری‌ها، قارچ‌ها، مخمرها و غیره تولید می‌شوند (۱۰-۹). نانوذرات تهیه شده با روش سنتز با واسطه عصاره گیاهی برای فعالیت‌های آنتی‌اکسیدانی، خواص ضدباکتریایی، کاربردهای سمیت سلولی آزمایشگاهی، فعالیت ضدسرطانی، در درمان فتودینامیک و در درمان هیپرترمی[2] تومور مورد مطالعه قرار می‌گیرند (۱۲-۱۱). هر یک از روش‌های سنتز منحصربه‌فرد نانوذرات مزایا و معایب خاص دارد. نانومواد تولید شده با هر تکنیکی توجه گسترده‌ای را در صنایع غذایی به خود جلب کرده و کاربردهای ویژه پیدا می‌کنند که ذخیره‌سازی موادغذایی، غنی‌سازی موادغذایی و همچنین تحویل مطمئن اجزای زیست‌فعال و عملکردی را تسهیل می‌کند. هدف از این تحقیق، بررسی کاربرد فنّاوری نانو در صنعت فراوری، بسته‌بندی و ایمنی موادغذایی می‌باشد.

فناوری نانو در فراوری موادغذایی

فراوری موادغذایی، به عملیاتی گفته می‌شود که بر روی ماده غذایی خام برای ایمن‌تر و خوش‌طعم‌تر شدن غذاهای موردنیاز مصرف‌کنندگان صورت می‌گیرد. اغلب مواد خام، فسادپذیر بوده و به حمل‌ونقل دقیق یا فرایند نیاز دارند تا از بین نروند. غذاهای تازه‌ای که از مزرعه، اقیانوس، دریاچه یا سایر منابع به دست می‌آیند، تنها در فصول خاصی وجود دارند که استفاده از آن‌ها را محدود می‌سازد. غذاهای فرآوری شده محصولاتی هستند که امکان نگهداری آن‌ها وجود داشته و مانند غذاهای تازه و مواد خامی که از آن تهیه شده‌اند، به سرعت فاسد نمی‌شوند. برخی از واحدهای عملیاتی در بسیاری از فرایندهای غذایی متداول هستند. این مراحل شامل، کنسرو کردن، انجماد، خشک‌کردن، پرتودهی و پاستوریزه‌کردن و... از زمان تخلیه ماده خام شروع شده و تا زمانی که محصولات بسته‌بندی شده به محل فروش منتقل شوند، ادامه می‌یابد.

پیشرفت‌های نانوتکنولوژی در فرآوری موادغذایی عمدتاً بر بهبود بافت غذا، محصور کردن افزودنی‌ها یا موادغذایی، ایجاد مزه‌ها و احساسات جدید، تنظیم آزادسازی طعم و افزایش دسترسی زیستی محتوای مواد مغذی متمرکز است (۱۳). آنتی‌اکسیدان‌ها، ضدمیکروب‌ها، ویتامین‌ها، طعم‌دهنده‌ها، رنگ‌ها و نگهدارنده‌ها ازجمله بسیاری از

[1] Quantum Dots (QDs)

[2] Hyperthermia

عناصر کاربردی مورد استفاده در صنایع غذایی هستند. در طول فراوری، ذخیره‌سازی و استفاده موادغذایی، این اجزای عملکردی باید از تخریب محافظت شوند. برای اینکه بدن ما بتواند از انتشار اجزای غذا در آن سود ببرد، ماده مغذی باید به محل خاصی از بدن رفته و وقتی به آنجا رسید فعال شود. کنترل و مهندسی انتشار مواد مغذی در بدن یکی از زمینه‌های تحقیقاتی نانوفناوری است. این موادغذایی که (غذا - دارو نامیده می‌شوند) اجزای فعالشان توسط نانوکپسول در بدن توزیع می‌گردد؛ زیرا یکی از راه‌های حفظ یک جزء فعال غذایی، قرار دادن آن در یک پوشش محافظ است .فرآیند نانوکپسوله کردن به این معناست که این امکان وجود دارد که موادغذایی مفید برای بدن بدون اینکه در فرآیند ساخت در کارخانه یا هنگام پخت در آشپزخانه و یا توسط آنزیم‌های دهان و معده از بین بروند این کپسول‌ها به‌طور مستقیم وارد جریان خون شده و درنتیجه جذب بدن شوند. این پوشش را می‌توان طوری طراحی کرد که با تحریک شدن توسط محرک مناسبی حل شده و ماده فعال داخل آن از طریق پوشش انتشار یابد. این کار حتی مانع از دفع بدون جذب ویتامین‌های موادغذایی می‌شود. یکی دیگر از کاربردهای نانوکپسوله کردن این است که موادغذایی مفید ولی با طعم‌های نامطبوع مانند روغن ماهی را می‌توان از طریق این کپسول‌ها بدون احساس مزه ناخوشایند به غذا اضافه کرد. به‌عنوان‌مثال موسسه غذایی جورج و ستون[1] در استرالیا نوعی نان به نام نان تیپ تاپ اپ[2] تولید کرده که حاوی روغنی از اسید چرب امگا ۳ حاصل از ماهی تن می‌باشد؛ اما روغن ماهی تن در داخل میکروکپسول قرار داده شده است و بنابراین مصرف‌کننده طعم روغن ماهی را حس نمی‌کند و فقط وقتی این روغن به معده رسید و کپسول هضم شد، آزاد می‌شود. با استفاده از نانوکپسول از جنس پلیمر خوراکی می‌توان مزه و بوی مولکول‌های غذا را از تخریب تدریجی حفظ نمود و با این روش مدت‌زمان ماندگاری محصول را افزایش داد. یکی از نانوساختارهای پرکاربرد در صنعت که قابلیت صنعتی شدن را نیز دارد نانوالیاف پلیمری هستند. نانوالیاف گستره متنوعی از نانومواد رشته‌ای شکل هستند که در جامع‌ترین تعریف، قطر آن‌ها نانومتری است. ساختارهای نانوالیاف به دلیل خصوصیات منحصربه‌فرد و کاربردهای فراوانی که دارند در صنایع غذایی بسیار مورد توجه قرارگرفته‌اند. روش‌های مختلفی برای تولید چنین ساختارهای نانوالیاف استفاده می‌شود. از میان این روش‌ها الکتروریسی[3] ساده‌ترین روشی می‌باشد که می‌تواند الیافی بسیار ظریف و پیوسته از مواد مختلف مانند پلیمرها در حالت محلول و در حالت مذاب تهیه کند. قطر چنین الیافی در محدوده میکرومتر تا چندین نانومتر است. ابعاد کوچک این الیاف منجر به افزایش نسبت سطح به حجم آن‌ها می‌شود. با استفاده از این روش می‌توان اندازه و شکل الیاف و حتی تخلخل زیرلایه حاصل شده از الیاف را به خوبی کنترل کرد و مواد مختلف را در آن‌ها جای داد. مساحت سطح ویژه بالا و وزن کم از ویژگی‌های اصلی نانوالیاف به‌کاررفته در این ساختار است که منجر به بهبود ماندگاری مواد خوراکی می‌شود. ساختار متخلخل نانوالیاف امکان تنفس بهتر موادغذایی را فراهم می‌کند و مانع از تجمع بخار آب در لایه داخلی پوشش می‌شود. نانوالیاف می‌توانند از مواد پلیمری مختلفی تهیه شوند که هر کدام ویژگی‌ها و کارکردهای خاص خود را دارند. یکی دیگر از کاربردهای کلیدی فناوری نانو استفاده از افزودنی‌هایی است که به راحتی در بدن جذب می‌شوند و ماندگاری کالاها را طولانی‌تر می‌کنند .کلوئیدهای نانوذرات، امولسیون‌ها و کپسول‌های بسته‌بندی شده نانو ته‌نشین نمی‌شوند و درنتیجه عمر محصول و عمر ذخیره‌سازی بیشتر می‌شود. پردازش خشک، همگن‌سازی با فشار بالا یا میکروسیال سازی و امولسیون‌سازی اولتراسونیک تکنیک‌هایی هستند که در روش از بالا به پایین برای آماده‌سازی نانوذرات برای ساخت سس‌های سالاد، ماست‌ها، خامه‌ها، شکلات، شربت‌ها و نوشیدنی‌های مالت‌دار و همچنین مواد پرکننده، امولسیون‌های روغنی طعم‌دهنده و آیسینگ[4] استفاده می‌شوند (۱۶-۱۴).

[1] George and Seton Food Institute
[2] Top-up bread
[3] Electrospinning
[4] Icing

فنـــاوری نـــانو در بســـته‌بندی و نگهـــداری موادغذایی

در سال‌های اخیر با توجه به افزایش جمعیت، نیـاز بـه ارائـه موادغذایی تازه و با کیفیت رو به افزایش است. ایـن موضـوع نیازمند استفاده از روش‌های جدید برای نگهداری محصولات با کیفیت بالا و زمـان مانـدگاری مناسـب می‌باشـد. سـازمان بسـته‌بندی جهـانی[1] تخمـین زد کـه بـیش از ۲۵ درصـد از موادغذایی به خاطر بسته‌بندی نامناسب به هدر مـی‌رود (۱۷ و ۱۸). با توجه به هزینه‌ی بالای تولید و تهیه منابع سـالم و کافی غـذایی، افـزایش زمـان مانـدگاری موادغـذایی، حفـظ موادغذایی از هرگونه آلودگی خارجی، ایجاد یک محـیط بـه دور از اتمسفر، نور و میکروارگانیسم‌های خارجی امری بسیار ضروری و مهم است. اهمیت این موضوع به‌منظور تولید مواد با کمترین هزینـه و بیشـترین ارزش غـذایی اسـت. ماهیـت نفوذپذیر و متخلخل مواد بسته‌بندی سنتی موادغـذایی یـک نقص اساسی است. هیچ ماده بسته‌بندی که به‌طور کامـل در برابر بخار آب و سایر گازهای محیطی غیرقابـل نفـوذ باشـد، وجود ندارد (۱۷ و ۱۸). راه‌هـای مختلفـی بـرای جلـوگیری از فساد موادغذایی وجود دارد کـه از آن جملـه می‌تـوان بـه استفاده از مواد نگهدارنده و همچنین بسته‌بندی موادغـذایی اشاره کرد. به هنگام استفاده از مـواد نگهدارنـده، مجبـور بـه اضافه نمودن مواد شیمیایی به موادغذایی هستیم تا مـانع از رشد میکروارگانیسم‌ها شویم. بهترین روش برای حفاظـت از فسـاد موادغـذایی اسـتفاده از بسـته‌بندی‌های اصـولی و بهداشتی است. کاربرد انـواع بسـته‌بندی محصـولات غـذایی مختلف روز به روز در حـال گسـترش اسـت. عـلاوه بـر ایـن بهبـود روش‌هـای نگهـداری موادغـذایی می‌توانـد منجـر بـه افزایش صادرات این محصـولات و درنتیجـه رشـد اقتصـادی کشور شـود. امـروز پـس از گذشـت ۵ هـزار سـال از تـاریخ نگهـــداری از موادغـــذایی محققـــان در تلاشـــند تـــا از تکنولوژی‌های جدیـد ماننـد تکنولـوژی نـانو در بسـته‌بندی مدرن موادغـذایی اسـتفاده کننـد تـا کیفیـت و طـول عمـر موادغذایی را افزایش دهند. این بسته‌بندی‌ها را می‌تـوان بـه سه دسته مختلف تقسیم نمـود: دسـته اول بسـته‌بندی‌های فعال که حاوی موادی با عملکردی خاص هستند (شـبیه بـه بسته‌بندی‌هایی که از ورود اکسیژن و فسـاد غـذا جلـوگیری می‌کنند)؛ اما دسته دوم بسته‌بندی‌های هوشمند است که به تغییرات محـیط واکـنش نشـان می‌دهنـد (مثـل شناسـایی پاتوژن‌ها)؛ دسته سوم بسته‌بندی‌های بهبودیافته هستند.

فناوری نانو در بسته‌بندی فعال

بسته‌بندی فعال، نوع جدیدی از بسته‌بندی موادغذایی اسـت که با غذا و محیط اطراف ارتباط برقرار می‌کنـد و عـلاوه بـر اینکه یک سپر بی‌اثر در برابر شرایط محیطی ارائـه می‌دهـد، نقش مهمی در تقویـت خـواص مکـانیکی و حرارتـی، حفـظ کیفیت موادغذایی در مدت‌زمان نگهداری و کاهش هزینـه‌ها دارد. این بسته‌بندی‌ها بـا آزاد کـردن مـواد شـیمیایی مفیـد مانند مواد ضـدمیکروبی بـرای جلـوگیری از رشـد و کـاهش میکروارگانیسم‌ها یا آنتی‌اکسیدان و یا بـه‌عنوان جـاذب گـاز عمـل می‌کننـد .ضـدمیکروبی‌ها، جاذب‌هـای اکسـیژن و تکنیک‌های بی‌حرکتی آنزیم‌ها تنهـا تعـدادی از فناوری‌هـای بسته‌بندی هستند که به دلیل چنین فعل و انفعالی، پایداری غذا را بهبود می‌بخشند. در ایـن بـین، اسـتفاده از نـانوذراتی ماننـد مـس، اکسـید مـس، نقـره، اکسـید نقـره، دی‌اکسـید تیانیوم، اکسید منیزیم و نانولوله‌های کربنـی کـه در ارتبـاط مستقیم با غذا یا محیط اطـراف آن خـواص ضـدمیکروبی را نشـان می‌دهنـد؛ متـداول می‌باشـند. نـانوذرات کـربن و نانولوله‌های کربنـی در پلیمـر بسـته‌بندی قـادر اسـت بـوی انتشـاریافته درون بسـته‌بندی را بـه خـود جـذب کنـد. بسته‌بندی فعال کـه بیشـتر بـرای برنامـه‌های ضـدمیکروبی توسعه یافته است، امیدهای زیـادی را بـرای ایمنـی، بهبـود کیفیت و عمر مفید محصـولات غـذایی ایجـاد نمـوده اسـت (۱۹).

فناوری نانو در بسته‌بندی هوشمند

بر اساس تعریف یک بسـته‌بندی اگـر دارای توانـایی ردیـابی فرآورده، حس‌کردن محیط داخلی و خـارجی بسـته و سـایر ملاحظـات باشـد، هوشـمند اسـت. بسـته‌بندی هوشـمند اصـطلاحی اسـت کـه بـرای نشـان دادن بسـته‌بندی بـا قابلیت‌های ویژه‌ای استفاده می‌شود که ازجمله این قابلیت‌ها

[1] World Packaging Organization (WPO)

این است که می‌توانند بر وضعیت موادغذایی بسته‌بندی شده یا محیط موادغذایی داخل بسته‌بندی را که شامل: دما، pH و غیره می‌شود نظارت کنند و اطلاعات مربوط به آن‌ها را در اختیار کاربر قرار دهند. بسته‌بندی هوشمند دستگاهی است که قادر به انجام عملکردهای هوشمندانه نظیر تشخیص، حس‌کردن، ثبت‌کردن، ردیابی، ارتباط و کاربرد منطق علمی به‌منظور تسهیل تصمیم‌گیری در جهت افزایش زمان ماندگاری، افزایش ایمنی، بهبود کیفیت، فراهم کردن اطلاعات و هشدار درباره مشکلات احتمالی است. بسته‌بندی فعال، شامل مکانیزم‌هایی برای بهبود پایداری موادغذایی است؛ مانند حذف عوامل مضر یا رهاسازی اجزایی که پایداری غذا را افزایش می‌دهد. برخلاف سایر بسته‌بندی‌ها فناوری سیستم‌های بسته‌بندی هوشمند معمولاً به‌طور مستقیم ماندگاری موادغذایی را افزایش نمی‌دهند، بلکه اطلاعات مربوط به کیفیت موادغذایی را به ذینفعان زنجیره تأمین موادغذایی منتقل می‌کنند. بسته‌بندی هوشمند را می‌توان به‌عنوان یک تکنیک بسته‌بندی حاوی یک نشانگر خارجی یا داخلی برای بیان کیفیت و تاریخچه محصول تعریف کرد (۲۱-۲۰). سیستم‌های هوشمند را می‌توان به سه دسته طبقه‌بندی کرد. حسگرها، نشانگرها و سیستم‌های شناسایی فرکانس رادیویی[1] که مهم‌ترین نشانگرها شامل نشانگر زمان- دما، اکسیژن، دی‌اکسیدکربن، تازگی و نشانگر نشت هستند و از انواع حسگر می‌توان به حسگر شیمیایی، حسگر زیستی و حسگرهای اکسیژن مبتنی بر فلورسانس اشاره کرد. از مهم‌ترین کاربردهای فناوری بسته‌بندی هوشمند موادغذایی می‌توان به نشانگر نشت برای تشخیص هرگونه شکستگی و نشتی در بسته‌بندی استفاده کرد و از نشانگرهای کیفیت و ایمنی محصولات از نشانگرهای زمان - دما، رشد میکروبی، دستگاه‌های سنجش گاز، تشخیص پاتوژن، دستگاه‌های ردیابی، برچسب‌های شناسایی فرکانس رادیویی برای اصالت محصول و جلوگیری از جعل و سرقت استفاده کرد. این نوع از بسته‌بندی تولیدکننده، فروشنده و مصرف‌کننده را از وضعیت محصول در مورد شرایط غذا یا محیط اطراف آن آگاه ساخته و قابلیت شناسایی مواد شیمیایی، میکروارگانیسم‌های بیماری‌زا و سموم مختلف را در موادغذایی دارد. به‌عنوان‌مثال بسته‌بندی موادغذایی به همراه نانو حسگرها یا نانوکپسول‌ها می‌توانند فساد ناشی از میکروارگانیسم‌ها را با تغییر رنگ مشخص کند؛ یا در مواقع موردنیاز با آزاد کردن مواد نگهدارنده از فساد محصول غذایی جلوگیری کند. در حال حاضر، بسته‌بندی هوشمند کاربردهای گسترده‌تری نسبت به بسته‌بندی فعال دارد (۲۴-۲۲).

فناوری نانو در بسته‌بندی بهبودیافته

با وجود پیشرفت‌های فراوانی که در علم تغذیه به وجود آمده، هم چنان خطر آلودگی با میکروارگانیسم‌ها مثل کپک، باکتری و ویروس وجود دارد که سلامت انسان را تهدید می‌کند. ازآنجایی‌که به کار بردن مستقیم مواد ضدمیکروبی در غذاها می‌تواند برای سلامت مصرف‌کنندگان مضر باشد، بسته‌بندی‌های ضدمیکروبی از اهمیت زیادی برخوردار شده است. یکی از این بسته‌بندی‌ها، بسته‌بندی بهبودیافته است که شامل زنجیره‌های پلیمری به همراه ۵ درصد وزنی از نانوذرات و نانوکامپوزیت‌ها است که در محصولاتی مانند بطری‌های نوشیدنی گازدار، فیلم‌ها و روغن‌های خوراکی استفاده می‌شود. در واقع نانوذراتی که در بسته‌بندی‌های بهبودیافته به کار می‌روند، سبب افزایش انعطاف‌پذیری، افزایش ممانعت از ورود و خروج گازها و افزایش پایداری حرارتی و رطوبتی پلیمرهای تشکیل شده از آن‌ها می‌شوند (۲۶-۲۵).

ایمنی موادغذایی

ایمنی موادغذایی به معنی حصول اطمینان از اینکه موادغذایی در هنگام حمل و آماده‌سازی و نگهداری، آلودگی‌های میکربی و شیمیایی و فیزیکی پیدا نمی‌کنند و سبب بیماری مصرف‌کنندگان نمی‌شوند. علی‌رغم پیشرفت‌های فناوری در زمینه‌های نگهداری موادغذایی، بهداشت و مقررات، ایمنی موادغذایی همچنان یک نگرانی عمومی بزرگ در سطح ملی و بین‌المللی است (۲۸ -۲۷). پاتوژن‌ها و سموم موجود در غذا می‌توانند باعث بیماری‌های ناشی از غذا شوند و خطرات جدی برای سلامت انسان ایجاد

[1] Radio frequency identification systems (RFID)

کنند (۲۷). در ایالات‌متحده، تخمین زده می‌شود که بیماری‌های ناشی از غذا سالانه باعث تقریباً ۹/۴ میلیون بیماری می‌شوند (۲۹). بر اساس گزارش مرکز کنترل و پیشگیری از بیماری[1] در سال ۲۰۱۳، حدود ۸۱۸ شیوع بیماری ناشی از غذا وجود داشت که منجر به ۱۳۳۶۰ بیماری، ۱۰۶۲ بستری شدن در بیمارستان و ۱۶ مرگ در ایالات‌متحده شد (۳۰). در همین حال، داده‌های سیستم نظارت بر شیوع بیماری‌های منتقله از طریق غذا[2] دریافت شده برای دوره ۲۰۱۵-۲۰۰۹ نشان داد که ۵۷۶۰ شیوع بیماری ناشی از غذا ثبت شده و منجر به ۱۰۰۰۳۹ بیماری، ۵۶۹۹ بستری شدن در بیمارستان، ۱۴۵۰ مرگ در همه ۵۰ ایالت شده است. بدیهی است که صنایع غذایی باید دارای یک سیستم قوی برای شناسایی و تشخیص عوامل بیماری‌زا، ازجمله باکتری‌ها، ویروس‌ها، قارچ‌ها و هرگونه آلاینده بالقوه در محصولات غذایی یا سطوح تماس با غذا باشد. این هدف همچنان آرزوی اصلی جامعه علمی و محققان است. روش‌های تشخیص سریع آلاینده‌ها که ارزان، دقیق هستند و به کارگران کمتری با مهارت‌های آموزشی کمتر نیاز دارند، برای صنایع غذایی ضروری هستند. بااین‌حال، روش‌های تشخیص سنتی و تکنیک‌های مولکولی سریع که برای شناسایی و تشخیص میکروارگانیسم‌ها یا سموم بیماری‌زا استفاده می‌شوند، گران هستند و به زمان و کار نیاز دارند. مهم‌تر از آن، چنین روش‌های سنتی می‌توانند نادرست باشند یا در معرض خودآلودگی در طول پردازش باشند (۲۸، ۳۱). امروزه کاربردهای نانوتکنولوژی در صنایع غذایی گسترش یافته و نقش مهمی در تمامی جنبه‌های این بخش ایفا می‌کند، با توجه به ایمنی موادغذایی، فناوری نانو ابزارها و تکنیک‌های مختلفی را ارائه می‌دهد که می‌تواند مسائل ایمنی موادغذایی ازجمله تشخیص میکروبی و سموم، افزایش عمر مفید و بهبود در بسته‌بندی موادغذایی را حل کند. رویکردهای نانوتکنولوژی در ایمنی موادغذایی بر روی خواص ضدمیکروبی نانوذرات و نانوحسگرها برای تشخیص پاتوژن‌های غذایی و سایر آلاینده‌ها متمرکز شده است (۲۷، ۳۰،۳۲). در صنایع فرآوری موادغذایی از نانوذرات برای تقویت پایداری و حفظ رنگ موادغذایی استفاده می‌شود. نانوذرات سیلیکات می‌توانند از جریان اکسیژن در ظروف بسته‌بندی جلوگیری کرده و نشت رطوبت را محدود کنند. این امر تضمین می‌کند که غذا برای مدت طولانی‌تری تازه باقی بماند. چندین نانوذره نیز می‌توانند به‌طور انتخابی به عوامل بیماری‌زا متصل شوند و در طی فرآیند به‌طورکلی حذف شوند. بااین‌حال، نانوذرات معدنی، در غلظت‌های کم فعالیت ضدباکتریایی قوی نشان می‌دهند و در شرایط حاد پایدارتر هستند؛ بنابراین، اخیراً تولیدکنندگان به استفاده از این نانوذرات در بسته‌بندی‌های ضدمیکروبی موادغذایی علاقه بسیاری نشان داده‌اند. مطالعات همچنین نشان داد که ترکیب نانوذرات مختلف مانند نقره، طلا، روی، کیتوزان، پلاتین، آهن، نانولوله‌های کربنی با روغن‌های ضروری مشتقات طبیعی، اثرات ضدمیکروبی هم‌افزایی در برابر پاتوژن‌های مختلف موادغذایی ایجاد می‌کند که قوی‌تر از نانوذرات به‌تنهایی یا اسانس‌ها به تنهایی است (۳۵-۳۳).

نانوتکنولوژی همچنین می‌تواند برای سطوح در حذف یا غلبه بر رشد بیوفیلم‌ها با استفاده از پوشش‌های ضدمیکروبی استفاده شود (۲۷، ۳۴). نانوذرات می‌توانند مانع از تشکیل بیوفیلم شوند. معمولاً باکتری‌ها به سطوح متصل می‌شوند و یک بیوفیلم تشکیل می‌دهند. این بیوفیلم متشکل از تجمع پیچیده‌ای از میکروارگانیسم‌ها است که روی‌هم قرار می‌گیرند تا یک بیوفیلم سخت بر روی سطوح، ازجمله سطوح در تماس با غذا، تشکیل دهند. حذف بیوفیلم‌ها معمولاً آسان نیست زیرا در برابر بیشتر عوامل ضدعفونی‌کننده مقاوم هستند؛ بنابراین، چنین بیوفیلمی به منبع آلودگی محصولات غذایی تبدیل می‌شود که می‌تواند منجر به بیماری‌های منتقله از غذا شود (۳۶). در این راستا، سطوح نانومهندسی با پوشش‌های ضدمیکروبی یکی از قوی‌ترین عوامل ضدمیکروبی در برابر بیوفیلم‌ها هستند و درنتیجه ایمنی سطوح تماس با غذا و همچنین ایمنی و کیفیت خود محصولات غذایی را بهبود می‌بخشند. برای این منظور از پوشش‌های نانو مانند نقره در مقیاس نانو، تیتانیم اکسید و روی اکسید به‌عنوان مواد ضدعفونی‌کننده سطوح در صنایع غذایی استفاده می‌شود (۳۴). علاوه بر این، تیتانیم اکسید فعال شده با اشعه فرابنفش UV-C در کنترل

[1] Centers for Disease Control and Prevention (CDCP)
[2] Foodborne Disease Surveillance System (FDOSS)

مسائل آلودگی زیستی در عملیات طیور، فرآوری موادغذایی و حمل‌ونقل موادغذایی مؤثر است (۳۷). درنهایت، نانوتکنولوژی و به‌طور خاص، با استفاده از پوشش‌های نانومواد ضدمیکروبی، پتانسیل ارائه راه‌حلی برای مسائل آلودگی سطحی در صنایع غذایی با جلوگیری از چسبندگی میکروبی و تشکیل بیوفیلم‌ها را دارد. در حوزه میکروبیولوژی غذایی، از نانوحسگرها به‌طور مؤثر برای هشدار به مصرف‌کنندگان و توزیع‌کنندگان در مورد وضعیت ایمنی موادغذایی استفاده می‌شود، زیرا دقیقاً می‌توانند حضور هر گونه عوامل بیماری‌زا را در موادغذایی نشان دهند. نانوحسگرها تغییرات جزئی مانند رطوبت، دما و آلودگی میکروبی را که ممکن است در محیط ذخیره‌سازی (مثل انبارها) سبب تخریب محصول شود، نشان می‌دهند. بسیاری از نانوساختارها (نانومیله‌ها، نانوذرات و نانوالیاف) به‌عنوان حسگرهای زیستی استفاده می‌شوند. بااین‌حال، حسگرهای زیستی مبتنی بر پایه نانولوله کربنی به دلیل تشخیص سریع، سادگی و مقرون‌به‌صرفه بودن، کارایی بیشتری دارند . در سال‌های اخیر، ظهور کاربردهای نانوتکنولوژی در حوزه ایمنی موادغذایی، ازجمله تکنیک‌های تشخیص و دستگاه‌های نانوحسگر، اهمیت بیشتری برای محققان پیدا کرده است و توجه بیشتری را از سوی صنایع غذایی و عموم مردم برای تشخیص سریع پاتوژن‌ها یا انواع دیگر آلاینده‌ها به خود جلب کرده است (۲۸). نانوحسگرها یکی دیگر از کاربردهای امیدوارکننده برای تشخیص میکروب‌های بیماری‌زا ازجمله ویروس‌ها و باکتری‌ها و همچنین آلاینده‌های شیمیایی در موادغذایی هستند (۳۸). برای این منظور، حسگرهای زیستی متعددی برای شناسایی پاتوژن‌های موجود در موادغذایی ازجمله لیستریا مونوسیتوژنز[1]، ایکولای[2] و سالمونلا[3] که شایع‌ترین پاتوژن‌های منتقله از غذا هستند که علاوه بر مایکوتوکسین‌ها[4] با آلودگی موادغذایی مرتبط هستند، توسعه یافته‌اند (۴۰-۳۹). مشابه نانوذرات ضدمیکروبی، نانوحسگرها در تشخیص میکروارگانیسم‌های بیماری‌زا و متابولیت‌های سمی آن‌ها سریع‌تر، قابل‌اعتمادتر و مختصرتر از روش‌های تشخیص مرسوم هستند. این امر به‌ویژه برای حسگرهای زیستی با ذرات رنگ فلورسنت که به آنتی‌بادی‌های روی نانوآرایه‌های سیلیکونی/طلا می‌چسبند صادق است. برای این منظور، محققان نانوحسگرهای مختلفی را با استفاده از نانوذرات فلزی، نانوذرات کربن، نانوذرات مغناطیسی یا نقاط کوانتومی کادمیوم برای شناسایی پاتوژن‌های خاص غذایی یا متابولیت‌های سمی آن‌ها و همچنین تشکیل بیوفیلم توسعه داده‌اند (۳۱). از این نقطه می‌توان گفت که فناوری نانو به دلیل خواص ضدمیکروبی قوی و پتانسیل آن برای غلبه بر چالش‌های ایمنی موادغذایی در بخش موادغذایی، نقش فوق‌العاده‌ای در ایمنی موادغذایی ایفا می‌کند.

نتیجه‌گیری

نانوتکنولوژی به‌عنوان علمی نوین، از طریق کاربردهایی که به تمام بخش‌های صنایع غذایی ازجمله فرآوری، ایمنی و بسته‌بندی موادغذایی رسیده است، امکانات بالقوه‌ای را برای بهبود کیفیت و امنیت موادغذایی، ثبات و پایداری و هم‌چنین ایمنی آن‌ها فراهم آورده است. البته، در طراحی سیستم‌های نانویی باید دقت شود تا هم سازگار با محیط‌زیست باشند و هم اثر سمی روی غذا نداشته باشند. فرآوری غذا شامل فرآیندهایی است که برای تغییر پارامترهای ظاهری، کیفیت احساسی و نگهداری موادغذایی انجام می‌گیرد تا با کمک این روش‌ها و تکنیک‌ها موادغذایی خام تبدیل به حالتی شود که موردعلاقه مصرف‌کننده است. این تکنیک‌ها به‌گونه‌ای طراحی شده‌اند که طعم و کیفیت غذا دست‌نخورده باقی بماند، اما از هجوم میکروارگانیسم‌ها که منجر به فساد غذا می‌شود نیز محافظت شوند. در زمینه ایمنی موادغذایی، کاربردهای نانوتکنولوژی به‌عنوان عوامل ضدمیکروبی برای سطوح تماس موادغذایی، بسته‌بندی موادغذایی و پوشش‌ها به کار گرفته شده است. امروزه فناوری نانو در صنایع غذایی از طریق کاربرد آن در تشخیص عوامل بیماری‌زا و سموم و با ارائه اطلاعات در مورد وضعیت تغذیه، به افزایش ایمنی محصولات غذایی کمک می‌کند. فناوری نانو در بسته‌بندی موادغذایی این پتانسیل را دارد که

[1] *Listeria monocytogenes*
[2] *Escherichia coli (E. coli)*
[3] *Salmonella*
[4] Mycotoxins

روش بسته‌بندی موادغذایی را تغییر دهد. امروزه بسته‌بندی موادغذایی گذشته از حفظ فیزیکی موادغذایی در برابر آلودگی‌ها و راحتی توزیع، می‌تواند در راستای رصد ماده غذایی از کارخانه تا زمانی که به دست مصرف‌کننده می‌رسد، مورد استفاده قرار گیرد. درنتیجه، کاربردهای نانوتکنولوژی در بسته‌بندی موادغذایی امیدوارکننده است، زیرا می‌تواند ایمنی، کیفیت و ماندگاری محصولات غذایی را افزایش دهد.

References

1. Dera MW, Teseme WB, Mulugeta Wegari Dera WB. Review on the application of food nanotechnology in food processing. Am. J. Eng. Technol. Manag. 2020; 5:41-7.
2. Duncan TV. Applications of nanotechnology in food packaging and food safety: barrier materials, antimicrobials and sensors. J Colloid Interface Sci. 2011; 363(1):1–24.
3. Berekaa MM. Nanotechnology in food industry; advances in food processing, packaging and food safety. Int J Curr Microbiol Appl Sci. 2015; 4(5):345–57.
4. Nile SH, Baskar V, Selvaraj D, Nile A, Xiao J, Kai G. Nanotechnologies in Food Science: Applications, Recent Trends, and Future Perspectives. Nanomicro Lett. 2020;12(1):45.
5. Mohammad ZH, Ahmad F, Ibrahim SA, Zaidi S. Application of nanotechnology in different aspects of the food industry. Discov Food. 2022; 2: 12.
6. Roselli M, Finamore A, Garaguso I, Britti MS, and Mengheri E. Zinc oxide protects cultured enterocytes from the damage induced by *Escherichia coli*. J. Nutri. 2003; 133: 4077–4082.
7. Sawai J. Quantitative evaluation of antibacterial activities of metallic oxide powders (ZnO, MgO and CaO) by conductimetric assay. J. Microbiol. Method.2003; 54: 177–182.
8. Ezhilarasi P N, Karthik P, Chhanwal N, and Anandharamakrishnan C. Nanoencapsulation techniques for food bioactive components: a review. Food Bioprocess Technol. 2013; 6: 628–647.
9. Bansal V, Bharde A, Ramanathan R, Bhargava SK. Inorganic materials using ‘unusual ’microorganisms. Advances In Colloid and Interface Science. 2012; 179:150-68.
10. Kulkarni SK, Synthesis of nanomaterials—III (Biological methods). In Nanotechnology: Principles and Practices. Springer, Cham. 2015; 111-123.
11. Sankar R, Karthik A, Prabu A, Karthik S, Shivashangari KS, Ravikumar V. Origanum vulgare mediated biosynthesis of silver nanoparticles for its antibacterial and anticancer activity. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces. 2013; 1:108:80-4.
12. Reddy NJ, Vali DN, Rani M, Rani SS. Evaluation of antioxidant, antibacterial and cytotoxic effects of green synthesized silver nanoparticles by Piper longum fruit. Materials Science and Engineering: C. 2014; 1; 34:115-22.
13. Abbas K, Saleh A, Mohamed A, Mohd Azhan N. The recent advances in the nanotechnology and its applications in food processing: a review. Food Agric Environ. 2009; 7 (3-4): 14–17.
14. Singh H. Nanotechnology applications in functional foods; opportunities and challenges. Prev. Nutr. Food Sci.2016; 21 (1): 1.
15. Pathakoti K, Manubolu M, Hwang HM. Nanostructures: current uses and future applications in food science. J. Food Drug Anal. 2017; 25 (2): 245–253.
16. Kentish S, Wooster T, Ashokkumar M, Balachandran S, Mawson R, Simons L. The use of ultrasonics for nanoemulsion preparation. Innovat. Food Sci. Emerg. Technol. 2008; 9 (2):170–175.
17. Sharma C, Dhiman R, Rokana N, Panwar H. Nanotechnology: an untapped

28. Gómez-Arribas LN, Benito-Peña E, Hurtado-Sanchez MD, Moreno-Bondi MC. Biosensing based on nanoparticles for food allergens detection. Sensors. 2018; 18(4):1087.
29. Dewey-Mattia D, Manikonda K, Hall AJ, Wise ME, Crowe SJ. Surveillance for foodborne disease outbreaks—United States, 2009–2015. MMWR Surveillance Summaries. 2018; 67(10):1.
30. Dewey-Mattia D, Manikonda K, Hall AJ, Wise ME, Crowe SJ. Surveillance for foodborne disease outbreaks—United States, 2009–2015. MMWR Surveillance Summaries. 2017; 67(10):1.
31. Grumezescu AM, Holban AM, editors. Impact of nanoscience in the food industry. Academic Press; 2018 Jan 20.
32. Kumar A, Pratush A, Bera S. Significance of nanoscience in food microbiology: current trend and future prospects. In: Nanotechnology for advances in medical microbiology. Singapore: Springer. 2021;249–67.
33. Nasr NF. Applications of nanotechnology in food microbiology. Int J Curr Microbiol App Sci. 2015;4(4):846–53.
34. Nile SH, Baskar V, Selvaraj D, Nile A, Xiao J, Kai S. Nanotechnologies in Food Science: Applications, Recent Trends, and Future Perspectives. Nano-Micro Lett.2020; 12: 45.
35. Morsy MK, Khalaf HH, Sharoba AM, El-Tanahi HH, Cutter CN. Incorporation of Essential Oils and Nanoparticles in Pullulan Films to Control Foodborne Pathogens on Meat and Poultry Products. Journal of Food Science. 2014; 79(4):M675-M684.
36. Myszka K, Czaczyk K. Bacterial biofilms on food contact surfaces-a review. Polish J Food Nutr Sci. 2011;61(3):173–80.
37. Khan ST, Al-Khedhairy AA, Musarrat J. ZnO and TiO_2 nanoparticles as novel antimicrobial agents for oral hygiene: a review. J Nanopart Res. 2015;17(6):1–16.
resource for food packaging. Front. Microbiol. 2017; 8: 1735.
18. Sharma C, Dhiman R, Rokana N, Panwar H. Nanotechnology: an untapped resource for food packaging. Front. Microbiol. 2017; 8:1735.
19. Hosseini Sadr S, Sablan Vand S, Valizadeh R. The use of nanotechnology in food packaging". Poivesh in basic science education. third period, 2016; 3: 41-51.
20. Drago E, Campardelli R, Pettinato M, & Perego P. Innovations in smart packaging concepts for food: An extensive review. Foods. 2020; 9(11):1628.
21. Biji KB, Ravishankar C N, Mohan CO, Gopal TS. Smart packaging systems for food applications: a review. Journal of food science and technology. 2015; 52(10):6125-6135.
22. BArskA A, & WyrWA J. Innovations in the food packaging market–intelligent packaging–a review.Czech Journal of Food Sciences. 2017; 35(1):1-6
23. Müller P, Schmid M. Intelligent packaging in the food sector: A brief overview. Foods, 2019; 8(1):16.
24. Young E, Mirosa M, Bremer P. A systematic review of consumer perceptions of smart packaging technologies for food. Frontiers in Sustainable Food Systems. 2020;4: 63.
25. Yan M R, Hsieh S, Ricacho N. Innovative food packaging, food quality and safety, and consumer perspectives. Processes. 2022; 10(4):747.
26. Sohail M, Sun D W, Zhu Z. Recent developments in intelligent packaging for enhancing food quality and safety. Critical reviews in food science and nutrition. 2018; 58(15):2650-2662.
27. Bajpai VK, Kamle M, Shukla S, Mahato DK, Chandra P, Hwang SK, Kumar P, Huh YS, Han YK. Prospects of using nanotechnology for food preservation, safety, and security. Journal of food and drug analysis. 2018; 26(4):1201-14.

38. Eleftheriadou M, Pyrgiotakis G, Demokritou P. Nanotechnology to the rescue: using nano-enabled approaches in microbiological food safety and quality. Curr Opin. 2017; 44:87–93.
39. Colica C, et al. The role of nanotechnology in food safety. New York: Nova Science Publisher's, Inc.; 2018.
40. Berekaa MM. Nanotechnology in food industry; advances in food processing, packaging and food safety. Int J Curr Microbiol Appl Sci. 2015;4(5):345–57.

Application of nanotechnology in food processing, safety and packaging

Tahereh Navaie Diva*
Assistant Professor, Department of Chemistry, Savadkooh Branch, Islamic Azad University, Savadkooh, Iran
*Corresponding Author: taherehnavaie@gmail.com
Received: 10/11/2023, Accepted: 07/07/2024

Abstract
Nanotechnology is a novel and promising technology that has been introduced into many fields, including medicine, agriculture, and the food industry. For the food industry, nanotechnology is of great interest as an emerging technology in the area of food processing, safety, and packaging. With regard to food safety, nanotechnology is utilized to detect pathogens and toxins in food products and to strengthen barrier properties. Nanotechnologies for packaging ensure food safety and lead to extended shelf lives, through the prevention of decomposition and nutrient loss. Apart from providing protection against environmental conditions, active packaging also plays a crucial role in preserving food. Additionally, nanotechnology is widely used in food packaging as an antimicrobial and to produce intelligent packaging. However, nanoparticles may have a potential toxicity risk to human health. Therefore, establishing an adequate regulatory system to manage the potential risks associated with nanotechnology applications is recommended. The Organization of Economic Co-operation and Development recommended the standard test guidelines be used for the hazard assessment of nanomaterials for chemical safety. This review covered nanotechnology in food safety and packaging concerns.

Keywords: Nanotechnology, Food, processing, Safety, Packaging