

نانوفناوری در صنایع غذایی؛ پیشرفت ها در فراوری، بسته بندی و ایمنی مواد غذایی

ترجمه توسط:

مرضیه رضایی پژند ، ساجد برادران

چکیده

در این مقاله مروری مزایای نانوفناوری در صنایع غذایی از نظر فراوری، بسته بندی، ایمنی و کنترل کیفیت مواد غذایی ارائه شده است. نانوفناوری می تواند باعث اصلاح نفوذپذیری مواد بسته بندی، افزایش خواص نفوذناپذیری، بهبود خواص مکانیکی و مقاومت حرارتی، توسعه سطوح ضد میکروبی فعال، و تولید نانو مواد زیست تخریب پذیر برای کاربردهای بسته بندی شود. نانوفناوری از طریق طراحی سیستم رسانش مواد مغذی برای تولید مواد شیمیایی زراعی با فرمولاسیون نانو، غنی سازی ارزش تغذیه ای و تولید محصولات جدید از طریق کپسوله سازی زیست فعال باعث ایجاد تحول در صنایع غذایی شده است. نانوفناوری در توسعه حسگرهای زیستی برای تشخیص عوامل بیماری زا و آلاینده های شیمیایی استفاده شده است. این فناوری جدید نگرانی هایی را از نظر جنبه های سم شناسی نانوذرات در مواد غذایی، با تأکید بر ارزیابی ریسک و مسائل ایمنی نیز ایجاد کرده است. این امر نشان دهنده نیاز فوری به یک چهارچوب قانونی برای مدیریت ریسک مرتبط با استفاده از نانوذرات در فناوری مواد غذایی است.

واژه های کلیدی: نانوذرات، نانوکپسول ها، نانوحسگرها، بسته بندی مواد غذایی، ایمنی مواد غذایی، فراوری مواد غذایی

۱. مقدمه

نانوفناوری به عنوان یک حوزه رو به رشد با کاربردهای وسیع در علم و فناوری برای تولید مواد نانو مقیاس جدید در حال ظهور است (Albrecht *et al.*, ۲۰۰۶). این فناوری به دلیل قابلیت فرموله کردن مجدد فلزات و تبدیل آن‌ها به نانوذرات جدید با ابعادی کمتر از ۱۰۰ nm مورد توجه قرار گرفته است. به دلیل نانو مقیاس بودن، خواص شیمی - فیزیکی ذرات به شدت تغییر می‌کند و طیف گسترده‌ای از کاربردهای جدید فراهم می‌شود.

در سال‌های اخیر، پیشرفت‌های بزرگ در نانوفناوری باعث آغاز دوره جدیدی در فناوری صنعتی شده است. اکثر نانوذرات مورد استفاده در محصولات با چندین حوزه در ارتباط هستند (Benn and Westerhoff, ۲۰۰۸; Heinlaan *et al.*, ۲۰۰۸; Li *et al.*, ۲۰۰۸; Wokovich *et al.*, ۲۰۰۹; Marambio Jones and Hoek, ۲۰۱۰; Antonio *et al.*, ۲۰۱۴). نانوذرات در ضدعفونی کردن پارچه‌ها، ضدعفونی کردن آب، پزشکی و بسته‌بندی مواد غذایی مورد استفاده قرار گرفته‌اند (Hajipour *et al.*, ۲۰۱۲; Seil and Webster, ۲۰۱۲; Mihindukulasuriya and Lim, ۲۰۱۴). مواد نانو مقیاس به دلیل نسبت مساحت سطح به حجم بالا و خواص شیمیایی و فیزیکی منحصر به فرد به عنوان عوامل ضد میکروبی جدید شناخته شده‌اند (Morones *et al.*, ۲۰۰۵; Kim *et al.*, ۲۰۰۷). به عنوان مثال، TiO_2 به دلیل خواص باکتری‌کشی و ضدتکثیر، بخصوص در حضور نور UV، در کاربردهای مختلف مورد استفاده قرار گرفته است (Blake *et al.*, ۱۹۹۹). استفاده از نانوذرات نقره به عنوان نسل جدیدی از مواد ضد میکروبی بطور تفصیلی شرح داده شده است (Rai *et al.*, ۲۰۱۱; Duncan, ۲۰۰۹; Duran *et al.*, ۲۰۰۷) و همکاران گزارش کردند که نقره یونی یا فلزی و همچنین نانوذرات نقره می‌توانند در پزشکی، پوشش‌دهی فولاد، منسوجات، تصفیه آب، کرم‌های ضدآفتاب و ... استفاده شوند.

اخیراً، نانوفناوری باعث تحول در صنایع غذایی شده است (Sanguansri and Augustin, ۲۰۰۶; Weiss *et al.*, ۲۰۱۴; Rossi *et al.*, ۲۰۱۲; Cushen *et al.*, ۲۰۱۱; Silvestre *et al.*, ۲۰۰۸; Chaudhry *et al.*, ۲۰۰۶; Thangave and Thiruvengadam, ۲۰۱۴). یک بهبود تدریجی در استفاده از نانوذرات در صنایع غذایی بخصوص در فراوری، بسته‌بندی، و ذخیره‌سازی مواد غذایی و توسعه محصولات جدید وجود دارد. هدف استفاده از نانوذرات افزایش دسترس‌پذیری زیستی غذا داروها^۱ و مکمل‌های سلامتی نانو مقیاس، بهبود طعم و مزه، قوام، پایداری و بافت محصولات غذایی است (Chaudhry *et al.*, ۲۰۱۰; Momin *et al.*, ۲۰۱۳; Chaudhry *et al.*, ۲۰۰۸). نانوذرات به دلیل خصوصیات ضد میکروبی می‌توانند در بسته‌بندی مواد غذایی برای افزایش ماندگاری و ایمنی مصرف کننده استفاده شوند. پیش‌بینی شده است که گسترش بازار تولید مواد غذایی با نانوذرات در آینده نزدیک افزایش قابل توجهی خواهد داشت (Heinlaan *et al.*, ۲۰۰۸). علاوه بر این، استفاده از نانوذرات کپسوله شده امکان توسعه مواد شیمیایی زراعی مانند آفت‌کش‌ها، کودها، زیست‌کش‌ها، داروهای دامپزشکی، افزودنی‌ها، ترکیبات ضد میکروبی و سم‌زدایی با فرمولاسیون نانو را فراهم می‌کند. نانوکپسول‌ها در فراوری مواد غذایی به عنوان مواد اولیه، افزودنی‌ها، مکمل‌های غذایی، و در غذاهای فراسودمند^۲ مورد استفاده قرار گرفته‌اند (Momin *et al.*, ۲۰۱۳). Cushen و همکاران (۲۰۱۲) گزارش کردند که نانوکپسوله کردن مواد اولیه و افزودنی‌ها برای فراهم کردن پوشش‌های محافظ، پنهان کردن طعم و مزه، آزادسازی کنترل شده، و دیسپرسیون بهتر مواد غذایی نامحلول در آب انجام شده است. نگرانی در مورد سمیت و اثرات منفی نانوذرات روی سلامت انسان و محیط زیست رو به افزایش است. بنابراین، ایجاد یک سیستم قانونی که توانایی مدیریت ریسک مربوط به استفاده از نانوذرات را داشته باشد پیشنهاد شده است.

این مقاله مروری آنالیزی جامع در مورد پیشرفت‌های اخیر به دست آمده در فناوری نانوذرات مورد استفاده در صنایع غذایی در زمینه فراوری، بسته‌بندی، ایمنی و کنترل کیفیت مواد غذایی ارائه می‌کند. به دلیل استفاده از نانوذرات در مواد

^۱ nutraceutical^۲ functional food

غذایی، تأکید بیشتری روی سمیت و ملاحظات بهداشتی انجام شده است و مقررات موجود در این زمینه نیز بصورت جزئی بررسی شده است.

۲. نانوفناوری در فراوری مواد غذایی

۲-۱. نانوفناوری در فراوری مواد غذایی

نانوذرات حین فراوری مواد غذایی برای بهبود کیفیت تغذیه‌ای، خواص جریان، طعم، رنگ و پایداری یا افزایش ماندگاری استفاده می‌شوند. در واقع، نانوفناوری می‌تواند در توسعه مواد غذایی سالم‌تر با چربی، قند و نمک کمتر برای غلبه بر بسیاری از بیماری‌های مرتبط با غذا استفاده شود. اخیراً، SiO_2 و TiO_2 به عنوان افزودنی‌های غذایی مجوز دریافت کرده‌اند (به ترتیب E551 و E171) (EFSA, ۲۰۰۰). هیدرولیز مؤثر روغن زیتون با استفاده از تثبیت کوالانسی لیپاز تری آسیل گلیسرول خوکی روی نانو SiO_2 عامل‌دار شده با گروه آلدئید فعال برای دستیابی به قابلیت استفاده مجدد، انطباق‌پذیری و پایداری بهتر گزارش شده است (Bai *et al.*, ۲۰۰۶). چندین اجتماع نانو و میکرو ساختار از نانوذرات برای کپسوله کردن مواد اولیه، افزودنی‌ها، مکمل‌های غذایی و غذاهای فراسودمند طراحی شده است (Augustin and Hemar, ۲۰۰۹).

۲-۲. افزودنی‌ها و غذا داروهای نانو مقیاس

پتانسیل استفاده از نانوفناوری در غذاهای فراسودمند، طراحی مکمل‌های غذایی و غذا داروهای حاوی مواد اولیه و افزودنی نانو مقیاس مانند ویتامین‌ها، مواد ضد میکروبی، مواد ضد اکسایش، و نگهدارنده‌ها در حال حاضر برای بهبود طعم و مزه، جذب و دسترس‌پذیری زیستی شناخته شده است (Momin *et al.*, ۲۰۱۳). برخی غذا داروهای قرار گرفته در حامل‌ها شامل لیکوپن^۳، بتا کاروتن‌ها و فیتوسترول‌ها^۴ در غذاهای سالم برای جلوگیری از تجمع کلسترول استفاده شده‌اند (Mozafari *et al.*, ۲۰۰۶).

۲-۳. نانوکپسوله کردن

اخیراً، طراحی نانوساختارهایی برای رسانش افزودنی‌های غذایی گزارش شده است (Augustin and Hemar, ۲۰۰۹). سیستم‌های حامل نانو مقیاس یا نانوکپسول‌ها به شکل حامل‌های مبتنی بر لیپوزوم‌ها، میسل‌ها، یا پروتئین به عنوان نانو افزودنی‌ها و مکمل‌های غذایی برای پنهان کردن طعم و مزه نامطلوب، افزایش دسترس‌پذیری زیستی، و دیسپرسیون بهتر افزودنی‌های نامحلول بدون نیاز به استفاده از سطح فعال‌ها یا امولسیون کننده‌ها مورد استفاده قرار گرفته است (Morris *et al.*, ۲۰۱۳; Duran and Marcato, ۲۰۱۲; Cushen *et al.*, ۲۰۱۱; *al.*). حین نانوکپسوله کردن، افزودنی‌های غذایی برای آزادسازی کنترل شده در نانوکامپوزیت‌های پلیمری مانند اکتانیل سوکسینیک انیدرید - ϵ - پلی لیسین قرار می‌گیرند (Yu *et al.*, ۲۰۱۰; Sekhon, ۲۰۰۹). فعالیت ضد سرطان کورکومین^۵ با کپسوله کردن در نشاسته آگریز شده افزایش یافت (Yu and Huang, ۲۰۱۰). علاوه بر این، استفاده از نانوکپسول‌های مبتنی بر لیپید مانند نانولیپوزوم‌ها، نانو کی‌لیت کننده‌ها و آرکئوزوم‌ها^۶ به عنوان سیستم رسانش نانو مقیاس برای غذا داروها، آنزیم‌ها، افزودنی‌های غذایی، و مواد ضد میکروبی گزارش

^۳ lycopene

^۴ phytosterol

^۵ curcumin

^۶ archaeosome

شده است (Mozafari *et al.*, ۲۰۰۶; Mozafari *et al.*, ۲۰۰۸). نانوکپسوله کردن پروبیوتیک‌ها برای هدف قرار دادن بخش خاصی از دستگاه گوارش نیز انجام شده است (Vidhyalakshmi *et al.*, ۲۰۰۹).

افزودنی‌ها و کامپوزیت‌های نانو مقیاس غیرآلی مانند نقره، آهن، کلسیم، منیزیم، سلنیم، و سیلیکا به عنوان نگهدارنده و افزودنی برای بهبود طعم و مزه مورد استفاده قرار گرفته‌اند. علاوه بر این، مخلوط میکرو کره‌های سیلیکا ژل و سیلیکا تیوسولفات به دلیل داشتن فعالیت ضد میکروبی طولانی مدت استفاده می‌شود (Gupta and Silver, ۱۹۹۸). مثالی از کاربرد نانوذرات استفاده از پلی پپتید E- پلی لیسین به عنوان یک ماده ضد اکسایش برای محافظت روغن در برابر اکسایش است. نانوذرات پلی لیسین بسیار کوچکتر از نانوذرات فیتوگلیکوژن اکتانیل سوکسینات هستند و می‌توانند در فضای بین آن‌ها قرار گیرند (Scheffler *et al.*, ۲۰۱۰). Vargas و همکاران (۲۰۰۸) طراحی یک نانو پوشش برای استفاده به عنوان حامل مواد اولیه حین فرایند کپسوله کردن را گزارش کردند. فیلم‌های خوراکی مبتنی بر کیتوسان با استفاده از نانوذرات تهیه شده از مونت موریلونیت‌ها، نقره یا نقره ژئولیت به دست آمد (Rhim *et al.*, ۲۰۰۶).

از طرف دیگر، استفاده از نانو مواد کپسوله شده در کشاورزی برای تولید مواد شیمیایی زراعی با فرمولاسیون نانو مانند آفت‌کش‌ها، کودها، زیست‌کش‌ها و در داروهای دامپزشکی افزایش یافته است. کارایی و دوام این نانوکپسول‌ها اثبات شد و آن‌ها می‌توانند در آزادسازی کنترل شده مواد اولیه فعال کمک کنند. نانوکپسول‌ها در غذای حیوانات می‌توانند برای قرارگیری نانو افزودنی‌ها، مواد ضد میکروبی و ترکیبات سم‌زدا مانند بیندرهای مایکوتوکسین استفاده شوند. استفاده از نانوحسگرها برای تشخیص عوامل بیماری‌زای حیوانی جنبه‌ای دیگر از کاربرد نانوذرات در کشاورزی است. اخیراً، نانوکپسول‌ها و نانو امولسیون‌ها برای تولید نانو آفت‌کش‌هایی مانند محصولات حاوی نانوذرات خالص مهندسی شده مانند فلزات، اکسیدهای فلزی، و نانو رس‌ها استفاده شده است (Kahand Hofmann, ۲۰۱۴; Kookana *et al.*, ۲۰۱۴).

۴-۲. نقره ژئولیت

یکی دیگر از کاربردهای مهم نانوذرات نقره استفاده از آن به شکل نقره ژئولیت است. نقره ژئولیت از اختلاط فلزات قلیایی خاکی با آلومینوسیلیکات بلوری به دست می‌آید، که از طریق روش تبادل یون تا حدی با یون‌های نقره جایگزین می‌شود. در واقع، فعالیت ضد میکروبی نقره ژئولیت‌ها عمدتاً ناشی از قابلیت نقره برای تولید گونه‌های فعال اکسیژن^۷ (ROS) است که مسئول مرگ سلولی هستند (Inoue *et al.*, ۲۰۰۲). سرمیک‌های پوشش داده شده با نقره ژئولیت به عنوان عوامل ضد میکروبی در بسیاری از کاربردها مانند نگهدارنده‌های مواد غذایی، ضد عفونی کردن محصولات پزشکی و گندزدایی مواد استفاده می‌شوند (Kawahara *et al.*, ۲۰۰۰; Matsumura *et al.*, ۲۰۰۳). نانوکامپوزیت‌های مبتنی بر نقره در مقایسه با مواد مبتنی بر ژئولیت فعالیت ضد میکروبی پایداری را نشان می‌دهند، بنابراین برای بسته‌بندی مواد غذایی و دستیابی به ماندگاری طولانی مدت مناسب‌تر هستند (Egger *et al.*, ۲۰۰۹).

۳. نانوفناوری در بسته‌بندی مواد غذایی

نقش حیاتی نانوفناوری در فرایند بسته‌بندی مواد غذایی به عنوان بزرگترین کاربرد تجاری در بخش مواد غذایی در نظر گرفته شده است (Chaudhry *et al.*, ۲۰۱۰). در سال‌های اخیر، تحقیقات و نوآوری در زمینه بسته‌بندی مواد غذایی افزایش یافته است و مواد مختلفی مبتنی بر فیلم‌ها، نانو لوله‌های کربنی و نانو پوشش‌های مومی برای برخی مواد غذایی توسعه یافته است. استفاده از نانوذرات ممکن است در تولید موادی جدید برای بسته‌بندی مواد غذایی با خواص مکانیکی، نفوذناپذیری و ضد میکروبی بهبود یافته و ماندگاری بالاتر کمک کند (Chaudhry *et al.*, ۲۰۰۸; Mihindukulasuriya and Lim, ۲۰۱۴). علاوه بر خاصیت ضد میکروبی، نانوذرات می‌توانند به عنوان حامل برای رسانش مواد ضد اکسایش، آنزیم‌ها، چاشنی‌ها،

^۷ reactive oxygen species

عوامل ضد قهوه‌ای شدن و مواد دیگر برای افزایش ماندگاری، حتی بعد از باز شدن بسته، مورد استفاده قرار گیرند (Cha and Weiss et al., ۲۰۰۶; LaCoste et al., ۲۰۰۵; Chinnan, ۲۰۰۴). نانو مواد غیرآلی برخی فلزات و اکسیدهای فلزی مانند نقره، آهن، تیتانیوم دی اکسید، اکسیدهای روی، منیزیم اکسید و همچنین سیلیکون دی اکسید و نانوذرات کربن به عنوان عوامل ضد میکروبی در بسته‌بندی مواد غذایی و در برخی موارد به عنوان مکمل غذایی مورد استفاده قرار گرفته‌اند (Sekhon, ۲۰۱۰). TiO_2 بطور گسترده به عنوان یک عامل ضد عفونی کننده مورد استفاده قرار گرفته است، چون گونه‌های فعال اکسیژن زیادی تولید می‌کند که برای میکرو ارگانیزم‌های بیماری‌زا سمی هستند. فعالیت ضد میکروبی نانوذرات نقره در صورت ترکیب با تیتانیوم دی اکسید و نانو لوله‌های کربنی به ترتیب در برابر گونه‌های *E. coli* و *Bacillus cereus* افزایش قابل توجهی می‌یابد (Krishna et al., ۲۰۰۵). نانوذرات TiO_2 دوپ شده با نقره نیز باعث غیرفعال شدن گونه‌های *B. cereus* روی سطوح آلومینیومی و پلی استر می‌شوند (Vohra et al., ۲۰۰۵) و در صورت کاربرد در فیلترهای هوا باعث تخریب باکتری‌های قابل انتقال توسط هوا و قارچ‌ها می‌شوند (Vohra et al., ۲۰۰۶). پایداری نانوذرات نقره با SDS یا PVP باعث افزایش فعالیت ضد میکروبی در برابر *E. coli* و *Staphylococcus aureus* می‌شود. بنابراین، برای جلوگیری از رشد عوامل بیماری‌زای غذایی و باکتری‌های فاسدکننده مواد غذایی، سطوح یخچال و ظروف نگهداری مواد غذایی با نانوذرات نقره پوشش داده می‌شود (Cho et al., ۲۰۰۵).

اثر نانوذرات TiO_2 فعال شده با نور UV در برابر برخی عوامل بیماری‌زای غذایی مانند *Salmonella choleraesuis*، *Vibrio parahaemolyticus* و *L. monocytogenes* گزارش شده است (Kim et al., ۲۰۰۳). دیسپرس کردن نانوذرات TiO_2 با استفاده از تابش فراصوت در فیلم‌های EVOH و فعال شدن خواص باکتری‌کشی آن در اثر نور در برابر ۹ میکرو ارگانیزم مسموم کننده مواد غذایی توسط Cerrada و همکاران (۲۰۰۸) گزارش شده است. از دیگر نانوذرات دارای فعالیت ضد میکروبی مورد استفاده در بسته‌بندی مواد غذایی می‌توان به MgO (Stoimenov et al., ۲۰۰۲)، Cu_2O (Cioffi et al., ۲۰۰۵; Yoon et al., ۲۰۰۷)، ZnO (Emamifar et al., ۲۰۱۱)، و کیتوسان (Qi et al., ۲۰۱۳; Tan et al., ۲۰۰۴) و همچنین نانو لوله‌های کربنی (Kang et al., ۲۰۰۹; Kang et al., ۲۰۰۷) اشاره کرد. استفاده از پوشش کلئیدی مبتنی بر نشاسته پر شده با نانوذرات ضد میکروبی نیز برای بسته‌بندی مواد غذایی گزارش شده است (Boumans, ۲۰۰۳). فعالیت ضد میکروبی نانو رس بعد از جایگزینی یون‌های سدیم مونت موریلونیت‌ها با یون‌های نقره و دیسپرس شدن در پلی (ε-کاپرولاکتون) (Incoronato et al., ۲۰۱۱) یا پلی (لاکتیک اسید) به شدت افزایش یافت. اخیراً، Gu و همکاران (۲۰۰۳) دریافتند که اتصال کوالانسی مولکول‌های وانکومایسین^۸ روی نانوذرات طلا باعث افزایش فعالیت آن در برابر باکتری مقاوم به وانکومایسین می‌شود. نانوذرات پلی استایرن پوشش داده شده با لیزوزیم و عامل دار شده با پادتن‌های گزینش‌پذیر فعالیت ضد باکتری را در برابر *L. monocytogenes* (Yang et al., ۲۰۰۷) نشان دادند. Bi و همکاران (۲۰۱۱) نشان دادند که فعالیت ضد میکروبی نانوذرات فیتوگلیکوژن در برابر *L. monocytogenes* در زمان استفاده از نیسین^۹ افزایش می‌یابد.

۳-۱. نانوکامپوزیت‌ها

توسعه نانوکامپوزیت‌ها یکی از مهمترین کاربردهای نانوذرات در صنایع غذایی است. تولید مواد نانوکامپوزیتی برای کاربرد در بسته‌بندی و پوشش‌دهی مواد گزارش شده است (Pinto et al., ۲۰۱۳; Mihindukulasuriya and Lim, ۲۰۱۴). Duncan (۲۰۱۱) کاربرد پرکننده‌های نانو مقیاس بی‌اثر مانند نانو پلاکت‌های رس و سیلیکات، نانوذرات سیلیکا (SiO_2)، نانو لوله‌های کربنی، گرافن، نانو بلورهای نشاسته، نانو الیاف یا نانو ویسکرها، سلولزی، نانوذرات کیتین یا کیتوسان و دیگر مواد غیرآلی را در یک ماتریس پلیمری شرح داده است. کاربرد این مواد در ماتریس پلیمری باعث کاهش وزن، افزایش استحکام،

^۸ vancomycin

^۹ nisin

ایجاد مقاومت حرارتی، بهبود خواص حرارتی، و نفوذپذیری کمتر در برابر گازها می‌شود. توسعه نانوکامپوزیت‌ها (حاوی حداکثر ۵٪ w/w نانوذرات) گزارش شده است (Llorens *et al.*, ۲۰۱۲). کاربرد نانوذرات نقره در ماتریس پلیمری تمایل به استفاده از نانوکامپوزیت‌ها برای بسته‌بندی را افزایش می‌دهد (Duncan, ۲۰۱۱). نانوکامپوزیت‌های پلیمری حاوی سیلیکات با نفوذناپذیری، استحکام فیزیکی، و پایداری حرارتی بهتر توسعه یافته‌اند (Holley, ۲۰۰۵; Brody, ۲۰۰۶; Doyle, ۲۰۰۶). Arora و Padua (۲۰۱۰) تولید پرکننده‌های نانو مقیاس مانند مونت موریلونیت، رُس‌های کائولینیت، و نانو صفحات گرافیت را برای بهبود نفوذناپذیری بسته‌بندی مواد غذایی بررسی کردند. استفاده از نانو لوله‌های کربنی در بسته‌بندی برای خارج کردن کربن دی اکسید یا جذب بوهای نامطلوب گزارش شده است (Sinha *et al.*, ۲۰۰۶). استفاده از نانو رُس (بنتونیت) در نانوکامپوزیت حین تولید بطری‌ها و دیگر مواد بسته‌بندی باعث بهبود نفوذناپذیری در برابر گاز، جلوگیری از نفوذ اکسیژن و رطوبت، و جلوگیری از فاسد شدن مواد غذایی می‌شود. Lagarón و همکاران (۲۰۰۵) گزارش کردند که استفاده از نانوذرات رُس در یک کوپلیمر اتیلن-وینیل الکل و همچنین در پلیمر زیستی پلی لاکتیک اسید باعث بهبود خواص نفوذناپذیری در برابر اکسیژن و افزایش ماندگاری محصولات غذایی می‌شود. استفاده از نانو رُس‌های اصلاح شده آلی در ماتریس پلیمری برای افزایش استحکام مکانیکی و ایجاد خواص نفوذناپذیری در برابر گاز، ترکیبات فرار یا رطوبت گزارش شده است (Chaudhry *et al.*, ۲۰۰۸).

نانوکامپوزیت‌های مبتنی بر پلیمر زیستی نسبت به پلاستیک‌های متداول مزایای زیست محیطی را فراهم می‌کنند. اخیراً، Othman (۲۰۱۴) انواع مختلفی از پرکننده‌های نانو مقیاس و پلیمرهای زیستی قابل استفاده برای تولید کامپوزیت‌های زیستی مناسب در کاربردهای بسته‌بندی مواد غذایی را گزارش کرده است. Goyaland Goyal (۲۰۱۲) طراحی نانوکامپوزیت زیست تخریب‌پذیر با استفاده از پلیمرهای زیستی نشاسته، پلی لاکتیک اسید (PLA) یا پلی هیدروکسی بوتیرات (PHB) را شرح داده است. پلیمرهای زیستی بسیاری مانند پلی آمیدها (PA)، نایلون‌ها، پلی اولفین‌ها، پلی استایرن (PS)، کوپلیمر اتیلن وینیل استات (EVA)، رزین‌های اپوکسی، پلی اورتان، پلی ایمیدها و پلی اتیلن ترفتالات (PET) در طراحی نانوکامپوزیت‌های حاوی نانو رُس مورد استفاده قرار گرفته است. Ray و همکاران (۲۰۰۲) گزارش کردند که زمانیکه نانو پرکننده‌ها در پلیمر زیست سازگار PLA دیسپرس شوند، سرعت تخریب زیستی نانوکامپوزیت زیستی PLA نسبت به PLA خالص افزایش می‌یابد.

۴. نانوفناوری و ایمنی مواد غذایی

۴-۱. نانوحسگرها و نانو الک‌ها

استفاده از نانوذرات در توسعه نانوحسگرها برای تشخیص آلاینده‌ها و عوامل بیماری‌زا در سیستم غذایی یکی دیگر از کاربردهای نانوفناوری است. نانوحسگرهای سفارشی برای آنالیز مواد غذایی، چاشنی‌ها و رنگ‌ها، آب آشامیدنی و تشخیص‌های بالینی توسعه یافته است (Li and Sheng, ۲۰۱۴). در واقع، نانوذرات می‌توانند به عنوان مبدل نانوساختار حسگرهای زیستی استفاده شوند (Vo-Dinh *et al.*, ۲۰۰۱). Nakamura و Karube (۲۰۰۳) اخیراً تحقیقات در زمینه حسگرهای زیستی را مرور کرده‌اند. نانوحسگرهای مورد استفاده در بسته‌بندی مواد غذایی می‌تواند در تشخیص هرگونه تغییر فیزیکی، شیمیایی یا حتی زیستی حین فاز فراوری مواد غذایی کمک کند. بسته‌بندی هوشمند با استفاده از نانوحسگرها و نانو دستگاه‌های خاص برای تشخیص سموم، عوامل بیماری‌زای غذایی و مواد شیمیایی توسعه یافته است (Cheng *et al.*, ۲۰۰۸; Dingman, ۲۰۱۱; Yang *et al.*, ۲۰۱۱; Lerner *et al.*, ۲۰۰۸). اخیراً، Lim و Mihindukulasuriya (۲۰۱۴) کاربرد نانوفناوری در طراحی بسته‌بندی‌های هوشمند برای بهبود جنبه‌های ارتباطی بسته را گزارش کردند. این بسته‌بندی هوشمند می‌تواند

باعث افزایش کارایی انتقال اطلاعات حین توزیع شود. پاسخ ایجاد شده در نتیجه تغییرات مرتبط با عوامل محیطی داخلی یا خارجی از طریق حسگر خاصی ثبت خواهد شد.

اخیراً، نانوفناوری امکان طراحی نانوحسگرهایی برای تشخیص عوامل بیماری‌زا یا سموم غذایی را فراهم کرده است (Doyle et al., ۲۰۱۶). تشخیص اِنْتروِتوکسین B گونه‌های *Staphylococcus* با استفاده از تراشه‌های پلی (دی متیل سیلوکسان) (PDMS) پوشش داده شده با غشاهای دولایه ساپورت شده و تقویت شده^{۱۰} (r-SBM) و پادتن‌های مخصوص سم مورد نظر نمونه‌ای از این موارد است (Dong et al., ۲۰۰۶). Rivas و همکاران (۲۰۰۶) روش ایمنی‌سنجی ساندویچی با استفاده از مهره‌های مغناطیسی^{۱۱} را که مبتنی بر نانو وزیکول‌های G-لیپوزوم است برای تشخیص *E. coli* O157:H7 گونه‌های *Salmonella* و *Listeria monocytogenes* در مواد غذایی توسعه دادند. میکرو ارگانیزم‌های بیماری‌زای دیگر با نوع خاصی از ایمنی‌سنجی جاذب^{۱۲} و با استفاده از نانو وزیکول‌های G-لیپوزوم تشخیص داده شدند (Chen and Dust, ۲۰۰۶). علاوه بر این، نانوذرات به عنوان نانو الک برای فیلتر کردن باکتری‌ها نیز استفاده شده‌اند. نانوذرات در کشاورزی به عنوان نانوحسگرهای هوشمند با قابلیت پاسخ نسبت به شرایط مختلف برای اعلام تغییر شرایط استفاده می‌شوند. از طرف دیگر، اخیراً تشخیص سموم باکتریایی با استفاده از نانوذرات گزارش شده است (Zhu et al., ۲۰۱۴). حسگرهای زیستی متعددی برای تشخیص رایج‌ترین عوامل بیماری‌زای غذایی مانند *E. coli* و گونه‌های *Salmonella* و همچنین مایکوتوکسین‌ها در مواد غذایی طراحی شده است (Duran and Marcato, ۲۰۱۳). کاربرد نانوذرات برای تشخیص عوامل بیماری‌زای غذایی و سموم آن‌ها گزارش شده است (Burris and Stewart, ۲۰۱۲). علاوه بر این، آفلاتوکسین‌های^{۱۴} تولید شده توسط *Aspergillus flavus* و *A. parasiticus* که باعث آلودگی محصولات غذایی می‌شوند را می‌توان با استفاده از حسگر ایمنی نانوذرات طلای مغناطیسی تشخیص داد (Tang, ۲۰۰۹).

۲-۴. جنبه‌های سم‌شناسی نانوذرات در مواد غذایی

با وجود مزایای متعدد نانوذرات در صنایع غذایی، نگرانی‌های زیادی در مورد سمیت و اثرات زیست محیطی آن‌ها وجود دارد. جنبه‌های اصلی مربوط به دسترس‌پذیری زیستی، رفتار، رسوب‌دهی و سمیت نانوذرات در محیط زیست توسط Klaine و همکاران (۲۰۰۸) شرح داده شده است. تماس مستقیم مصرف کننده با نانوذرات بکار رفته در صنایع غذایی مشکلات جدی را برای سلامت انسان ایجاد می‌کند. تا زمانیکه پیوند بین نانوذرات و بسته‌بندی مواد غذایی برقرار باشد، مصرف کننده در معرض مقدار محدود یا بسیار کمی قرار دارد. با این حال، انتقال نانوذرات از بسته‌بندی به بدن انسان ریسک بالایی دارد. اثرات بهداشتی و ایمنی مربوط به استفاده از نانوذرات توسط Teow و همکاران (۲۰۱۱) گزارش شده است. آن‌ها مسیرهای ورود، نحوه جذب و توزیع نانوذرات در بدن انسان را با تأکید بر سمیت سلولی^{۱۵} و سمیت ژنتیکی^{۱۶} شرح دادند. درک رفتار و مکانیزم عمل نانوذرات در سیستم‌های زیستی برای توسعه نانوفناوری ایمن توسط Stark (۲۰۱۱) شرح داده شده است. اخیراً، گزارش شده است که نانوذرات TiO_2 می‌توانند تغییرات تومور ماندی را در سلول‌های انسان ایجاد کنند (Sanders et al., ۲۰۱۲; Botelho et al., ۲۰۱۴; Valdighesias et al., ۲۰۱۳). ارزیابی سمیت نانوذرات فلزی توسط Schrand و همکاران (۲۰۱۰) بررسی شده است. آن‌ها نشان دادند که با کاهش اندازه ذرات میزان سمیت افزایش می‌یابد. تکنیک‌های جدید نشان داده است که نانوذرات واکنش‌پذیری بالاتر و قابلیت بیشتری برای عبور از موانع غشایی و منافذ مؤئینه دارند، در نتیجه می-

^{۱۰} reinforced, supported bilayer membranes

^{۱۱} immune-magnetic bead sandwich assay

^{۱۲} nanovesicle

^{۱۳} immunosorbent assay

^{۱۴} aflatoxin

^{۱۵} cytotoxicity

^{۱۶} genotoxicity

توانند باعث ایجاد خواص توکسیکوسینتیک^{۱۷} و توکسیکودینامیک^{۱۸} مختلف شوند. برخی نانوذرات با پروتئین‌ها و آنزیم‌ها برهم‌کنش دارند و با ایجاد تنش اکسایشی و تولید ROS باعث تخریب میتوکندری^{۱۹} و آپوپتوز^{۲۰} می‌شوند (Hajipour *et al.*, ۲۰۱۲). متأسفانه، مطالعات انسانی کمی در مورد سمیت نانوذرات انجام شده است، اگرچه مطالعات اولیه روی حیوانات سمیت برای کبد، کلیه‌ها، و سیستم ایمنی را نشان داده است. بنابراین، مطالعات ارزیابی ریسک برای نشان دادن اثرات منفی نانوذرات روی سلامت انسان باید انجام شود.

۵. قوانین و مقررات

با وجود مزایای متعدد نانوذرات در صنایع غذایی، نگرانی‌های زیادی در مورد سمیت و اثرات زیست محیطی آن‌ها وجود دارد. به دلیل پیامدهای منفی ورود نانوذرات به بدن انسان، ارزیابی خطرات احتمالی برای سلامت انسان ضرورت دارد. Halliday (۲۰۰۷) اشاره کرد که مقررات اتحادیه اروپا برای مواد غذایی و بسته‌بندی آن‌ها روش ارزیابی ریسک و استانداردهای ایمنی خاصی را پیشنهاد کرده است که باید قبل از معرفی غذاهای نانو به بازار برآورده شوند. در ایالات متحده، غذاهای نانو و اغلب بسته‌بندی‌های مواد غذایی توسط USFDA کنترل می‌شود (Badgley *et al.*, ۲۰۰۷). درحالیکه در استرالیا، افزودنی‌ها و مواد اولیه غذاهای نانو توسط اداره استانداردهای غذای استرالیا و نیوزیلند (FSANZ) و بر اساس کد استاندارد مواد غذایی کنترل می‌شود (Bowman and Hodge, ۲۰۰۶). افزایش مسائل نظارتی باعث تنظیم مقررات در بسیاری از کشورها برای مدیریت ریسک مربوط به غذاهای نانو شده است (Cushen *et al.*, ۲۰۱۲; Tinkle *et al.*, ۲۰۱۴).

اخیراً، مقرراتی در EU تصویب شده است که طبق آن هر ماده اولیه غذایی به دست آمده از کاربرد نانوفناوری باید قبل از اخذ مجوز مصرف تحت ارزیابی ایمنی قرار گیرد (Cubadda *et al.*, ۲۰۱۳)، و غذاهای نانو و مواد اولیه غذایی جدید نیز طبق مقررات غذاهای جدید EC ۲۵۸/۹۷ ارزیابی خواهند شد. علاوه بر این، افزودنی‌های غذاهای نانو که قبل از سال ۲۰۰۹ مجوز دریافت کرده‌اند و مواد بسته‌بندی باید تحت برنامه ارزیابی مجدد توسط EFSA قرار گیرند. در بسیاری از کشورهای دیگر، به دلیل اطلاعات ضعیف در مورد مواجهه، دسترس‌پذیری و سمیت نانوذرات برای انسان، مقررات کاملی در مورد ایمنی مواد غذایی وجود ندارد. در واقع، ایجاد یک سیستم نظارت بین‌المللی در زمینه استفاده از نانوذرات یک نیاز فوری به حساب می‌آید.

^{۱۷} toxicokinetic
^{۱۸} toxicodynamic
^{۱۹} mitochondria
^{۲۰} apoptosis

۶. منابع و مراجع

۱. Albrecht, M.A., Evans, C.W., Raston, C.L. ۲۰۰۶. Green chemistry and the health implications of nanoparticles. *Green Chem.*, ۸(۵): ۴۱۷-۳۲.
۲. Antonio, J.R., Antônio, C.R., Cardeal, I.L.S, Ballavenuto, J.M.A., Oliveira J.R. ۲۰۱۴. Nanotechnology in dermatology. *Anais Brasileiros De Dermatologia*, ۸۹(۱): ۱۲۶-۳۶.
۳. Arora, A., Padua, G.W. ۲۰۱۰. Review: nanocomposites in food packaging. *J. Food Sci.*, ۷۵: ۴۳-۴۹.
۴. Augustin, M.A., Hemar, Y. ۲۰۰۹. Nano- and micro-structured assemblies for encapsulation of food ingredients. *Chem. Soc. Rev.*, ۳۸: ۹۰۲-۹۱۲.
۵. Badgley, C., Moghtader, J., Quintero, E., Zakem, E., Chappel, L.M., Aviles-Vazquez, K., Salon, A., Perfecto, I. ۲۰۰۷. Organic agriculture and the global food supply. *Renew. Agric. Food Sys.*, ۲۲(۲): ۸۶-۱۰۸.
۶. Bai, Y.X., Li, Y.F., Yang, Y., Yi, L.X. ۲۰۰۶. Covalent immobilization of triacylglycerol lipase onto functionalized nanoscale SiO₂ spheres. *Process Biochem.*, ۴۱: ۷۷۰-۷۷۷.
۷. Benn, T.M., Westerhoff, P. ۲۰۰۸. Nanoparticle silver released into water from commercially available sock fabrics. *Environ. Sci. Technol.*, ۴۲(۱۸): ۷۰۲۵-۶.
۸. Bi, L., Yang, L., Narsimhan, G., Bhunia, A.K., Yao, Y. ۲۰۱۱. Designing carbohydrate nanoparticles for prolonged efficacy of antimicrobial peptide. *J. Cont. Release*, ۱۵۰: ۱۵۰-۱۵۶.
۹. Blake, D.M., Maness, P-C., Huang, Z., Wolfrum, E.J., Jacoby, W.A., Huang, J. ۱۹۹۹. Application of the photocatalytic chemistry of titanium dioxide to disinfection and the killing of cancer cells. *Separat. Purificat. Rev.*, ۲۸: ۱-۵۰.
۱۰. Botelho, M.C., Costa, C., Silva, S., Costa, S., Dhawan, A., Oliveira, P.A., Teixeira, J.P. ۲۰۱۴. Effects of titanium dioxide nanoparticles in human gastric epithelial cells in vitro. *Biomed. Pharmacother.*, ۶۸: ۵۹-۶۴.
۱۱. Boumans, H. ۲۰۰۳. Release on COMMAND: BIO-SWITCH , in leads in life sciences, TNO Nutrition and Food Zeist, ۲۲: ۴-۵.
۱۲. Bowman, D., Hodge, G. ۲۰۰۶. Nanotechnology: Mapping the wild regulatory frontier. *Futures*, ۳۸: ۱۰۶۰-۱۰۷۳.
۱۳. Brody, A.L. ۲۰۰۶. Nano and food packaging technologies converge. *Food Technol.*, ۶۰: ۹۲-۹۴.
۱۴. Burris, K.P., Neal Stewart, C. Jr. ۲۰۱۲. Fluorescent nanoparticles: Sensing pathogens and toxins in foods and crops. *Trends Food Sci. Technol.*, ۲۸: ۱۴۳-۱۵۲.
۱۵. Cerrada, M., Serrano, C., Sánchez-Chaves, M., Fernández-García, M., Fernandez-Martin, F., de Andrés, A., Jiménez, R., Kubacka, A., Ferrer, M., Fernández-Garcia, M. ۲۰۰۸. Self-sterilized EVOH-TiO₂ nanocomposites: Interface effects on biocidal properties. *Adv. Funct. Mater.*, ۱۸: ۱۹۴۹-۱۹۶۰.
۱۶. Cha, D., Chinnan, M. ۲۰۰۴. Biopolymerbased antimicrobial packaging: A review. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.*, ۴۴: ۲۲۳-۲۳۷.
۱۷. Chaudhry, Q., Castle, L., Watkins, R. (Eds.) ۲۰۱۰. Nanotechnologies in Food. Royal Society of Chemistry Publishers, Cambridge, UK.
۱۸. Chaudhry, Q., Scotter, M., Blackburn, J., Ross, B., Boxall, A., Castle, L., Aitken, R., Watkins, R. ۲۰۰۸. Applications and implications of nanotechnologies for the food sector. *Food Addit. Contam. Part A*, ۲۵: ۲۴۱-۲۵۸.

۱۹. Chen, C.S., Durst, R.A. ۲۰۰۶. Simultaneous detection of *Escherichia coli* O1۵۷:H۷, *Salmonella* spp. And *Listeriamonocytogenes* with an arraybased immunosorbent assay using universal protein G-liposomal nanovesicles. *Talanta*, ۶۹(۱): ۲۳۲-۸.
۲۰. Cheng, Y., Liu, Y., Huang, J. ۲۰۰۸. Rapid amperometric detection of coliforms based on MWNTs/Nafion composite film modified glass carbon electrode. *Talanta*, ۷۵: ۱۶۷-۱۷۱.
۲۱. Cho, K.H., Park, J.E., Osaka, T., Park, S.G. ۲۰۰۵. The study of antimicrobial activity and preservative effects of nanosilver ingredient. *Electrochimica Acta*, ۵۱: ۹۵۶-۹۶۰.
۲۲. Cioffi, N., Torsi, L., Ditaranto, N., Tantillo, G., Ghibelli, L., Sabbatini, L., Bleve-Zacheo, T., D Alessio, M., Zambonin, P.G., Traversa, E. ۲۰۰۵. Copper nanoparticle/polymer composites with antifungal and bacteriostatic properties. *Chem. Mater.*, ۱۷: ۵۲۵۵-۵۲۶۲.
۲۳. Cubadda, F., Aureli, F., D Amato, M., Raggi, A., Mantovani, A. ۲۰۱۳. Nanomaterials in the food sector: new approaches for safety assessment. *Rapporti ISTISAN* ۱۳/۴۸.
۲۴. Cushen, M., Kerry, J., Morris, M., Cruz-Romero, M., Cummins, E. ۲۰۱۲. Nanotechnologies in the food industry- recent developments, risks and regulation. *Trends Food Sci. Technol.*, ۲۴: ۳۰-۴۶.
۲۵. Dingman, J. ۲۰۰۸. Nanotechnology: Its impact on food safety. *J. Environ. Health*, ۷۰: ۴۷-۵۰.
۲۶. Dong, Y., Phillips, K.S., Cheng, Q. ۲۰۰۶. Immunosensing of *Staphylococcus* enterotoxin B (SEB) in milk with PDMS microfluidic systems using reinforced supported bilayer membranes (r-SBMs). *Lab on a Chip*, ۶: ۶۷۵-۶۸۱.
۲۷. Doyle, E. ۲۰۰۶. Nanotechnology: A brief literature review. Food Research Institute, University of Wisconsin Madison.
۲۸. Duncan, T.V. ۲۰۱۱. Applications of nanotechnology in food packaging and food safety: Barrier materials, antimicrobials and sensors. *J. Colloid Interface Sci.*, ۳۶۳(۱): ۱-۲۴.
۲۹. Duran, N., Marcato, P.D., De Souza, G.I.H., Alves, O.L., Esposito, E. ۲۰۰۷. Antibacterial effect of silver nanoparticles produced by fungal process on textile fabrics and their effluent treatment. *J. Biomed. Nanotechnol.*, ۲: ۲۰۳-۸.
۳۰. Duran, N., Marcato, P.D. ۲۰۱۳. Nanobiotechnology perspectives. Role of nanotechnology in the food industry: a review. *Int. J. Food Sci. Technol.*, ۴۸: ۱۱۲۷.
۳۱. EFSA - European Food Safety Authority, ۲۰۰۰. The potential risks arising from nanoscience and nanotechnologies on food and feed safety (EFSA-Q-۲۰۰۷-۱۲۴a). *EFSA J.*, ۹۵۸: ۱-۳۹.
۳۲. Egger, S., Lehmann, R.P., Height, M.J., Loessner, M.J., Schuppler, M. ۲۰۰۹. Antimicrobial properties of a novel silver-silica nanocomposite material. *Appl. Environ. Microbiol.*, ۷۵: ۲۹۷۳-۶.
۳۳. Emamifar, A., Kadivar, M., Shahedi, M., Soleimani-Zad, S. ۲۰۱۱. Effect of nanocomposite packaging containing Ag and ZnO on inactivation of *Lactobacillus plantarum* in orange juice. *Food Control*, ۲۲: ۴۰۸-۴۱۳.
۳۴. Goyal, S., Goyal, G.K. ۲۰۱۲. Nanotechnology in food packaging a critical review. *Russ. J. Agricult. Socio-Econ. Sci.*, ۱۰(۱۰): ۱۴-۲۴.
۳۵. Gupta, A., Silver, S. ۱۹۹۸. Molecular Genetics: Silver as a biocide: Will resistance become a problem? *Nature Biotechnol.*, ۱۶: ۸۸۸.
۳۶. Hajipour, M.J., Fromm, K.M., Ashkarran, A.A., de Aberasturi, D.J., de Larramendi, I.R., Rojo, T., Serpooshan, V., Parak, W.J., Mahmoudi M. ۲۰۱۲. Antibacterial properties of Nanoparticles. *Trends Biotechnol.*, ۳۰(۱): ۵۹۹-۵۱۱.
۳۷. Halliday, J. ۲۰۰۷. EU Parliament votes for tougher additives regulation. FoodNavigator.com

۳۸. Heinlaan, M., Ivask, A., Blinova, I., Dubourguier, H.-C. and Kahru, A. ۲۰۰۸. Toxicity of nanosized and bulk ZnO, CuO and TiO₂ to bacteria *Vibrio fischeri* and crustaceans *Daphnia magna* and *Thamnocephalus platyurus*. *Chemosphere*, ۷۱: ۱۳۰۸-۱۳۱۶.
۳۹. Holley, C. ۲۰۰۵. Nanotechnology and packaging. Secure protection for the future. *Verpackungs-Rundschau*, ۵۶: ۵۳-۵۶.
۴۰. Incoronato, A.L., Conte, A., Buonocore, G.G., Del Nobile, M.A. ۲۰۱۱. Agar hydrogel with silver nanoparticles to prolong the shelf life of Fior Di Latte Cheese. *J. Dairy Sci.*, ۹۴: ۱۶۹۷-۱۷۰۴.
۴۱. Inoue, Y., Hoshino, M., Takahashi, H., Noguchi, T., Murata, T., Kanzaki, Y., Hamashima, H., Sasatsu, M. ۲۰۰۲. Bactericidal activity of Ag-zeolite mediated by reactive oxygen species under aerated conditions. *J. Inorg. Biochem.*, ۹۲: ۳۷-۴۲.
۴۲. Kah, M., Hofmann, T. ۲۰۱۴. Nanopesticide research: current trends and future priorities. *Environ. Int.*, ۶۳: ۲۲۴-۲۳۵.
۴۳. Kang, S., Mauter, M.S., Elimelech, M. ۲۰۰۹. Microbial cytotoxicity of carbon-based nanomaterials: implications for river water and wastewater effluent. *Environ. Sci. Technol.*, ۴۳(۷): ۲۶۴۸-۵۳.
۴۴. Kang, S., Pinault, M., Pfefferle, L.D., Elimelech, M. ۲۰۰۷. Single-walled carbon nanotubes exhibit strong antimicrobial activity. *Langmuir*, ۲۳(۱۷): ۸۶۷۰-۳.
۴۵. Kawahara, K., Tsuruda, K., Morishita, M., Uchida, M. ۲۰۰۰. Antibacterial effect of silver zeolite on oral bacteria under anaerobic condition. *Dent. Mater.*, ۱۶: ۴۵۲-۵.
۴۶. Kim, B., Kim, D., Cho, D., Cho, S. ۲۰۰۳. Bactericidal effect of TiO₂ photocatalyst on selected food-borne pathogenic bacteria. *Chemosphere*, ۵۲: ۲۷۷-۲۸۱.
۴۷. Kim, J.S., Kuk, E., Yu, K.N., Kim, J.H., Park, S.J., Lee, H.J. ۲۰۰۷. Antimicrobial effects of silver nanoparticles. *Nanomed. Nanotechnol. Biol. Med.*, ۳: ۹۵-۱۰۱.
۴۸. Klaine, S.J., Alvarez, P.J.J., Batley, G.E., Fernandes, T.F., Handy, R.D., Lyon, D.Y., Mahendra, S., McLaughlin, M.J., Lead, J.R. ۲۰۰۸. Nanomaterials in the environment: behavior, fate, bioavailability, and effects. *Environ. Toxicol. Chem.*, ۲۷(۹): ۱۸۲۵-۱۸۵۱.
۴۹. Kookana, R.S., Boxall, A.B.A., Reeves, P.T., Ashauer, R., Beulke, S., Chaudhry, Q. ۲۰۱۴. Nanopesticides: guiding principles for regulatory evaluation of environmental risks. *J. Agricult. Food Chem.*, ۶۲: ۴۲۲۷-۴۲۴۰.
۵۰. Krishna, V., Pumprueg, S., Lee, S.H., Zhao, J., Sigmund, W., Koopman, B., Moudgil, B.M. ۲۰۰۵. Photocatalytic disinfection with titanium dioxide coated multi-wall carbon nanotubes. *Process Safety Environ. Protect.*, ۸۳: ۳۹۳-۳۹۷.
۵۱. LaCoste, A., Schaich, K., Zumbrennen, D., Yam, K. ۲۰۰۵. Advanced controlled release packaging through smart blending. *Package Technol. Sci.*, ۱۸: ۷۷-۸۷.
۵۲. Lagarón, J.M., Cabedo, L., Cava, D., Feijoo, J.L., Gavara, R., Gimenez, E. ۲۰۰۵. Improving packaged food quality and safety. Part ۲: Nanocomposites. *Food Addit. Contam.*, ۲۲: ۹۹۴-۹۹۸.
۵۳. Lerner, M.B., Goldsmith, B.R., McMillon, R. ۲۰۱۱. A carbon nanotube immunosensor for *Salmonella*. *AIP Adv.*, ۱: ۰۴۲۱۲۷.
۵۴. Li, Q., Mahendra, S., Lyon, D. Y., Brunet, L., Liga, M.V., Li, D., Alvarez, P.J.J. ۲۰۰۸. Antimicrobial nanomaterials for water disinfection and microbial control: Potential applications and implications. *Water Resour.*, ۴۲(۱۸): ۴۵۹۱-۶۰۲.
۵۵. Li, Z., Sheng, C. ۲۰۱۴. Nanosensors for food safety. *J. Nanosci. Nanotechnol.*, ۱۴(۱): ۹۰۵-۱۲.

۵۶. Llorens, A., Lloret, E., Picouet, P.A., Trbojevich, R., Fernandez, A. ۲۰۱۲. Metallic-based micro and nanocomposites in food contact materials and active food packaging. *Trends Food Sci. Technol.*, ۲۴: ۱۹-۲۹.
۵۷. Marambio Jones, C., Hoek, E.M.V. ۲۰۱۰. A review of the antibacterial effects of silver nanomaterials and potential implications for human health and the environment. *J. Nanoparticle Res.*, ۱۲(۵): ۱۵۳۱-۵۱.
۵۸. Matsumura, Y., Yoshikata, K., Kunisaki, S.I., Tsuchido, T. ۲۰۰۳. Mode of bactericidal action of silver zeolite and its comparison with that of silver nitrate. *Appl. Environ. Microbiol.*, ۶۹(۷): ۴۲۷۸-۸۱.
۵۹. Mihindukulasuriya, S.D.F., Lim, L.-T. ۲۰۱۴. Nanotechnology development in food packaging: A review. *Trends Food Sci. Technol.*, ۴۰: ۱۴۹-۱۶۷.
۶۰. Momin, J.K., Jayakumar, C., Prajapati, J.B. ۲۰۱۳. Potential of nanotechnology in functional foods. *Emirates J. Food Agricult.*, ۲۵(۱): ۱۰-۱۹.
۶۱. Morones, J.R., Elechiguerra, J.L., Camacho, A., Ramirez, J.T. ۲۰۰۵. The bactericidal effect of silver nanoparticles. *Nanotechnology*, ۱۶: ۲۲۴۶-۵۳.
۶۲. Morris, V.J., Woodward, N.C., Gunning, A.P. ۲۰۱۱. Atomic force microscopy as a nanoscience tool in rational food design. *J. Sci. Food Agricult.*, ۹۱: ۲۱۱۷-۲۱۲۵.
۶۳. Mozafari, M.R., Flanagan, J., Matia-Merino, L. ۲۰۰۶. Recent trends in the lipidbased nanoencapsulation of antioxidants and their role in foods. *J. Sci. Food Agricult.*, ۸۶: ۲۰۳۸-۲۰۴۵.
۶۴. Mozafari, M.R., Johnson, C., Hatziantoniou, S., Demetzos, C. ۲۰۰۸. Nanoliposomes and their applications in food nanotechnology. *J. Liposome Res.*, ۱۸(۴): ۳۰۹-۳۲۷.
۶۵. Nakamura, H., Karube, I. ۲۰۰۳. Current research activity in biosensors. *Anal. Bioanal. Chem.*, ۳۷۷: ۴۴۶-۴۶۸.
۶۶. Othman, S.H. ۲۰۱۴. Bio-nanocomposite materials for food packaging applications: types of biopolymer and nano-sized filler. *Agricult. Agricult. Sci. Procedia*, ۲: ۲۹۶-۳۰۳.
۶۷. Pinto, R.J.B., Daina, S., Sadocco, P., Neto, C.P., Trindade, T. ۲۰۱۳. Antibacterial activity of nanocomposites of copper and cellulose. *BioMed. Res. Int.*, Article ID ۲۸۰۵۱۲, ۶.
۶۸. Qi, L., Xu, Z., Jiang, X., Hu, C., Zou, X. ۲۰۰۴. Preparation and antibacterial activity of chitosan nanoparticles. *Carbohydr. Res.*, ۳۳۹: ۲۶۹۳-۲۷۰۰.
۶۹. Rai, M., Yadav, A., Dade, A. ۲۰۰۹. Silver nanoparticles as a new generation of antimicrobials. *Biotechnol. Adv.*, ۲۷: ۷۶-۸۳.
۷۰. Ray, S., Maiti, P., Okamoto, M., Yamada, K., Ueda, K. ۲۰۰۲. New polylactide/layered silicate nanocomposites. ۱. Preparation, characterization and properties. *Macromolecules*, ۳۵: ۳۱۰۴-۳۱۱۰.
۷۱. Rhim, J.-W., Hong, S.-I., Park, H.-W., Ng, P.K.W. ۲۰۰۶. Preparation and characterization of chitosan-based nanocomposite films with antimicrobial activity. *J. Agricult. Food Chem.*, ۵۴: ۵۸۱۴-۵۸۲۲.
۷۲. Rivas, G.A., Miscoria, S.A., Desbrieres, J., Barrera, G.D. ۲۰۰۶. New biosensing platforms based on the layer-by-layer self-assembling polyelectrolytes on Nafion/carbon nanotubes-coated glassy carbon electrodes, *Talanta*.
۷۳. Rossi, M., Cubaddac, F., Dinid, L., Terranova, M.L., Aurelic, F., Sorbof, A., Passeria, D. ۲۰۱۴. Scientific basis of nanotechnology, implications for the food sector and future trends. *Trends Food Sci. Technol.*, ۴۰: ۱۲۷-۱۴۸.
۷۴. Sanders, K., Degn, L.L., Mundy, W.R., Zucker, R.M., Dreher, K., Zhao, B., Roberts J.E., Boyes, W.K. ۲۰۱۲. In vitro phototoxicity and hazard identification of nano-scale titanium dioxide. *Toxicol. Appl. Pharmacol.*, ۲۵۸: ۲۲۶-۲۳۶.

۷۵. Sanguansri, P., Augustin, M.A. ۲۰۰۶. Nanoscale materials development A food industry perspective. *Trends Food Sci. Technol.*, ۱۷: ۵۴۷-۵۵۶.
۷۶. Scheffler, S.L., Wang, X., Huang, L., Gonzalez, F.S., Yao, Y. ۲۰۱۰. Phytoglycogen octenyl succinate, an amphiphilic carbohydrate nanoparticle, and -polylysine to improve lipid oxidative stability of emulsions. *J. Agricult. Food Chem.*, ۵۸: ۶۶۰-۶۶۷.
۷۷. Schrand, A.M., Rahman, M.F., Hussain, S.M., Schlager, J.J., Smith, D.A., Syed, A.F. ۲۰۱۰. Metal-based nanoparticles and their toxicity assessment. *WIREs Nanomed. Nanobiotechnol. Nanoparticl. Toxicity*, ۲(۵): ۵۴۴-۵۶۷.
۷۸. Seil, J.T., Webster, J.T. ۲۰۱۲. Antimicrobial applications of nanotechnology: methods and literature. *Int. J. Nanomed.*, ۷: ۲۷۶۷-۲۷۸۱.
۷۹. Sekhon, B.S. ۲۰۱۰. Food nanotechnology an overview. *Nanotechnol. Sci. Appl.*, ۳: ۱-۱۵.
۸۰. Silvestre, C., Duraccio, D., Cimmino, S. ۲۰۱۱. Food packaging based on polymer nanomaterials. *Prog. Polymer Sci.*, ۳۶: ۱۷۶۶-۱۷۸۲.
۸۱. Sinha, N., Ma, J., Yeow, J.T.W. ۲۰۰۶. Carbon nanotube-based sensors. *Nanosci. Nanotechnol.*, 1(۶): ۵۷۳-۵۹۰.
۸۲. Stark, W.J. ۲۰۱۱. Nanoparticles in biological systems. *Angewandte Chemie Int. Edn.*, ۵۰: ۱۲۴۲-۱۲۵۸.
۸۳. Stoimenov, P.K., Klinger, R.L., Marchin, G.L., Klabunde, K.J. ۲۰۰۲. Metal oxide nanoparticles as bactericidal agents. *Langmuir*, ۱۸(۱۷): ۶۶۷۹-۶۶۸۶.
۸۴. Tan, H., Ma, R., Lin, C., Liu, Z., Tang, T. ۲۰۱۳. Quaternized chitosan as an antimicrobial agent: antimicrobial activity, mechanism of action and biomedical applications in orthopedics. *Int. J. Mol. Sci.*, ۱۴: ۱۸۵۴-۱۸۶۹.
۸۵. Tang, D., Saucedo, J. C., Lin, Z., Ott, S., Basova, E., Goryacheva, I., Biselli, S., Lin, J., Niessner, R., Knopp, D. ۲۰۰۹. Magnetic nanogold microspheresbased lateral-flow immunodipstick for rapid detection of aflatoxin B_۲ in food. *Biosens. Bioelectron.*, ۲۵: ۵۱۴-۵۱۸.
۸۶. Teow, Y., Asharani, P.V., Hand, M.P., Valiyaveetil, S. ۲۰۱۱. Health impact and safety of engineered nanomaterials. *Chem. Commun.*, ۴۷: ۷۰۲۵-۷۰۳۸.
۸۷. Thangave, G., Thiruvengadam, S. ۲۰۱۴. Nanotechnology in food industry A review. *Int. J. Chem. Tech. Res.*, ۱۶(۹): ۴۰۹۶-۴۱۰۱.
۸۸. Tinkle, S., McNeil, S.E., M uhlebach, S., Bawa, R., Borchard, G., Barenholz, Y. ۲۰۱۴. Nanomedicines: addressing the scientific and regulatory gap. *Ann. New York Acad. Sci.*, ۱۳۱۳: ۳۵-۵۶.
۸۹. Valdiglesias, V., Costa, C., Sharma, C., Kilic, G., Pasaro, E., Teixeira, J.P., Dhawan A., Laffon, B. ۲۰۱۳. Comparative study on effects of two different types of titanium dioxide nanoparticles on human neuronal cells. *Food Chem. Toxicol.*, ۵۷: ۳۵۲-۳۶۱.
۹۰. Vargas, M., Pastor, C., Chiralt, A., McClements, D.J., Gonzalez-Martinez, C. ۲۰۰۸. Recent advances in edible coatings for fresh and minimally processed fruits. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.*, ۴۸: ۴۹۶-۵۱۱.
۹۱. Vidhyalakshmi, R., Bhakyaraj, R., Subhasree, R.S. ۲۰۰۹. Encapsulation The future of probiotics A review. *Adv. Biol. Res.*, ۳۴: ۶-۱۰۳.
۹۲. Vo-Dinh, T., Cullum, B.M., Stokes, D.L. ۲۰۰۱. Nanosensors and biochips: Frontiers in biomolecular diagnostics. *Sens. Actuators B. Chem.*, ۷۴: ۲-۱۱.
۹۳. Vohra, A., Goswami, D.Y., Deshpande, D.A., Block, S.S. ۲۰۰۵. Enhanced photocatalytic inactivation of bacterial spores on surfaces in air. *J. Ind. Microbiol. Biotechnol.*, ۳۲: ۳۶۴-۳۷۰.

۹۴. Vohra, A., Goswami, D.Y., Deshpande, D.A., Block, S.S. ۲۰۰۶. Enhanced photocatalytic disinfection of indoor air. *Appl. Catalysis B-Environ.*, ۶۴: ۵۷-۶۵.
۹۵. Weiss, J., Takhistov, P., McClements, D.J. ۲۰۰۶. Functional materials in food nanotechnology. *J. Food Sci.*, ۷۱(۹): R۱۰۷ R۱۱۶.
۹۶. Wokovich, A., Tyner, K., Doub, W., Sadrieh, N., Buhse, L.F. ۲۰۰۹. Particle size determination of sunscreens formulated with various forms of titanium dioxide. *Drug Dev. Ind. Pharm.*, ۳۵(۱۰): ۱۱۸۰-۹.
۹۷. Yang, H., Qu, L., Lin, Y., Sun, Y., Jiang, X. ۲۰۰۷. Detection of *Listeriamonocytogenes* in biofilms using immunonanoparticles. *J. Biomed. Nanotechnol.*, ۳: ۱۳۱-۱۳۸.
۹۸. Yang, J.Y., Li, Y., Chen, S.M., Lin, K.C. ۲۰۱۱. Fabrication of a cholesterol biosensor based on cholesterol oxidase and multiwall carbon nanotube hybrid composites. *Int. J. Electrochem. Sci.*, ۶: ۲۲۲۳-۲۲۳۴.
۹۹. Yoon, K.-Y., Byeon, J.H., Park J.-H., Hwang, J. ۲۰۰۷. Susceptibility constants of *Escherichia coli* and *Bacillus subtilis* to silver and copper nanoparticles. *Sci. Total Environ.*, ۳۷۳: ۵۷۲-۵۷۵.
۱۰۰. Yu, H., Huang, Y., Huang, Q. ۲۰۰۹. Synthesis and characterization of novel antimicrobial emulsifiers from - polylysine. *J. Agricult. Food Chem.*, ۵۸: ۱۲۹۰-۱۲۹۵.
۱۰۱. Yu, H.L., Huang, Q.R. ۲۰۱۰. Enhanced in vitro anti-cancer activity of curcumin encapsulated in hydrophobically modified starch. *Food Chem.*, ۱۱۹: ۶۶۹-۶۷۴.
۱۰۲. Zhu, K., Dietrich, R., Didier, A., Doyscher, D., Märklbauer, E. ۲۰۱۴. Recent developments in antibody-based assays for the detection of bacterial toxins. *Toxins*, ۶: ۱۳۲۵-۱۳۴۸.