مقاله ترویجی

مروری بر ویژگی‌های نانوذرّات دارای خاصیت ضدمیکروبی و کاربرد آن‌ها در بسته‌بندی فعال مواد غذایی

هادی الماسی [1*]، سعیده عزیزی [2]

تاریخ دریافت مقاله: خرداد ماه ۱۳۹۸

تاریخ پذیرش مقاله: مهرماه ۱۳۹۸

چکیده

در طی سال‌های اخیر، تمایل به گسترش و توسعه بسته‌بندی‌های نوین در صنایع غذایی بسیار مورد توجّه قرار گرفته است. یکی از مهم‌ترین انواع بسته‌بندی‌های نوین غذایی، بسته‌بندی‌های فعال حاوی ترکیبات نگهدارندهٔ مختلف می‌باشند. مواد ضدمیکروبی از جمله مهم‌ترین انواع ترکیبات فعال هستند که در طراحی بسته‌بندی فعال مورد استفاده قرار می‌گیرند. انواع مختلف ترکیبات ضدمیکروبی برای این منظور مورد استفاده قرار گرفته‌اند و نانوذرّات دارای خاصیت ضدمیکروبی یک دستهٔ مهم از آن‌ها محسوب می‌شوند. این نانوذرّات در ترکیب فیلم بسته‌بندی و یا به عنوان پوشش در سطح داخلی آن مورد استفاده قرار می‌گیرند و بدون مهاجرت به داخل مادهٔ غذایی، اثر میکروب‌کشی را در سطح محصول نشان می‌دهند. نانوذرّات فلزی مانند نانونقره و اکسیدهای فلزی (دی اکسید تیتانیوم، اکسید روی و اکسید مس) و همچنین برخی از نانوذرّات آلی (نانوذرّات کیتوزان) خاصیت ضدمیکروبی قابل توجّهی از خود نشان می‌دهند و در طی سال‌های اخیر، استفاده از آن‌ها در تولید بسته‌بندی فعال برای افزایش ماندگاری محصولات غذایی مختلف گسترش یافته است. در این مقالهٔ مروری، به انواع نانو مواد دارای خاصیت ضدمیکروبی که می‌توانند در تولید بسته‌بندی‌های فعال استفاده شوند اشاره شده است. ویژگی‌ها و خصوصیات شیمیایی این نانومواد، مکانیسم اثر ضدمیکروبی آن‌ها و همچنین مثال‌هایی از کاربرد آن‌ها در بسته‌بندی مواد غذایی، به تفصیل مورد بحث قرار گرفته است.

واژه‌های کلیدی

بسته‌بندی فعال، نانومواد ضدمیکروبی، ساختار شیمیایی، مکانیسم اثر، افزایش ماندگاری

۱- مقدمه

در طی سال‌های اخیر با پیشرفت فنّاوری و افزایش آگاهی مصرف‌کننده، تمایل به استفاده از موادغذایی تازه که متحمل کمترین فرایند شده باشند، گسترش زیادی یافته است. بسیاری از روش‌های رایج فرایند و نگهداری مواد غذایی، خصوصاً برای مواد غذایی تازه (مانند گوشت تازه) مناسب نبوده و علاوه بر کاهش ارزش غذایی محصول، اثرات نامطلوبی بر کیفیت نهایی آن دارند. استفاده از بسته‌بندی فعال[3]، روش نوینی برای نگهداری این نوع مواد غذایی می‌باشد و در سال‌های اخیر پژوهش‌های گسترده‌ای

۱- دانشیار گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه

(× نویسنده مسئول: h.almasi@urmia.ac.ir)

۲- دانشجوی کارشناسی‌ارشد گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه‌ارومیه (Saeedehazizi1991@yahoo.com)

3- Active Packaging

برای تولید و اقتصادی کردن آن انجام یافته است. بسته‌بندی فعال گروهی از بسته‌بندی‌هایی است که با اضافه کردن انواع مختلف افزودنی‌ها به فیلم بسته‌بندی و یا به داخل فضای بسته‌بندی عمر انبارمانی محصول را افزایش می‌دهند. در واقع بسته‌بندی فعال به‌نوعی از بسته‌بندی اطلاق می‌شود که علاوه بر نقش ذاتی خود در نگهداری و حفاظت مطلوب از مادهٔ بسته‌بندی‌شده، تغییرات مناسب دیگری نیز که یک بسته‌بندی ساده توانایی ایجاد و ارائه آن را ندارد، داشته باشد و از آن طریق به حفظ کیفیت و افزایش ماندگاری محصول کمک کند. از انواع ترکیبات مختلف و با اهداف گوناگون می‌توان در طراحی بسته‌بندی فعال مواد غذایی استفاده نمود. برخی از نانوساختارها و نانومواد آلی و معدنی نیز دارای خاصیت ضدمیکروبی می‌باشند و می‌توانند در طراحی بسته‌بندی فعال به‌کار روند. در این مقاله مروری، به معرفی انواع نانومواد دارای خاصیت ضدمیکروبی و استفاده از آن‌ها در بسته‌بندی فعال مواد غذایی پرداخته شده است.

۲- تعریف بسته‌بندی فعال و انواع آن

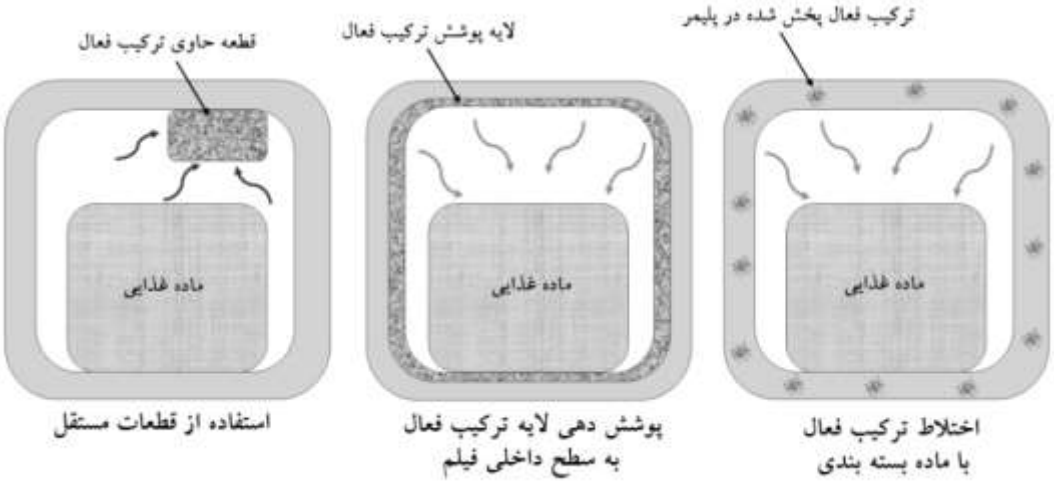
در یک تعریف عمومی، بسته‌بندی فعال، نوعی بسته‌بندی است که علاوه بر داشتن خواص بازدارندگی اصلی بسته‌بندی‌های معمول (مانند خواص بازدارندگی در برابر گازها، بخار آب و تنش‌های مکانیکی)، با تغییر شرایط بسته‌بندی، ایمنی، ماندگاری و یا ویژگی‌های حسی مادهٔ غذایی را بهبود می‌بخشد و در عین حال، کیفیت ماده غذایی را حفظ می‌کند [۱]. فنّاوری بسته‌بندی فعال شامل برهم کنش‌هایی بین غذا، مادهٔ بسته‌بندی (یا پوشش) و اتمسفر گازی داخل بسته می‌باشد که بایستی در عین حال که کیفیت و امنیت محصول را حفظ می‌کند، قادر به افزایش ماندگاری آن نیز باشد. بسته‌بندی فعّال می‌تواند نقش‌های متعدّدی را داشته باشد که در بسته‌بندی‌های رایج وجود ندارد. این نقش‌ها عبارتند از: - فعالیت ضد میکروبی جذب اکسیژن، رطوبت یا اتیلن (ویژگی اسکاونجری[1]) - رها کردن مواد طعم‌دهنده و یا اتانول.

بسته‌بندی‌های فعال شامل طیف گسترده‌ای از انواع بسته‌بندی‌ها با خصوصیات ویژه و کاربردهای مختلف می‌باشند. از انواع ترکیبات ضدمیکروبی، ضداکسیدانی، انواع جاذب‌ها اعم از جاذب‌های اکسیژن، دی‌اکسید کربن، اتیلن، ترکیبات ایجادکننده طعم، بو و جاذب رطوبت در این بسته‌بندی‌ها استفاده می‌شود[۳]. از نظر نحوهٔ به‌کارگیری سامانه‌های فعال در بسته‌بندی مواد غذایی نیز این سامانه‌ها را می‌توان به سه دسته تقسیم نمود [۳]:

الف) استفاده به شکل قطعات مستقل:

در این حالت، ترکیبات فعال در داخل وسائلی مانند ساشه، برچسب یا پد قرار گرفته و سپس این قطعات به لایهٔ داخلی فیلم بسته‌بندی الصاق می‌شوند. با توجّه به اینکه این نوع بسته‌بندی فعال نمی‌تواند با تمامی قسمت‌های ماده غذایی در تماس باشد، به همین دلیل از آن بیش‌تر برای انواعی از بسته‌بندی‌های فعال استفاده می‌شود که با ترکیبات گازی سروکار دارند. به این معنی که یا یک ترکیب گازی به داخل اتمسفر بسته‌بندی آزاد می‌کنند و یا اینکه ترکیبات گازی داخل بسته را جذب می‌کنند. از این نوع بسته‌بندی بیش‌تر برای سامانه‌های جاذب استفاده می‌شود. بسته‌بندی‌های جاذب اکسیژن، جاذب اتیلن، جاذب رطوبت و جاذب بو و مواد فرّار متداول‌ترین سامانه‌های بسته‌بندی فعال با استفاده از قطعات مستقل هستند. با این‌وجود، سامانه‌های رهایش دی اکسید کربن و دی اکسید سولفور نیز می‌توانند بدین شکل طراحی شوند. همچنین برخی از انواع بسته‌بندی‌های ضداکسیدانی و ضدمیکروبی که در آن‌ها از ترکیبات فرّار مانند اسانس‌های گیاهی استفاده شود نیز می‌توانند به این حالت طراحی شوند.

1- Scavenger



شکل ۱- روش‌های به‌کارگیری سامانه‌های فعال در بسته‌بندی مواد غذایی [۳]

ب) پوشش‌دهی لایه‌ای از ترکیب فعال بر روی سطح داخلی فیلم بسته‌بندی:

در این حالت، یک لایه از ترکیب فعال مورد نظر با روش‌هایی نظیر: اسپری کردن یا واکس زدن بر روی سطح داخلی فیلم بسته‌بندی تشکیل می‌شود و سپس آن فیلم برای بسته‌بندی محصول غذایی مورد استفاده قرار می‌گیرد. این روش برای طراحی سامانه‌های رهایش کاربرد دارد. این روش تنها برای آن دسته از مواد فعالی قابل استفاده است که قدرت تشکیل لایه‌ای پیوسته دارند و ترکیبات پودری و خشک مانند نانوذرّات ضدمیکروبی را نمی‌توان به این شکل مورد استفاده قرار داد. همچنین در این روش، کل ترکیب فعال مورد استفاده از همان شروع بسته‌بندی، با ماده غذایی تماس داشته و مسلماً بر روی خواص حسی محصول مؤثر خواهد بود. همچنین به‌دلیل برقراری تماس در غلظت‌های بالا، لازم است ترکیب مورد استفاده از ایمنی کافی برای سلامتی برخوردار باشد. از این روش برای مواد غذایی جامد و بیش‌تر برای شرایطی که رهایش و نفوذ سریع ترکیب فعال به داخل ماده غذایی مدنظر باشد، استفاده می‌شود.

ج) اختلاط ترکیب فعال با ماده بسته‌بندی:

این روش متداول‌ترین حالت طراحی بسته‌بندی‌های فعال با سامانه رهایش محسوب می‌شود.

در این حالت، ترکیب فعال با پلیمر یا بیوپلیمر بسته‌بندی مخلوط شده و سپس اقدام به تهیهٔ فیلم از مخلوط آن‌ها می‌شود. در نتیجه ترکیب فعال در بستر فیلم بسته‌بندی به‌طور کامل پخش‌شده و کل آن فیلم بسته‌بندی، فعالیت مدنظر را در طول نگهداری محصول نشان خواهد داد. شکل(۱) مکانیسم عمل سه نوع طراحی بسته‌بندی‌های فعال را نشان می‌دهد.

۳- انواع مواد ضدمیکروبی قابل استفاده در بسته‌بندی‌های فعال

همان طور که در (جدول۱) اشاره شده‌است، رهاکننده‌های مواد نگهدارنده یکی از انواع بسته‌بندی‌های فعال محسوب می‌شوند. ترکیبات ضدمیکروبی دستهٔ وسیعی از مواد نگهدارنده هستند که در طراحی بسته‌بندی فعال مورد استفاده قرار می‌گیرند.

جدول ۱- بسته‌بندی‌های فعال ضدمیکروبی حاوی نانوذرّات فلزی و اکسید فلزی

نانوذرّه	ماده بسته‌بندی	ماده غذایی	نتایج	منبع
Ag	PS	–	اثر ضدمیکروبی قوی روی اشرشیاکلی، سالمونلا و سرئوس عدم تأثیر روی سودوموناس	[۱۱]
Ag	HPMC	–	نابودی کامل باکتری‌های اورئوس و اشرشیاکلی پس از ۲۴ ساعت، افزایش قدرت ضدمیکروبی با کاهش اندازه نانوذرّات از ۱۰۰ به ۴۱	[۱۲]
Ag	آلژینات سدیم	گلابی و هویج	نانومتر و افزایش ماندگاری هر دو محصول به مدّت ۱۰ روز	[۱۳]
Ag	سلولز	گوشت	کاهش رشد میکروبی تا ۹۰ درصد کمتر از نمونه شاهد	[۱۴]
Ag	LDPE	برش‌های سیب	کاهش افت وزن و قهوه‌ای شدن	[۱۵]
TiO_2	HDPE	پنیر تازه	توقّف رشد باکتری‌های اسید لاکتیک، تأثیر قابل توجّه در کنترل رشد سودوموناس‌ها، اشرشیاکلی و کپک و مخمر	[۱۶]
TiO_2	LDPE	گلابی	تأثیر کشندگی روی گونه‌های سودوموناس و رودوتورولاموسیلاگینوسا و افزایش سه برابری اثر ضدمیکروبی پس از تابش اشعه فرابنفش، کاهش تعداد باکتری‌های مزوفیل و کپک‌ها و افزایش ماندگاری محصول	[۱۷]
TiO_2	نشاسته سیب‌زمینی	–	کاهش نفوذپذیری به بخار آب، بهبود خواص مکانیکی و ممانعت از عبور اشعه فرابنفش	[۱۸]
ZnO	کیتوزان	–	تأثیر قابل توجّه روی رشد باکتری‌های سابتلیس، اشرشیاکلی، اورئوس و کپک‌های پنسیلیوم، اسپرگیلوس و ریزوپوس	[۱۹]
ZnO Ag	LDPE	آب‌پرتقال	توقّف افزایش شمارش کلی کپک، مخمر و باکتری‌های هوازی در طول هفت روز نگهداری	[۲۰]
ZnO	سلولز باکتریایی	–	تأثیر قابل توجّه در کنترل رشد اشرشیاکلی و اورئوس کاهش اندازه نانوذرّات تحت تأثیر تیمار فراصوت و افزایش خاصیت ضدمیکروبی آن‌ها	[۲۱]

از انواع مختلف مواد نگهدارندهٔ ضدمیکروبی می‌توان در تولید بسته‌بندی فعال استفاده نمود. موادی نظیر اسیدهای آلی و نمک‌های آن‌ها، قارچ‌کش‌ها، باکتریوسین‌ها[1]، آنتی‌بیوتیک‌ها[2]، آنزیم‌ها، الکل‌ها، تیول‌ها[3]، ضداکسیدان‌ها، فلزات و گازهای ضدعفونی‌کننده از جمله این مواد هستند[۲].

ویژگی‌هایی که یک ترکیب ضدمیکروبی مورد استفاده در بسته‌بندی‌های فعال باید داشته باشد عبارتند از :

- مورد تأیید سازمان‌های نظارت‌کننده بوده و برای تماس با مادهٔ غذایی مجاز باشد.
- قیمت پایینی داشته باشد تا مقرون به صرفه باشد.
- بر طیف وسیعی از میکروارگانیسم‌ها مؤثر باشد.
- در غلظت‌های کم بر میکروارگانیسم‌ها مؤثر باشد.
- بر خواص حسی مواد غذایی تأثیر منفی نداشته باشد.

٤- نانوذرّات فلزی و اکسید فلزی به عنوان ترکیبات ضدمیکروبی

همان طور که در (جدول۱) مشاهده می‌شود، فلزات از جمله ترکیباتی هستند که می‌توانند خاصیت ضدمیکروبی نشان دهند. خصوصیات ضدمیکروبی عناصر فلزی مختلف در منابع متعدّد بررسی و گزارش شده‌اند. نقره، تیتانیوم و روی از جمله عناصر فلزی دارای خاصیت ضدمیکروبی

1- Bacteriocins
2- Antibiotics
3- Thiols

می‌باشند. خصوصیات ضدمیکروبی این عناصر به میزان زیادی تحت تأثیر اندازهٔ ذرّات قرار می‌گیرد. به‌طوری که با کاهش اندازه و افزایش نسبت سطح به حجم این ذرّات، تأثیرات ضدمیکروبی آن‌ها به شدّت افزایش می‌یابد. با توجّه به این موضوع، در چند دههٔ اخیر توجّه به تولید نانوذرّات فلزی به دلیل بالا بودن نسبت سطح به حجم آن‌ها بسیار مورد توجّه قرار گرفته است. این نانوذرّات بر روی باکتری‌ها، قارچ‌ها و ویروس‌ها خواص ضد رشد و مهارکنندگی و همچنین اثر کشندگی نشان داده‌اند که در ادامه به آن‌ها اشاره می‌شود [۴].

٤-١- نانوذرّات نقره

یکی از پرکاربردترین نانوذرّات فلزی دارای خاصیت ضدمیکروبی، نانونقره است. نقره از ۱۰۰ سال پیش در کاربردهای پزشکی مورد استفاده قرار گرفته است. اثر ضدباکتریایی این فلز در درمان جراحات، زخم‌های عفونی مزمن و زخم‌های دیابتی، سوختگی‌ها و بیماری سیفلیس[1] به اثبات رسیده است. همچنین خاصیت ضدویروسی و ضدقارچی و همچنین اثر هم‌افزایی[2] نانونقره با آنتی‌بیوتیک‌ها نیز اثبات شده است. به‌طورکلی، نقره بر روی طیف وسیعی از میکروارگانیسم‌ها شامل: باکتری‌های گرم مثبت و گرم منفی، کپک‌ها، مخمرها و برخی ویروس‌ها اثر کشندگی نشان داده و یک ترکیب ضدمیکروبی مؤثر به‌حساب می‌آید.

با کاهش اندازهٔ ذرّات نقره تا حد نانو، به دلیل افزایش نسبت سطح به حجم، فعالیت بیولوژیکی آن افزایش‌یافته و قدرت برهمکنش آن با سلول‌های میکروبی به‌مراتب افزایش می‌یابد. به همین دلیل، نانوذرّات نقره، خاصیت ضدمیکروبی بسیار قوی‌تری نسبت به ذرّات با اندازهٔ بزرگ‌تر نشان می‌دهد. این موضوع توسط دام[3] و همکاران (۲۰۰۸) به اثبات رسیده است. این محققین کارایی فیلم میکروکامپوزیت پلی‌آمید ۶ / نقره حاوی ۱/۹ درصد نقره (PA/Ag) و فیلم نانوکامپوزیت پلی‌آمید ۶ / نانونقره حاوی ۰/۰۶ درصد نانونقره (PA6/AgNP) را در استفاده به‌عنوان بسته‌بندی ضدمیکروبی مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج نشان دادند که هرچند فیلم نانوکامپوزیت PA6/AgNP نسبت به فیلم میکروکامپوزیت ترکیب ضدمیکروبی کمتری دارد، با این‌وجود، این فیلم قادر است باکتری اشرشیاکلی را به‌طور کامل نابود کند درحالی‌که فیلم میکروکامپوزیت PA6/Ag در همان رقت باکتری، تنها قادر بود ۸۰ درصد میکروارگانیسم‌ها را نابود کند [۵].

تاکنون مکانیسم اثر ضدمیکروبی نانوذرّات نقره به‌طور دقیق مشخص نشده است. با این‌حال، به‌طورکلی، چهار مکانیسم عمده برای خاصیت ضدمیکروبی نانونقره پیشنهاد شده است که عبارت‌اند از:

۱) رهایش تدریجی یون Ag^+ که منجر به توقّف تولید ATP و همانندسازی DNA در سلول میکروارگانیسم می‌شود. یون Ag^+ به گروه‌های‌دهنده الکترون در مولکول‌های بیولوژیکی حاوی گوگرد، اکسیژن یا نیتروژن نظیر گروه‌های تیول، فسفات، هیدروکسیل و آمین در پروتئین‌های میکروارگانیسم متصل شده و بدین ترتیب باعث غیرفعال شدن آنزیم‌های میکروبی می‌گردد. در نتیجهٔ تغییر ماهیت آنزیم‌ها، همانندسازی DNA در سلول متوقّف می‌شود.

۲) اتصال نانونقره به سطح سلول، نفوذ و آسیب به دیواره لیپوپلی‌ساکاریدی و غشای پلاسمایی و در نتیجه افزایش نفوذپذیری سلول و همچنین برهمکنش با پروتئین‌های غشایی که نتیجهٔ آن جلوگیری از تکثیر سلولی است.

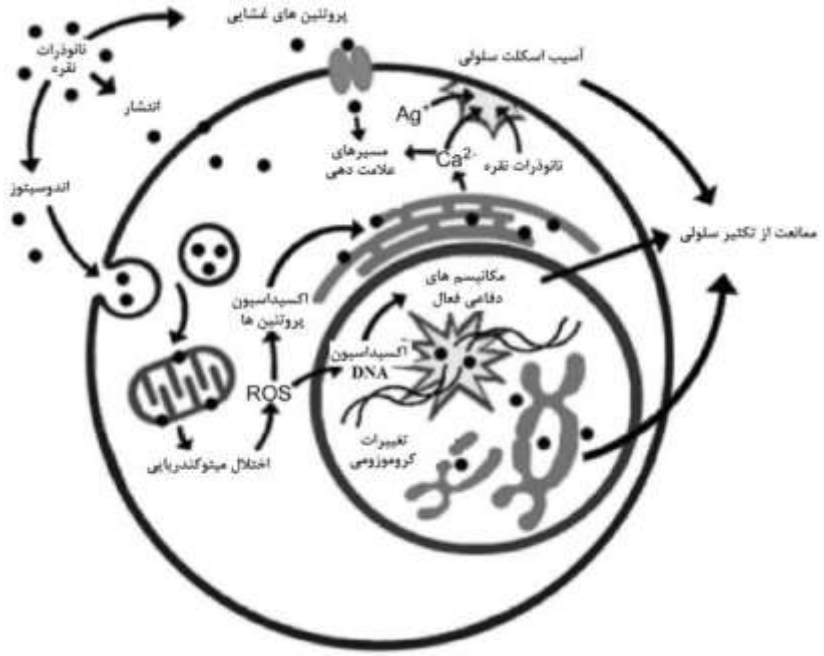
۳) نفوذ مستقیم نانونقره به داخل سلولز از طریق پدیدهٔ انتشار و یا اندوسیتوز[4] که منجر به تغییر عملکرد میتوکندری[5] می‌شود.

۴) تولید گونه‌های اکسیژن فعال[6] (ROS) و رادیکال‌های آزاد به‌وسیلهٔ نانوذرّات نقره و یون‌های Ag^+

1- Syphilis
2- Synergistic Effect
3- Damm
4- Endocytosis
5- Mitochondria
6- Reactive Oxygen Species

که باعث آسیب پروتئین‌ها و نوکلئیک اسید در داخل سلول شده و با توقّف تولید آنزیم‌های چرخه انرژی، در نهایت منجر به جلوگیری از تکثیر سلول می‌شوند. زمانی که غلظت ROS در داخل سلول به بیشتر از ظرفیت سامانه دفاع آنتی‌اکسیدانی سلول برسد، تنش اکسیداتیو رخ می‌دهد. تخلیهٔ گلوتاتیون[1] و گروه‌های سولفیدریل[2] پروتئین‌ها و تغییر در فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی مختلف از جمله تأثیرات تنش اکسیداتیو به‌حساب می‌آید. یک مکانیسم سمیّت مهم برای نقره به شکل یون و یا نانوذرّات، واکنش آن‌ها با ماکرومولکول‌های گوگرددار نظیر پروتئین‌های میکروارگانیسم‌ها است چرا که نقره تمایل بسیار شدیدی به واکنش با گروه‌های سولفور دارد. شکل(۲) طرح شماتیک مکانیسم‌های اثر ضدمیکروبی نانوذرّات نقره را نشان می‌دهد[۶].

اثر ضدمیکروبی نانوذرّات نقره بر روی انواع مختلفی از باکتری‌ها نظیر *اشرشیاکلی*[3]، *باسیلوس سوبتیلیس*[4]، *ویبریو کلرا*[5]، *سودوموناس آئروجینوزا*[6]، *سالمونلا تایفی*[7] و *استافیلوکوکوس اورئوس*[8] مورد مطالعه قرار گرفته و به اثبات رسیده است. همچنین نانونقره بر روی گونه‌های مختلف کپکی از جنس *آسپرژیلوس*[9]، *کاندیدا*[10] و *ساکارومایسز*[11] و همچنین ویروس‌هایی نظیر ویروس HIV-1 اثر کشندگی نشان داده است [۶]. به‌طورکلی، نانونقره بر روی بیش از ۶۵۰ نوع باکتری، کپک، مخمر و ویروس اثر ضدمیکروبی نشان داده است. از جمله مزایای نانوذرّات نقره علاوه بر اثر بر روی طیف وسیعی از میکروارگانیسم‌ها این است که بر روی میکروب‌های مقاوم به مواد ضدمیکروبی مولکولی و آنتی‌بیوتیک‌ها نیز مؤثر می‌باشد. همچنین در غلظت‌های پایین مورد استفاده برای



شکل ۲- طرح شماتیک مکانیسم‌های اثر ضدمیکروبی نانوذرّات نقره [٦]

1- Glutathione
2- Sulfhydryl

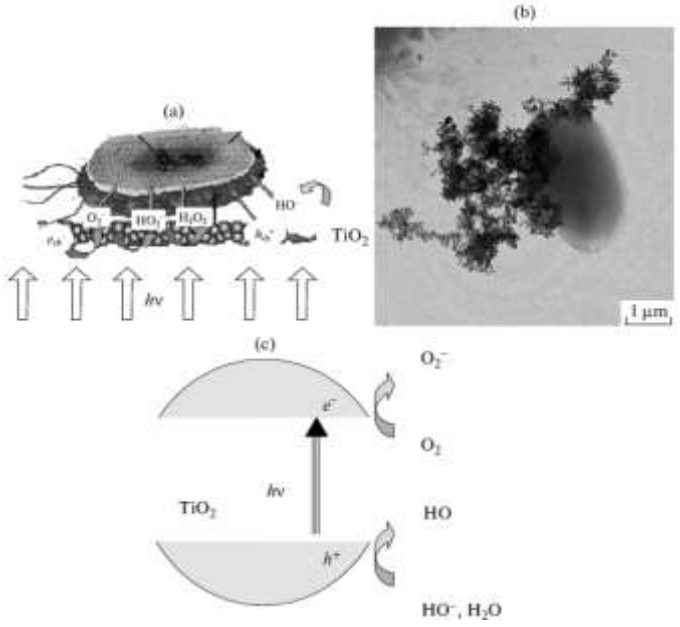
3- *Escherichia Coli*
4- *Bacillus Subtilis*
5- *Vibrio Cholera*
6- *Psuedomonas Aeruginosa*
7- *Salmonella Typhi*
8- *Staphylococcus Aureus*
9- *Aspergillus*
10- *Candida*
11- *Saccharomyces*

نشـان دادن اثـر ضـدمیکروبی، بـرای انسـان و جانـداران (سلول‌های یوکاریوت[1]) ایمن و بـی‌ضـرر مـی‌باشـد. مقـدار موردنیاز نانونقره برای نشـان دادن اثـر بـاکتری‌کشـی در آب، ۱۰۰-۵۰ میکروگرم بر کیلوگرم است. مشخص‌شده که شدّت اثر ضدمیکروبی نقره بر روی باکتری‌های گرم منفی بیشـتر از بـاکتری‌هـای گـرم مثبـت مـی‌باشـد. وجـود لایـه ضـخیم پپتیـدوگلیکان[2] در بـاکتری‌هـای گـرم مثبـت باعـث جـذب یون‌های نقره در لایه‌های خارجی و انتقال آهسته‌تر آن‌هـا بـه داخل سلول می‌شود که نتیجه آن اثـرات ضـدمیکروبی کمتـر خواهد بود. نتایج برخی از مطالعات صورت گرفته در زمینـه تولید بسته‌بندی‌های فعال ضدمیکروبی حاوی نانوذرّات نقـره در (جدول ۱) خلاصه شده است. بایستی به این نکتـه توجّـه داشت که غلظت نانونقرهٔ مورد اسـتفاده در بسـته‌بنـدی‌هـای فعـال کمتـر از حـدی اسـت کـه مهـاجرت آن بـه سـلامتی مصرف‌کننده آسیبی وارد کند. حد مجـاز مهـاجرت ترکیبـات نقره از بسته‌بندی به مادهٔ غذایی، ۰/۰۵ میلی‌گرم در کیلـوگرم مادهٔ غذایی تعیین شده است [۷]. همچنین سـازمان بهداشـت جهانی[3] (WHO) حداکثر غلظت مجاز نقره در آب آشامیدنی را ۰/۱ میلی‌گرم در لیتر تعیین کرده که غلظـت کمتـر از ایـن میزان خطری برای سلامتی مصرف‌کننده نخواهد داشـت [۷]. تـاکنون گزارشـی مبنـی بـر بیشـتر بـودن مهـاجرت نقـره از بسته‌بندی‌هـای فعـال ضـدمیکروبی بـه بـیش از ایـن مقـادیر بحرانی گزارش نشده است.

٤-۲- نانوذرّات دی اکسید تیتانیوم

نانوذرّات دی‌اکسید تیتـانیوم[4] یکـی از نـانوذرّات اکسـید فلزی با خاصیت ضدمیکروبی قابل‌توجّه می‌باشد. این نانوذرّه دارای خاصیت فوتوکاتالیستی[5] است. در واقع به خاطر همین ویژگی است که توانایی ایجاد فعالیـت ضـدمیکروبی را دارد. تحت تأثیر تـابش اشـعه فـرابنفش، نـانوذرّات TiO_2 قـدرت اکسیدکنندگی بسیار قوی پیدا می‌کنند که باعـث مـی‌شـود ایـن نـانوذرّه بـر روی ترکیبـات آلـی موجـود در اسـکلت ساختمانی میکروارگانیسم‌هـا اثـر تخریـب‌کننـدگی داشـته باشد. زمانی کـه نـانوذرهٔ TiO_2، تحـت تـابش فوتـونی بـا انـرژی مسـاوی و یـا بـالاتر از انـرژی پیونـدی آن (۳/۲ الکترون‌ولت) قرار گیـرد؛ الکتـرون‌هـا از لایـه ظرفیـت یـا پیوندی به لایه هدایت برانگیخته می‌شوند. در نتیجه، جفت الکترون- حفره که محرک واکنش‌هـای اکسـایش-کـاهش است، تولید می‌شود. به عبارتی، الکترون از لایه پیوندی به لایه هـدایت منتقـل و جفـت‌هـای الکتـرون (e^-) و حفـره الکتریکی (h^+) در سطح فوتوکاتالیست تشکیل مـی‌شـوند. الکترون‌های دارای بار منفی به روی اکسیژن انتقال یافتـه و سوپراکسید[6] (O_2^-) ایجاد نمـوده و حفـره‌هـای الکتریکـی دارای بار مثبت به همراه مولکول‌هـای آب، رادیکـال‌هـای آزاد هیدروکسیل ($^{\bullet}OH$) تولیـد مـی‌کننـد. ایـن گونـه‌هـای واکنشی اکسیژن، سبب اکسیداسیون ترکیبات آلی و تبـدیل آن‌ها به دی‌اکسید کـربن (CO_2)، آب و اسـیدهای معـدنی می‌شود. حمله‌ی رادیکال‌های آزاد ایجاد شده به مـواد آلـی و تجزیه آن‌ها، ویژگی خود تمیزشوندگی[7] سـطوح حـاوی TiO_2 را به دنبال دارد. پیش‌بینی می‌شود که علاوه بر تولید بسته‌بندی‌های ضـدمیکروبی، در آینـده‌ای نزدیـک از ایـن نانوذره به‌منظور تمیز کردن و استریل کـردن دسـتگاه‌هـا و تجهیزات فرآوری مواد غذایی نیز استفاده گردد [۸]. شـکل (۳) تولیـد رادیکـال آزاد طـی فرآینـد فتوکاتالیسـتی نانوذرّاتTiO_2 و اثـر آن بـر غشـاء میکـروب‌هـا را نشـان می‌دهد. حملهٔ رادیکـال‌هـای آزاد ایجـاد شـده، مـی‌توانـد موجـب اکسیداسـیون فسـفولیپیدهای غیراشـباع در غشـاء میکروب‌ها شـود. درنتیجـه، پیامـدهای ناشـی از آن ماننـد افزایش نفوذپذیری، تـنفس و واکـنش‌هـای فسفریلاسـیون اکسیداتیو باعث مرگ سلول‌هامی‌گردد. بسته‌بندی‌های فعال حاوی نانوذرّات TiO_2 برای غیرفعال‌سازی دامنهٔ وسیعی از میکروارگانیسم‌ها شامل باکتری‌های گرم مثبت و گرم

1- Eukaryote
2- Peptidoglycan
3- World Health Organization
4- Titanium Dioxide
5- Photocatalytic Activity
6- Superoxide
7- Self Cleaning



شکل ۳- طرح شماتیک یک سلول باکتریایی بر روی سطح فیلم حاوی TiO_2 در برابر نور(a)، تصویر نانوذرّات تجمع یافته TiO_2 در سطح سلول باکتری اشریشیاکلی (b) و مکانیسم فعالیت فوتوکاتالیستی نانوذرّات دی‌اکسید تیتانیم (c) [۸]

منفی، کپک‌ها، مخمرها و ویروس‌ها مورد استفاده قرار گرفته‌اند که نتایج برخی از این مطالعات در (جدول ۱) خلاصه شده است [۸].

٤-۳- نانوذرّات اکسید روی

یکی دیگر از نانوذرّاتی که ویژگی ضدباکتریایی و ضدقارچی خوبی نشان می‌دهد، نانوذرّات اکسید روی[1] (ZnO) می‌باشد. در کشاورزی، ترکیبات روی بیشتر به‌عنوان ضدقارچ مورد استفاده قرار می‌گیرند. دُز کشندگی ۵۰ درصد ZnO (LD_{50}) برای موش‌ها با ورود از طریق سامانه گوارشی، ۲۴۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم گزارش شده است. مسلماً با کاهش اندازه و تولید نانوذرّات ZnO، این عدد کاهش می‌یابد؛ بنابراین با وجود مجاز شمرده شدن ورود ZnO به داخل مادهٔ غذایی، مصرف غلظت‌های بالاتر آن می‌تواند برای سلامتی انسان خطرناک باشد. اعتقاد بر این است که مانند سایر نانوذرّات ضدمیکروبی، با کاهش اندازهٔ نانوذرّات ZnO خاصیت ضدمیکروبی آن افزایش می‌یابد.

براینر[2] و همکاران (۲۰۰۶) بازدارندگی رشد میکروبی صددرصد را برای نانوذرّات ZnO در غلظت‌های ۱۰-۳ میلی مولار گزارش نموده‌اند [۹].

مهم‌ترین مکانیسم‌هایی که برای خاصیت ضدمیکروبی نانوذرّات ZnO پیشنهاد شده‌است عبارت‌اند از:

۱) تشکیل اکسیژن فعال و رادیکال‌های آزاد(ROS) در سطح نانوذرّات و آسیب به لیپیدهای غشای سلولی میکروارگانیسم‌ها به‌وسیلهٔ رادیکال‌های آزاد تشکیل شده که در نتیجهٔ آن تجزیهٔ غشای سلولی میکروارگانیسم و نشت محتویات داخل سلول اتّفاق می‌افتد.

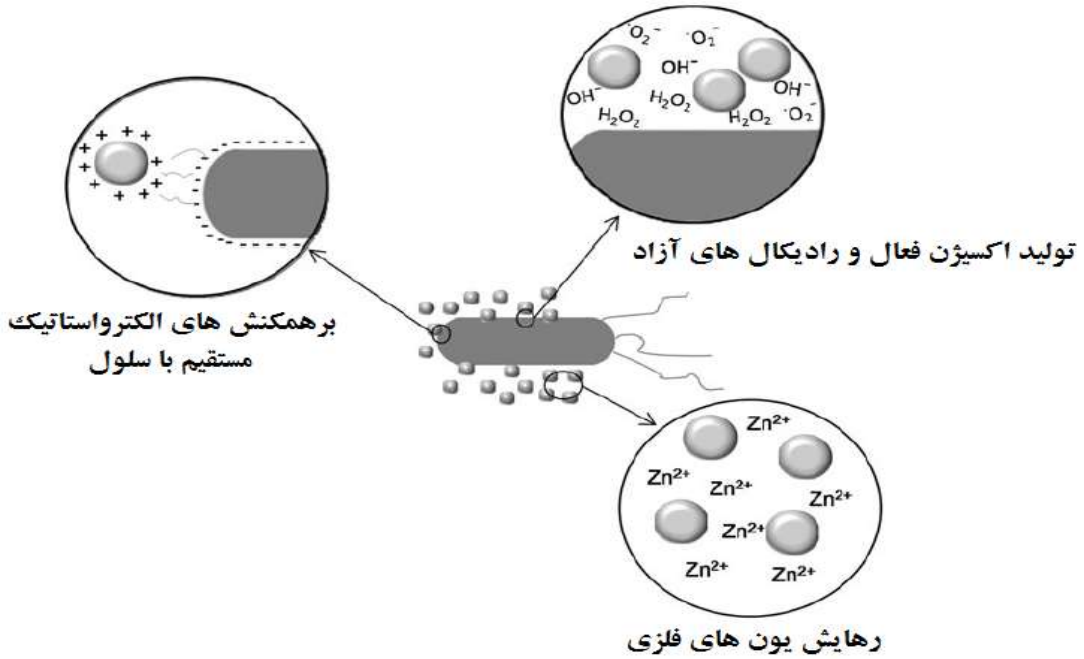
۲) آزادسازی یون‌های فلزی از سطح نانوذرّات که با اتصال به غشای سلولی باعث مرگ میکروارگانیسم می‌شوند.

۳) اثر ضدمیکروبی غیرمستقیم با تولید و آزادسازی H_2O_2 و نقش ضدباکتریایی این ترکیب.

۴) در مورد تأثیر ZnO بر روی باکتری اشرشیاکلی، تخریب سلولی از طریق ایجاد برهمکنش‌های الکترواستاتیک و نفوذ مستقیم نانوذرّات ZnO به داخل

1- Zinc Oxid

2- Brayner



شکل ٤- مکانیسم‌های تأثیر ضدمیکروبی نانوذرّات ZnO بر روی میکروارگانیسم‌ها [۹]

سلول نیز گزارش شده است [۹]. شکل(۴) مکانیسم‌های تأثیر ضدمیکروبی ZnO را به‌صورت شماتیک نشان می‌دهد.

جانس[1] و همکاران (۲۰۰۸) خاصیت ضدمیکروبی نانوذرّات ZnO را بر روی طیف وسیعی از میکروارگانیسم‌ها بررسی نموده و آن را با سایر نانوذرّات اکسید فلزی مانند MgO، TiO_2، Al_2O_3، CuO و CeO_2مورد مقایسه قرار دادند [۱۵]. نتایج این پژوهش نشان داد که خاصیت ضدمیکروبی نانوذرات ZnO بر روی باکتری *استافیلوکوکوس اورئوس* حدود پنج برابر بیشتر از سایر نانوذرّات می‌باشد که این امر نشان‌دهندهٔ قابلیت بالای این نانوذره در استفاده به‌عنوان ترکیب ضدمیکروبی در بسته‌بندی مواد غذایی است[۲۱]. همچنین مشاهده شد که ZnO بر روی طیف وسیعی از سایر باکتری‌های گرم مثبت و گرم منفی دیگر شامل *استافیلوکوکوس اپیدرمیس*[2]، *استرپتوکوککوس پیوجنز*[3]، *انتروکوکوس فکالیس*[4]، *باسیلوس سوبتیلیس* و *اشرشیاکلی* نیز اثر ضدباکتریایی قوی از خود نشان می‌دهد. تحقیقات در زمینه استفاده از نانوذرّات ZnO در تولید بسته‌بندی‌های ضدمیکروبی فراوان است که به برخی از آن‌ها در (جدول۱) اشاره شده است..

٤-٤- نانوذرّات اکسید مس (CuO)

مس از جمله ترکیبات ضدمیکروبی است که از صدها سال پیش مورد استفاده قرار گرفته است. یکی از نانوذرّات مهمی که از مس مشتق می‌شود، اکسید مس[5](CuO) است. برخلاف سایر نانوذرّات فلزی ازجمله نقره و TiO_2، فلز مس و ترکیبات آن از دستهٔ ترکیبات ایمن بوده و حضور آن‌ها در مقادیر مجاز برای سلامتی خطرناک نیست. به‌عنوان مثال سازمان بهداشت جهانی میزان دو میلی گرم در لیتر و سایر ارگان‌ها نظیر کمیسیون اروپا میزان سه میلی‌گرم در لیتر را به‌عنوان حد مجاز و قابل قبول مس در آب آشامیدنی اعلام نموده‌اند. نانوذرّات CuO دارای خاصیت ضدمیکروبی قابل توجّهی بوده و همچنین از ویژگی فتوکاتالیستی نیز برخوردار هستند. اثر ضدمیکروبی نانوذرّات CuO بر روی طیف وسیعی از میکروارگانیسم‌ها

1- Jones
2- *Staphylococcus Epidermidis*
3- *Streptococcus Pyogenes*
4- *Enterococcus Faecalis*
5- Copper Oxide

از جمله باکتری‌های گرم مثبت و گرم منفی به اثبات رسیده است. اندازهٔ نانوذرّات و ریزساختار آن‌ها از جمله عوامل تأثیرگذار روی خاصیت ضدمیکروبی این نانوذرّات محسوب می‌شوند. با کاهش اندازهٔ نانوذرّات، به دلیل افزایش سطح آزاد، خاصیت ضدمیکروبی بیشتر می‌شود. همچنین نانوذرّات کروی CuO نسبت به نانوذرّات مکعبی، صفحه‌ای یا دارای شکل نامنظم، خاصیت میکروب‌کشی بیشتری از خود نشان می‌دهند [۲۲].

هرچند که در مورد اثر ضدمیکروبی نانوذرّات CuO مطالعات گسترده‌ای صورت گرفته است، با این وجود، مکانیسم خاصیت ضدمیکروبی آن هنوز به طور دقیق مشخص نیست. چندین مکانیسم مختلف برای تفسیر خاصیت ضدمیکروبی نانوذرّات CuO پیشنهاد شده‌اند که عبارتند از:

۱) اتصال نانوذرّات CuO به غشای سلولی و برهمکنش با لایهٔ لیپیدی سطح غشا که باعث تغییر در نفوذپذیری غشاء و ممانعت از جذب ترکیبات مغذّی و دفع مواد زاید شده و به مرگ میکروارگانیسم می‌انجامد [۲۲].

۲) آزاد کردن یون‌های مس و تشکیل کمپلکس مس-پپتید در سطح غشا و در نتیجه به هم ریختن انسجام و نظم غشای سلولی [۲۹].

۳) کاتالیز تشکیل گونه‌های اکسیژنی فعال (ROS) و افزایش قابل توجّه تولید و نفوذ آن‌ها به داخل سلول که در نهایت به مرگ سلول منجر می‌شوند.

چنین به نظر می‌رسد که مکانیسم آخر، نقش مهم‌تری در فعالیت ضدمیکروبی نانوذرّات CuO دارد و بیشتر مورد پذیرش قرار گرفته است. رن[1] و همکاران (۲۰۰۹) نانوذرّات CuO سنتز کردند و خاصیت ضدمیکروبی آن را با نانوذرّات نقره، ZnO، Cu_2O و Cu بر روی میکروارگانیسم‌های مختلف مقایسه نمودند. آن‌ها برای CuO حداقل غلظت باکتری‌کشی[2] (MBC) برابر نانوذرّات نقره و مساوی ۱۰۰ µg/ml را گزارش کردند که کمتر از نانوذرّات Cu (۲۵۰ µg/ml)، نانوذرّات Cu2O (۲۵۰۰ µg/ml) و ZnO (۵۰۰۰ µg/ml) بود. کمتر بودن این عدد نشان از قدرت میکروب‌کشی بالای نانوذرّات CuO دارد. همچنین طبق گزارش این محققین، در بین نانوذرّات مورد آزمون، پس از نانوذرّات نقره، نانوذرّات CuO بیشترین اثر را روی باکتری ای کولای نشان دادند (MBC برابر با ۲۵۰ µg/ml)[۲۳] . در زمینهٔ تولید بسته‌بندی‌های فعال حاوی نانوذرّات CuO نیز مطالعاتی صورت گرفته است. یوسفی بوشهری[3] و همکاران (۲۰۱۵) نانوذرّات CuO را بر روی کاغذ، پارچه و شیشه سنتز کردند. آن‌ها از این بسترهای حاوی نانوذرّات جهت حذف آلودگی‌های میکروبی از آب استفاده نمودند. مشاهده شد که کاغذ حاوی نانوذرّات، نسبت به سایر بسترها خاصیت ضدمیکروبی بیشتری دارد و همچنین رهایش نانوذرّات از بستر به داخل آب، در اثر استفاده مکرّر از نانوهیبریدها، در مورد کاغذ کمتر از پارچه و شیشه می‌باشد. الماسی[4] و همکاران (۲۰۱۸) نانوذرّات CuO را بر روی نانوالیاف سلولز و نانوالیاف کیتوزان تثبیت کردند و بررسی خواص آن‌ها نشان داد که کیتوزان در تثبیت نانوذرّات CuO بهتر از سلولز عمل کرده و هم رهایش نانوذرّات را به خوبی کنترل می‌کند و هم اثر ضدمیکروبی قوی‌تری در برابر *اشرشیاکلی* و *استافیلوکوکوس اورئوس* از خود نشان می‌دهد[۲۴و۲۵].

۵- نانوذرّات کیتین و کیتوزان به عنوان ترکیبات ضدمیکروبی

در بین ترکیبات آلی و طبیعی نیز کیتین و کیتوزان اثرات ضدمیکروبی قابل توجّهی از خود نشان می‌دهند. در بین انواع مختلف پلی‌ساکاریدها، کیتوزان پرکاربردترین آن‌ها برای ایجاد خواص ضدمیکروبی است. این پلی‌ساکارید زیست‌تخریب‌پذیر، زیست سازگار و غیرسمّی است که در مقابل طیف وسیعی از باکتری‌ها، قارچ‌ها و

1- Ren
2- Minimum Bactericidal Concentration
3- Yoosefi Booshehri
4- Almasi

ویروس‌ها خصوصیات ضدمیکروبی از خود نشان می‌دهد. فرمول شیمیایی کیتین$(NO_5H_{13}C_8)_n$ بوده و از به‌هم پیوستن ۶۰۰ تا ۱۸۰۰ مونومر تشکیل می‌شود. کیتین یک کوپلیمر است که از دو نوع مونومر تشکیل یافته است. مونومر اصلی شامل ۲- استامید و-۲- داکسیD –گلوکوپیرانوز[1] و مونومر فرعی (کم مقدار) شامل ۲-آمینو-۲- داکسی D – گلوکوپیرانوز است که این مونومرها با اتصالات بتا (۱←٤) به هم متصل شده‌اند. از هیدرولیز کیتین در محلول اسید کلریدریک گرم و غلیظ، گلوکزآمین (با نام علمی ۲- داکسی-۲-آمینو گلوکز) و اسید استیک حاصل می‌شود. با حذف گروه استیل کیتین در محلول قلیایی گرم و غلیظ، کیتوزان حاصل می‌شود [۲٦].

عوامل متعدّدی بر میزان خصوصیات ضدمیکروبی کیتوزان تأثیرگذار هستند. نوع میکروارگانیسم، وزن مولکولی، درجه داستیله شدن و ساختار شیمیایی از جمله این عوامل می‌باشند. تحقیقات نشان داده‌اند که تأثیر ضدمیکروبی کیتوزان با وزن مولکولی کمتر از ۱۰ کیلو دالتون بسیار قوی‌تر می‌باشد. با افزایش وزن مولکولی از میزان خصوصیات ضدمیکروبی آن کاسته می‌شود. دلیل این رفتار، حلالیت بیشتر کیتوزان با وزن مولکولی پایین در محیط‌های آبی و واکنش‌پذیری بهتر آن با گروه‌های فعال میکروارگانیسم‌ها است. با این‌وجود، در درجه پلیمریزاسیون کمتر از هفت واحد گلوکزآمین، خاصیت ضدباکتریایی و ضدقارچی در کیتوزان مشاهده نمی‌شود. یکی دیگر از عوامل تأثیرگذار بر روی میزان خصوصیات ضدمیکروبی، درجه داستیلاسیون[2] کیتوزان است. با افزایش میزان داستیلاسیون، بر مقدار بار مثبت سطح مولکولی کیتوزان افزوده می‌شود. با افزایش بار مثبت در سطح مولکول، تعداد و شدّت برهمکنش‌های به وجود آمده بین کیتوزان و غشای میکروبی (با بار منفی) افزایش می‌یابد. عامل مؤثر دیگر در خاصیت ضدمیکروبی کیتوزان، pH محیط است. با کاهش pH به کمتر از ۵/۵ فعالیت ضدمیکروبی آن به‌شدّت افزایش می‌یابد؛ زیرا در این شرایط، هم حلالیت و هم بار سطحی مولکول کیتوزان افزایش می‌یابد [۲۶]. از نظر قدرت مهار رشد میکروبی، کیتوزان به ترتیب بر روی قارچ‌ها، مخمرها و باکتری‌ها بیشترین اثر را دارد.

به‌طورکلی به دلیل دارا بودن بار مثبت روی کربن شماره دو ساختمان گلوکز آمین، کیتوزان خاصیت ضدمیکروبی بیشتری نسبت به کیتین دارد. وجود بار مثبت و قابلیت اتصال به سطح باکتری‌ها دلیل اصلی بروز خاصیت ضدمیکروبی دانسته شده است. بااین‌وجود، مکانیسم اصلی اثر ضدمیکروبی کیتین و کیتوزان هنوز مشخص نیست. مکانیسم‌های عمده که برای خاصیت ضدمیکروبی کیتوزان بیان شده‌اند عبارت‌اند از:

۱) برهمکنش بین گروه‌های با بار مثبت آمین کیتوزان و بار منفی غشاء سلول میکروبی و تغییر در نفوذپذیری غشاء که منجر به نشت ترکیبات داخل سلولی می‌شود.

۲) ایجاد یک لایه پلیمری غیرقابل نفوذ توسط کیتوزان بر روی سطح سلول و کاهش نفوذپذیری آن و در نتیجه محدود کردن ورود مواد مغذّی به سلول.

۳) مهار فعالیت آنزیم‌های مختلف میکروارگانیسم با مسدود کردن مراکز فعال آن‌ها.

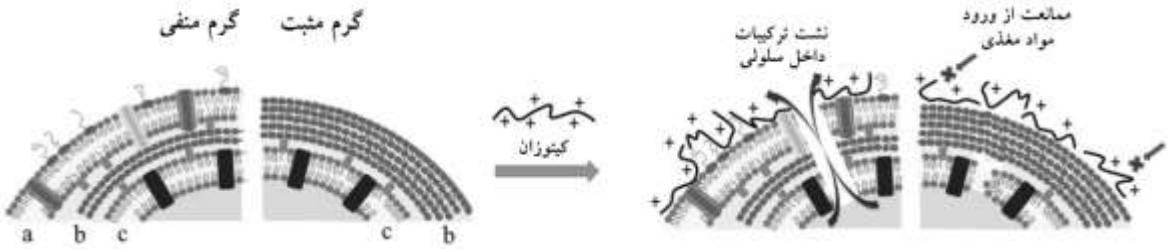
۴) عمل کیتوزان به‌عنوان یک عامل شلاته‌کننده و اتصال انتخابی به فلزات و سپس مهار تولید سموم و رشد میکروبی.

۵) نفوذ کیتوزان (به‌ویژه کیتوزان با وزن مولکولی پایین) به سیتوزول[3] میکروارگانیسم و اتصال با DNA و درنتیجه ممانعت از سنتز mRNA و پروتئین.

۶) کمک به جذب و تجمع مواد الکترونگاتیو[4] در داخل سلول، اخلال در فعالیت‌های فیزیولوژیکی میکروارگانیسم‌ها و در نهایت مرگ آن‌ها [۲۶].

1- Glucopyranose
2- Degree of Deacetylation
3- Cytosol
4- Electronegative

موارد اول و دوم، پذیرفته‌شده‌ترین پیشنهادها برای مکانیسم اثر ضدمیکروبی کیتوزان می‌باشند. این دو مکانیسم به ترتیب بر روی باکتری‌های گرم مثبت و گرم منفی مؤثر



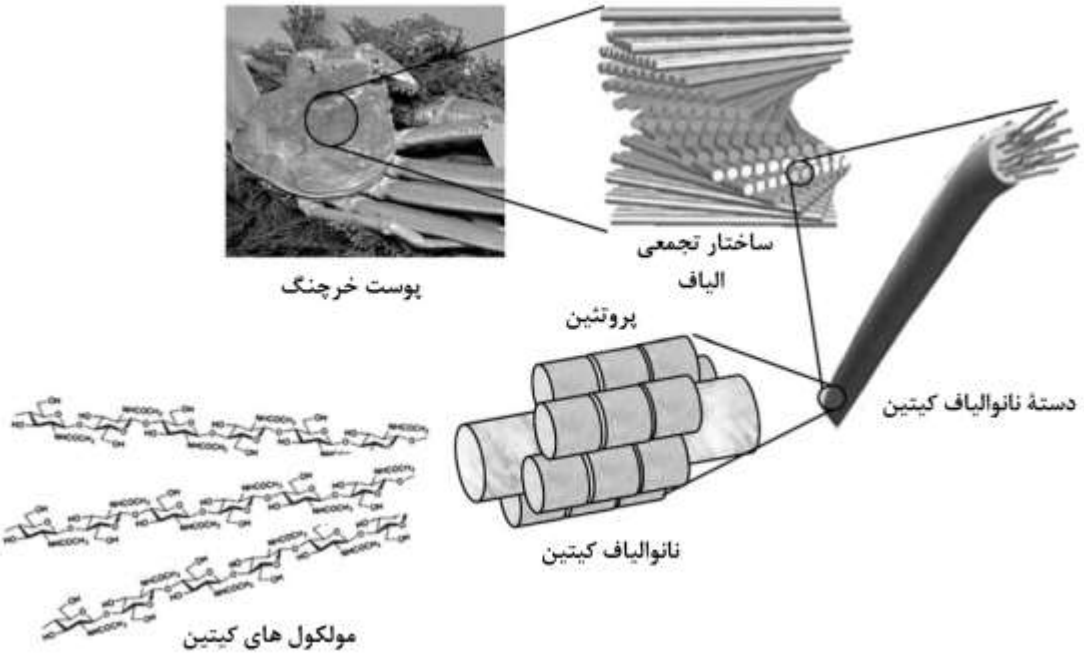
شکل ۵- مکانیسم اثر ضدمیکروبی کیتوزان بر روی باکتری‌های گرم مثبت و گرم منفی [۲۶]

هستند. در واقع، برای باکتری گرم مثبت مانند *استافیلوکوکوس اورئوس*، کیتوزان یک لایه پلیمری نفوذناپذیر روی سطح سلول ایجاد می‌کند که مانع ورود مواد مغذّی به داخل آن می‌شود؛ اما در باکتری گرم منفی مانند *اشرشیا کلی*، کیتوزان با وزن مولکولی پایین به داخل سلول نفوذ کرده و باعث نشت محتویات سلولی می‌شود. شکل(۵) مکانیسم تأثیر ضدمیکروبی کیتوزان بر روی باکتری‌های گرم مثبت و گرم منفی را نشان می‌دهد [۲۶]. به همین دلیل تأثیر وزن مولکولی کیتوزان بر روی باکتری‌های گرم مثبت و گرم منفی متفاوت است. با افزایش وزن مولکولی، فعالیت ضدمیکروبی کیتوزان بر روی باکتری‌های گرم مثبت افزایش یافته اما تأثیر آن بر روی باکتری‌های گرم منفی کمتر می‌شود.

همان طور که اشاره شد، زمانی که ابعاد یک ماده تا حد نانو کاهش پیدا می‌کند، نسبت سطح به حجم آن افزایش‌یافته و خواص عملکردی آن به‌طور قابل توجّهی تقویت می‌شود. در ذرّات کوچک‌تر تعداد مولکول‌هایی که روی سطح قرار می‌گیرند بیشتر است. درحالی‌که با افزایش اندازه، نسبت مولکول‌های سطحی به کل مولکول‌های آن ماده کاهش‌یافته و در نتیجه کارایی و تأثیر آن‌ها نیز کمتر می‌شود. به همین دلیل، از کیتین و کیتوزان نانوذرّات با ابعاد کوچک‌تر تولید می‌شود و بدین ترتیب خاصیت ضدمیکروبی در آن‌ها افزایش می‌یابد.

کیتین بیوپلیمر نیمه بلورین است. فیبرهای کیتین از رشته‌های باریک (میکروفیبریل) تشکیل شده‌اند و این رشته‌ها از طریق تعداد زیادی پیوند هیدروژنی، به‌طور محکم به هم متصل شده‌اند. به‌طورمعمول این فیبرها در بستر پروتئینی قرارگرفته‌اند و بر اساس منشأ بیولوژیکی، قطر آن‌ها متغیر است. میکروفیبرها شامل نانوفیبرهایی با قطر ۲۰-۱۰ نانومتر هستند. در طی فرایند تولید نانوذرّات کیتین، با استفاده از تیمارهای شیمیایی، آنزیمی و مکانیکی مختلف، پوشش پروتئینی و مواد معدنی حذف شده و رشته‌های نانوفیبر از یکدیگر و از بستر پروتئینی جدا می‌شوند و به آن‌ها نانوالیاف کیتین اطلاق می‌شود که طولی در حدود چند میکرون دارند. گاهی اوقات با استفاده از اسیدهای قوی، نواحی آمورف[1] این نانوفیبرها هیدرولیز[2] می‌شود و قسمت‌های بلورین از یکدیگر جدا می‌شوند که در این حالت به آن‌ها نانوکریستال یا نانوویسکر کیتین گفته می‌شود. هر نانوکریستال از حدود ۲۰ زنجیر خطی N- استیل گلوکز آمین تشکیل شده است که قطری در حدود ۳۰ نانومتر و طولی بین ۱۵۰-۱۰۰ نانومتر دارد. شکل(۶) طرح شماتیکی از ساختار اسکلت پوسته خرچنگ و هم‌چنین نانوالیاف کیتین را نشان می‌دهد [۳۷]. نانوذرّات کیتوزان نیز با همین مکانیسم و از تودهٔ کیتوزان حاصل می‌شوند.

1- Amorphous
2- Hydrolysis



شکل ٦- طرح شماتیک اسکلت ساختاری پوست خرچنگ و نانوالیاف کیتین [۲۷]

مطالعات مختلفی در زمینه اثربخشی نانوذرّات کیتوزان در تولید بسته‌بندی‌های فعال ضدمیکروبی وجود دارد. به‌عنوان‌مثال آنتونیو[1] و همکاران (۲۰۱۵) فیلم زیست‌تخریب‌پذیری از صمغ تارا تولید کردند و به آن کیتوزان توده‌ای و نانوذرّات کیتوزان در غلظت‌های ۵ تا ۱۵ درصد اضافه نمودند [۲۸]. مقایسه بین خاصیت ضدمیکروبی فیلم‌ها بر روی اس.اورئوس و ای کولای نشان داد که در یک غلظت مساوی، زمانی که از نانوذرّات کیتوزان استفاده می‌شود، خاصیت ضدمیکروبی به‌طور قابل توجّهی بیشتر از حالتی است که کیتوزان معمولی مورد استفاده قرار می‌گیرد؛ زیرا همان‌طور که پیش از این اشاره شد، با کاهش وزن مولکولی، خاصیت ضدمیکروبی کیتوزان تقویت می‌شود. از نانوذرّات کیتین در تولید فیلم ژلاتین [۲۹] و کیتوزان [۳۰] و همچنین از نانوذرّات کیتوزان در تولید فیلم پکتین [۳۱] و ژلاتین[۳۲] نیز استفاده شده است.

٦- نتیجه گیری

بسته‌بندی فعال یکی از انواع بسته‌بندی‌های نوین است که قدمت آن محدود به چند دههٔ اخیر می‌باشد. در بین انواع مختلف بسته‌بندی‌های فعال، بسته‌بندی‌های ضدمیکروبی گسترده‌ترین و متنوع‌ترین آن‌ها هستند. بسته‌بندی‌های ضدمیکروبی قادرند از رشد انواع میکروارگانیسم‌های بیماری‌زا و عامل فساد در مواد غذایی جلوگیری نموده و ماندگاری و ایمنی آن‌ها را افزایش دهند. نانوذرّات دارای خاصیت ضدمیکروبی به دلیل تأثیر بر روی طیف وسیع میکروارگانیسم‌ها، ثبات ویژگی‌ها و سهولت کاربرد آن‌ها استفاده زیادی در بین بسته‌بندی‌های فعال مواد غذایی دارند. با این وجود، به دلیل تماس مستقیم این نانوذرّات با ماده غذایی و امکان مهاجرت آن‌ها به داخل محصول، لازم است ایمنی آن‌ها بیش از پیش مورد مطالعه قرار گیرد تا از عدم تأثیر منفی آن‌ها بر روی سلامتی مصرف‌کننده اطمینان حاصل شود. لزوم بررسی مجاز بودن کامل جهت استفاده در تماس با مواد غذایی و

1- Antoniou

همچنین مطالعهٔ میزان رهایش نانوذرّات به داخل ماده غذایی بسته‌بندی شده از جمله مهم‌ترین چالش‌هایی است که لازم است در طراحی بسته‌بندی فعال ضدمیکروبی حاوی نانوذرّات فلزی حتماً مورد توجّه قرار گیرد.

۷- منابع

۱. قنبرزاده، ب.، الماسی، ه.، و زاهدی، ی.، (۱۳۸۸). **«بیوپلیمرهای زیست تخریب‌پذیر و خوراکی در بسته‌بندی مواد غذایی و دارویی»**. انتشارات دانشگاه امیرکبیر. چاپ اول.

۲. قنبرزاده، ب.، و الماسی، ه.، (۱۳۹۰). **«فیلم‌های خوراکی فعال در بسته‌بندی مواد غذایی»**. فصلنامه علوم و صنایع غذایی ایران، ۳۱ (۸)، ۱۲۳-۱۳۵.

3. Gómez-Estaca, J., López-de-Dicastillo, C., Hernández-Muñoz, P., Catalá, R., & Gavara, R. (2014). **"Advances in antioxidant active food packaging."** Trends in Food Science & Technology, 35(1), 42-51.

4.Dizaj, S. M., Lotfipour, F., Barzegar-Jalali, M., Zarrintan, M. H., & Adibkia, K. (2014). **"Antimicrobial activity of the metals and metal oxide nanoparticles."** Materials Science and Engineering: C, 44, 278-284.

5.Damm, C., Münstedt, H., & Rösch, A. (2008). **"The antimicrobial efficacy of polyamide 6/silver-nano-and microcomposites."** Materials Chemistry and Physics, 108(1), 61-66.

6.McShan ،D., Ray, P. C., & Yu, H. (2014). **"Molecular toxicity mechanism of nanosilver."** Journal of food and drug analysis, 22(1), 116-127

7.EFSA. (2005). **"Opinion of the Scientific Panel on food additives, flavourings, process-ing aids and materials in contact with food (AFC) on a request from the Commis-sion related to a 7th list of substances for food contact materials."** Food and Beverage Packaging Technology, 201.

8.Ghanbarzadeh, B., Oleyaei, S. A., & Almasi, H. (2015). **"Nanostructured materials utilized in biopolymer-based plastics for food packaging applications."** Critical reviews in food science and nutrition, 55(12), 1699-1723.

9.Brayner, R., Ferrari-Llion, R., Djediat, S., Fievet, F., (2006). **"Toxicological impact studies based on Escherichia coli bacteria in ultrafine ZnO nanoparticles colloidal medium."** Nano Letters, 6, 866-870.

10.Jones, N., Ray, B., Ranjit, K. T., & Manna ،A. C. (2008). **"Antibacterial activity of ZnO nanoparticle suspensions on a broad spectrum of microorganisms."** FEMS microbiology letters, 279(1), 71-76.

11.Nassar, M. A., & Youssef, A. M. (2012). **"Mechanical and antibacterial propertiesof recycled carton paper coated by PS/Ag nanocomposites for packaging."** Carbohydrate Polymers, 89(1), 269-274.

12.DeMoura, M.R., Lorevice, M.V., Mattoso, L.H.C. &Zucolotto, V. (2011). **"Highly stable, edible cellulose films incorporating chitosan and silver nanoparticles."** Journal of Food Science, 76, N25-N29.

13.Mohammed Fayaz, A., Balaji, K., Girilal, M., Kalaichelvan, P., & Venkatesan, R. (2009). **"Mycobased synthesis of silver nanoparticles and their incorporation into sodium alginate films for vegetable and fruit preservation."** Journal of agricultural and food chemistry, 57(14), 6246-6252.

14.Lloret, E., Picouet, P., & Fernández, A. (2012). **"Matrix effects on the antimicrobial capacity of silver based nanocomposite absorbing materials."** LWT-Food Science and Technology, 49(2), 333-338.

15.Zhou, L., Lv, S., He, G., He, Q., & Shi, B. (2011). **"Effect of pe/ag2o nano-packaging on the quality of apple slices."** Journal of Food Quality, 34(3), 171-176.

16.Gumiero, M., Peressini, D., Pizzariello, A., Sensidoni, A., Iacumin, L., Comi, G., & Toniolo, R. (2013). **"Effect of TiO 2 photocatalytic activity in a HDPE-based food packaging on the structural and microbiologicalstability of a short-ripened cheese."** Food chemistry, 138(2), 1633-1640.

17.Bodaghi, H., Mostofi, Y., Oromiehie, A., Zamani, Z., Ghanbarzadeh, B., Costa, C., Conte, A., & Del Nobile, M. A. (2013). **"Evaluation of the photocatalytic antimicrobial effects of a TiO ۲ nanocomposite food packaging film by in vitro and in vivo tests."** LWT-Food Science and Technology, 50(2), 702-706.

18.Oleyaei, S. A., Almasi, H., Ghanbarzadeh, B., &Moayedi, A. A. (2016). **"Synergistic reinforcing effect of TiO 2 and montmorillonite on potato starch nanocomposite films: Thermal, mechanical and barrier properties."** Carbohydrate Polymers, 152, 253-262.

19.Li, L.-H., Deng, J.-C., Deng, H.-R., Liu, Z.-L., & Li, X.-L. (2010). **"Preparation, characterization and antimicrobial activities of chitosan/Ag/ZnO blend films."** Chemical Engineering Journal, 160(1), 378-382.

20.Emamifar, A., Kadivar, M., Shahedi, M., & Soleimanian-Zad, S. (2010). **"Evaluation of nanocomposite packaging containing Ag and ZnO on shelf life of fresh orange juice."** Innovative Food Science & Emerging Technologies, 11(4), 742-748.

21.Jebel, F. S., & Almasi, H. (2016). **"Morphological, physical, antimicrobial and release properties of ZnO nanoparticles-loaded bacterial cellulose films."** Carbohydrate Polymers, 149, 8-19.

22.Bogdanović, U., Lazić, V., Vodnik, V., Budimir, M., Marković, Z. &Dimitrijević, S. (2014). **"Copper nanoparticles with high antimicrobial activity."** Materials Letters, 128, 75-78.

23.Ren, G., Hu, D., Cheng, E.V.C., Vargas-Reus, M.A., Reip, P. &Allaker, R.P. (2009). **"Characterization of copper oxide nanoparticles for antimicrobial applications."** International Journal of Antimicrobial Agents, 33, 587-590.

24.Yoosefi Booshehri, A., Wang, R., & Xu, R. (2015). **"Simple method of deposition of CuO nanoparticles on a cellulose paper and its antibacterial activity."** Chemical Engineering Journal, 262, 999-1008.

25.Almasi, H., Jafarzadeh, P., & Mehryar, L., (2018). **"Fabrication of novel nanohybrids by impregnation of CuO nanoparticles into bacterial cellulose and chitosan nanofibers: Characterization, antimicrobial and release properties."** Carbohydrate Polymers, 186, 273–281.

26.Ghanbarzadeh, B., and Almasi, H., (2013). **"Boidegradable polymers, In: Biodegradation-life of science, Rolando Chamy & Francisca Rosenkranz (Editors),"** InTech Publications, Croatia, pp: 141-186.

27.Ifuku, S., & Saimoto, H. (2012). **"Chitin nanofibers: preparations, modifications, and applications."** Nanoscale, 4(11), 3308-3318.

28.Antoniou, J., Liu, F., Majeed, H., & Zhong, F. (2015). **"Characterization of tara gum edible filmsincorporated with bulk chitosan and chitosan nanoparticles: A comparative study."** Food Hydrocolloids, 44, 309-319.

29.Sahraee, S., Milani, J. M., Ghanbarzadeh ،B., & Hamishehkar, H. (2017). **"Physicochemical and antifungal properties of bio-nanocomposite film based on gelatin-chitin nanoparticles."** International journal of biological macromolecules, 97, 373-381.

30.Jafari, H., Pirouzifard, M., Khaledabad, M. A., & Almasi, H. (2016). **"Effect of chitin nanofiber on the morphological and physical properties of chitosan/silver nanoparticle bionanocomposite films."** International journal of biological macromolecules, 92, 461-466.

31.Lorevice, M. V., Otoni, C. G., de Moura, M ،R., & Mattoso, L. H. C. (2016). **"Chitosan nanoparticles on the improvement of thermal, barrier, and mechanical properties of high-and low-methyl pectin films."** Food Hydrocolloids, 52, 732-740.

32.Hosseini, S. F., Rezaei, M., Zandi, M., & Farahmandghavi, F. (2015). **"Fabrication of bio-nanocomposite films based on fish gelatin reinforced with chitosan nanoparticles."** Food Hydrocolloids, 44, 172-182.

آدرس نویسنده

ارومیه- کیلومتر ۱۱ جاده نازلو- دانشگاه ارومیه- دانشکده کشاورزی- گروه علوم و صنایع غذایی- دکتر هادی الماسی- کدپستی ۵۷۵۶۱-۵۱۸۱۸، کد ۰۲۲۹