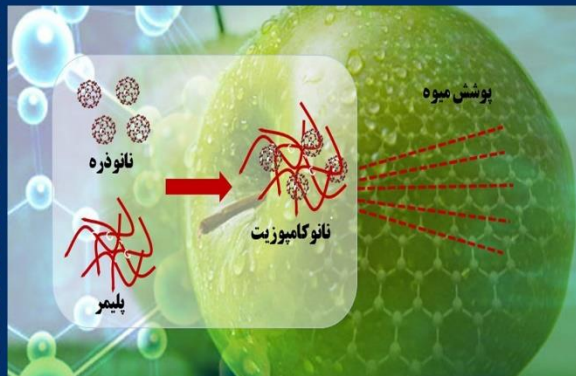


دستنامه فنی:

کاربرد فناوری نانو در بسته‌بندی محصولات کشاورزی

ندا مفتون آزاد و فوزان بدیعی



بسم الله الرحمن الرحيم
مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی

دستنامه فنی
کاربرد فناوری نانو در بسته‌بندی
محصولات کشاورزی

تهیه و تدوین
ندا مفتون آزاد و فوزان بدیعی

اعضای هیئت علمی به ترتیب مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و
منابع طبیعی استان فارس و مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی
کشاورزی

سال انتشار

۱۴۰۳



وزارت جهاد کشاورزی
سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی
مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی



نوع نوشتار: دستنامه فنی

عنوان نوشتار: کاربرد فناوری نانو در بسته‌بندی محصولات
کشاورزی

نگارندگان: ندا مفتون آزاد، فوژان بدیعی

ویراستار ادبی: محمدرضا داهی

صفحه آرا: شبنم جباری

طراح جلد: سمیه وطن دوست

ناشر: مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی

شمارگان: محدود

نوبت چاپ: اول

سال انتشار: ۱۴۰۳



مسئولیت صحت مطالب با نگارندگان است.

شماره ثبت ۶۵۹۵۳ در مرکز فناوری اطلاعات و اطلاع رسانی کشاورزی
سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی به تاریخ ۱۴۰۳/۰۶/۱۹

مخاطبان دستنامه

- کارشناسان و مروجان پهنه‌های تولید
- تولیدکنندگان مواد بسته‌بندی
- واحدهای بسته‌بندی و صادرکنندگان محصولات کشاورزی

هدف‌های آموزشی

شما خوانندگان گرامی در این دستنامه با:

- کاربردهای فناوری نانو در بسته‌بندی محصولات کشاورزی و نقش فناوری نانو در ارتقاء ویژگی‌ها و عملکرد بسته‌بندی

آشنا می‌شوید.

فهرست مطالب

عنوان	شماره صفحه
فصل اول اهمیت بسته بندی	۱
مقدمه	۱
چه انتظاری از بسته بندی مناسب داریم؟	۲
مواد مورد استفاده در بسته بندی	۳
فصل دوم فناوری نانو	۷
مقدمه	۷
خصوصیات نانومواد	۹
نانوذرات	۹
نانوکپسول ها	۱۱
نانوویسکر	۱۲
نانوصفحه	۱۳
نانولوله کربنی	۱۴
نانورس	۱۵
نانوامولسیون	۱۶
نانوالیاف	۱۷
نانو کریستال	۱۹
کاربرد فناوری نانو در بسته بندی	۱۸
تقویت فیلم های طبیعی و سنتزی با نانوذرات	۲۱
تقویت پلیمرهای زیست تخریب پذیر	۲۸
تقویت پلیمرهای سنتزی	۲۹
تقویت کننده های نانویی مبتنی بر سلولز	۳۰
فصل سوم بسته بندی فعال	۳۳
مقدمه	۳۳
بسته بندی های فعال حاوی نانوذرات معدنی	۳۶

فهرست مطالب

عنوان	شماره صفحه
بسته‌بندی‌های فعال حاوی نانوذرات نقره	۳۷
بسته‌بندی‌های فعال حاوی دیگر نانوذرات با خواص ضد میکروبی	۳۹
جاذب‌های اکسیژن حاوی نانوذرات	۴۴
بسته‌بندی‌های فعال – تثبیت آنزیم‌ها	۴۸
پوشش‌دهی محصولات باغی	۴۹
فصل چهارم بسته‌بندی هوشمند	۵۴
مقدمه	۵۴
نانوحسگرها	۵۷
حسگر اکسیژن	۶۱
حسگر دی‌اکسید کربن	۶۲
حسگرهای میکروبی	۶۴
حسگرهای تازگی	۶۵
حسگرهای دما-زمان	۶۷
فصل پنجم خطرهای بالقوه و سلامت	۶۹
مواد بسته‌بندی نانویی	۶۹
مقدمه	۶۹
برخی اثرهای نانوذرات موجود در بسته‌بندی مواد غذایی	۷۰
مکانیسم عمل نانوذرات در سیستم‌های زیستی	۷۱
عوامل موثر بر مهاجرت نانوذرات به داخل ماده غذایی	۷۴
فصل ششم جمع‌بندی و پیشنهادها	۷۶
منابع	۷۹

فصل اول

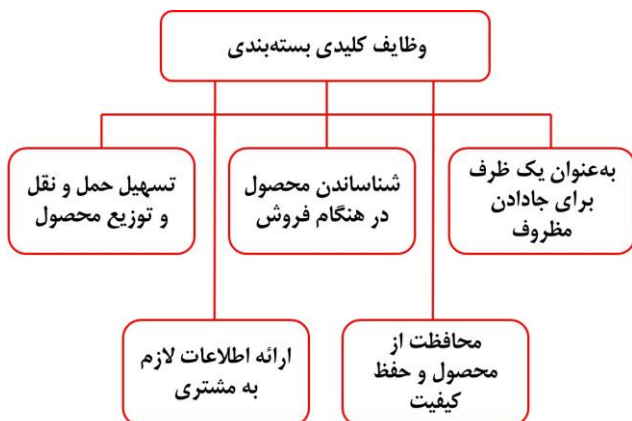
اهمیت بسته‌بندی

مقدمه

امروزه بسته‌بندی نقشی رو به رشد از مزرعه تا سفره مصرف‌کننده دارد. در سال‌های اخیر به دلیل افزایش تقاضا در زمینه‌های امنیت غذایی، افزایش ماندگاری، مسائل زیست محیطی و آسایش مصرف‌کننده، صنعت بسته‌بندی رشد فزاینده‌ای داشته است و با به کارگیری فناوری‌های نوین، کارایی بسته‌بندی به طور چشمگیری افزایش یافته است.

هنگامی که غذا بلافاصله پس از تولید مصرف نمی‌شود، باید در بسته‌بندهایی با ویژگی‌های خاص قرار گیرد. نوع بسته‌بندی باید پتانسیل محافظت از مواد غذایی را در برابر آلودگی، گرد و غبار، اکسیژن، نور، میکروارگانیسم‌های آلوده‌کننده، رطوبت و دیگر عوامل مخرب و زیان‌آور داشته باشد. علاوه بر این، بسته‌بندی باید ایمن، ارزان، سبک، قابل استفاده مجدد، در برابر فرآوری یا نگهداری مقاوم و نسبت به

عوامل فیزیکی مانند نور و رطوبت غیرحساس باشد. شکل ۱ کاربردهای کلیدی بسته‌بندی را نشان می‌دهد.



شکل ۱- کاربردهای کلیدی بسته‌بندی

چه انتظاری از بسته‌بندی مناسب داریم؟

بسته‌بندی مانعی است بین ماده غذایی و محیط اطراف که انتقال نور، حرارت، رطوبت، گازها و فعالیت میکروارگانیسم‌ها و حشرات را کنترل می‌کند. به عبارتی، بسته‌بندی مناسب باید عوامل کاهش‌دهنده ماندگاری فرآورده‌های غذایی را مهار کند. این عوامل عبارت‌اند از:

- ۱- فرآیندهای فیزیولوژیکی (تنفس میوه‌ها و سبزی‌ها، تجمع اتیلن)
- ۲- فرآیندهای شیمیایی (اکسیداسیون چربی‌ها)
- ۳- فرآیندهای فیزیکی (بیات شدن نان و خشک شدن)
- ۴- جنبه‌های میکروبی (فساد توسط میکروارگانیسم‌ها)

مواد مورد استفاده در بسته بندی

مواد متداول برای بسته بندی مواد غذایی فلز، سرامیک (شیشه) و کاغذ (مقوا) هستند. اگرچه استفاده از این مواد همچنان ادامه دارد، اما پلاستیک به دلیل وزن سبک، هزینه کم، سهولت فرآوری و شکل پذیری و همچنین تنوع زیاد در خواص فیزیکی مواد پلیمری، در بسیاری از موارد جای مواد بسته بندی رایج را در بسته بندی های مواد غذایی گرفته است (شکل ۲).



شکل ۲- انواع مختلف بسته بندی مواد غذایی

پلیمرهایی مانند پلی‌پروپیلن، پلی‌اتیلن (جرم حجمی کم)^۱ و جرم حجمی بالا^۲، پلی‌استایرن، پلی‌اتیلن ترفتالات (PET) و پلی‌وینیل کلرید معمولاً برای بسته‌بندی مواد غذایی استفاده می‌شوند. بر این اساس، پلیمرها انقلابی در صنعت بسته‌بندی مواد غذایی ایجاد کرده‌اند و مزایای بیشتری نسبت به مواد سنتی به ارمغان آورده‌اند، موادی که ذاتاً در برابر گازها و دیگر مولکول‌های کوچک نفوذپذیرند (شکل ۳).



شکل ۳- انواع مواد پلیمری مورد استفاده در بسته‌بندی مواد غذایی

1 Low Density Polyethylene (LDPE)

2 High Density Polyethylene (HDPE)

3 Polyethylene Terephthalate (PET)

مشکل عمده مرتبط با بسته‌بندی‌های مواد غذایی، نفوذپذیری آن‌هاست. در حال حاضر هیچ یک از مواد بسته‌بندی مقاومت کامل در برابر گازهای اتمسفر، بخار آب و ترکیبات فرار ندارد. برخی از پلیمرها در یک مورد خاص نسبت به دیگر پلیمرها برتری دارند. برای نمونه، پلی‌اتیلن ترفتالات (PET) سدی خوب در برابر اکسیژن ایجاد می‌کند، در حالی که پلی‌اتیلن با جرم حجمی بالا (HDPE) به‌طور موثر مواد غذایی را در برابر اکسیژن محافظت نمی‌کند. از طرف دیگر، پلی‌اتیلن با جرم حجمی بالا، نسبت به PET، مقاومت بهتری در برابر بخار آب از خود نشان می‌دهد. هیچ پلیمری به‌تنهایی تمام خواص حفاظتی و مکانیکی مورد نیاز را برای هرگونه استفاده احتمالی در بسته‌بندی مواد غذایی ندارد و بنابراین معمولاً ترکیبی از مواد پلیمری استفاده می‌شود. برای مثال، اتیلن وینیل الکل ماده‌ای است حساس به آب و می‌تواند بین لایه‌های پلیمرهای آب‌گریزی مانند پلی‌اتیلن قرار گیرد (پیدایی و همکاران، ۲۰۲۱).

فصل دوم

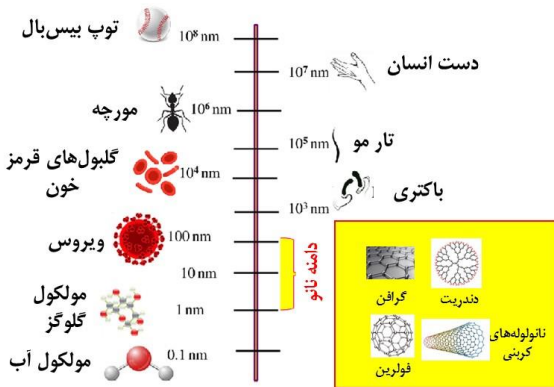
فناوری نانو

مقدمه

با توجه به علاقه زیاد به فناوری نانو در سطح جهان، پیش‌بینی می‌شود این حوزه تا سال ۲۰۲۵ حدود ۵ تریلیون دلار بر اقتصاد جهانی تأثیر بگذارد و نیاز به حدود ۶ میلیون متخصص در بخش‌های مختلف مرتبط را ایجاد کند.

فناوری نانو عمده‌تاً شامل ساخت، شناسایی و دستکاری مولکول‌هایی با ابعاد نانو (کمتر از ۱۰۰ نانومتر) است (شکل ۴). فناوری نانو در دهه گذشته رشد چشمگیری داشته است و بسیاری از شرکت‌ها در ساخت اشکال جدید مواد در مقیاس نانو با کاربردهایی نظیر درمان و تشخیص پزشکی، تولید انرژی، محاسبات مولکولی، و مواد ساختاری فعالیت داشته‌اند. اگرچه فناوری نانو فراگیر است و منابع مالی فراوانی را جذب می‌کند، ولی کاربرد آن در صنایع غذایی به آرامی در حال توسعه است و پیشرفت سریعی نداشته است. یکی از دلایل این امر، گرایش به محصولات غذایی "طبیعی" است که از

لحاظ تاریخی مانع استفاده از فناوری‌های نوظهور غذایی شده و فناوری نانو نیز از این قاعده مستثنی نیست.



شکل ۴- مقایسه اندازه مواد از نظر مقیاس طولی (یاداؤ و همکاران، ۲۰۲۱)

خصوصیات نانومواد

نانومواد به دلیل اندازه کوچک و نسبت سطح به حجم بالا، فعالیت سطحی بسیار بالایی دارند. نتایج وارشدن نانومواد در ساختار پلیمرها، بهبود استحکام مکانیکی، هدایت الکتریکی، پایداری حرارتی و غیره است. بنابراین، نانومواد

خواص مکانیکی و بازدارندگی بسته‌های غذایی را بهبود می‌بخشند و باعث ارتقای عملکرد سیستم‌های بسته‌بندی فعال و هوشمند می‌شوند.

نانومواد معمولاً به نانوذرات^۱، نانوکپسول‌ها^۲، نانووایسکر^۳، نانوصفحه^۴، نانولوله‌های کربنی (CNTs)^۵، نانورس (NCS)^۶، نانوامولسیون (NES)^۷، نانوالیاف^۸ و نانوکریستال^۹ طبقه‌بندی می‌شوند که کاربردهای متعددی در بسته‌بندی مواد غذایی دارند (شارما و همکاران، ۲۰۱۷).

نانوذرات

پیش‌تر گفته شد، نانوذرات به ذرات کوچکی اطلاق می‌شود که اندازه آن‌ها در هر سه بعد بین ۱ تا ۱۰۰ نانومتر است (شکل ۵). نانوذرات با چشم انسان قابل شناسایی نیستند و می‌توانند خواص فیزیکی و شیمیایی متفاوتی نسبت به انواع بزرگ‌تر ذرات از خود نشان دهند. انواع مختلفی از نانوذرات، بسته به مواد تشکیل‌دهنده و عملکرد آن‌ها، وجود دارد که در شکل ۶ مشاهده می‌شوند (مفتون آزاد و راماسوامی، ۲۰۱۸).

1 nanoparticles

2 nanocapsules

3 nanowiskers

4 nanosheets

5 Carbon nanotube

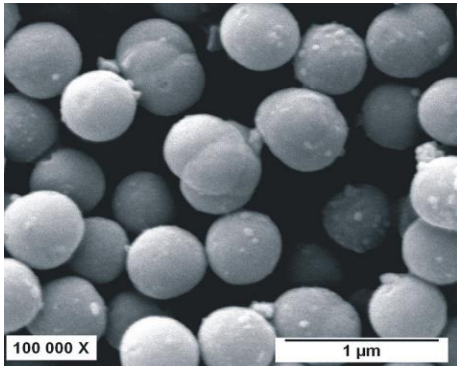
6 Nanoclays

7 Nanoemulsions

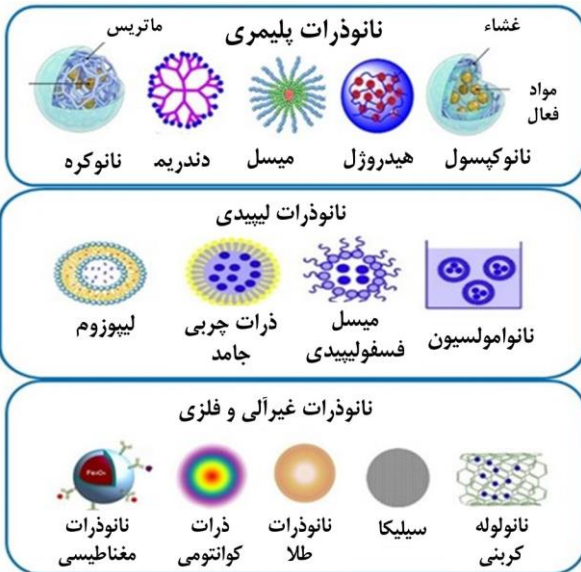
8 nanofibers

9 nanocrystals

1 Sharma



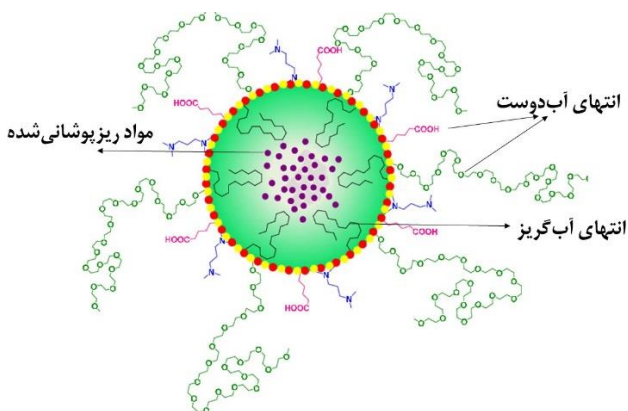
شکل ۵- تصویر میکروسکوپی ذرات نقره - سیلیکات
(بزرگنمایی ۱۰۰۰۰۰ برابر) (برگرفته از پانوار^۱ و همکاران،
۲۰۱۵)



شکل ۶- انواع نانوذرات

نانوکپسول‌ها

نانوکپسول‌ها کپسول‌هایی هستند که قطر نانومتری دارند و می‌توان مواد مورد نظر را درون آن‌ها قرار داد و ریزپوشانی کرد. نانوکپسول‌ها به‌وفور در طبیعت تولید می‌شوند؛ برای مثال، مولکول‌های موسوم به فسفولیپیدها^۱ که یک سر آنها آب‌گریز و سر دیگر آنها آب‌دوست است، از جمله نانوکپسول‌ها هستند که وقتی در محیط آبی قرار می‌گیرند، خود به خود کپسول‌هایی را تشکیل می‌دهند که قسمت‌های آب‌گریز مولکول در درون قرار می‌گیرد و از تماس با آب محافظت می‌شود. حالت برعکس نیز قابل تصور است (شکل ۷).

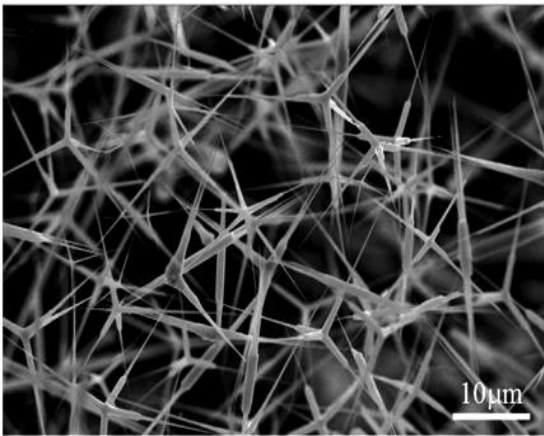


شکل ۷- نانوکپسول

1 Phospholipids

نانوویسکر

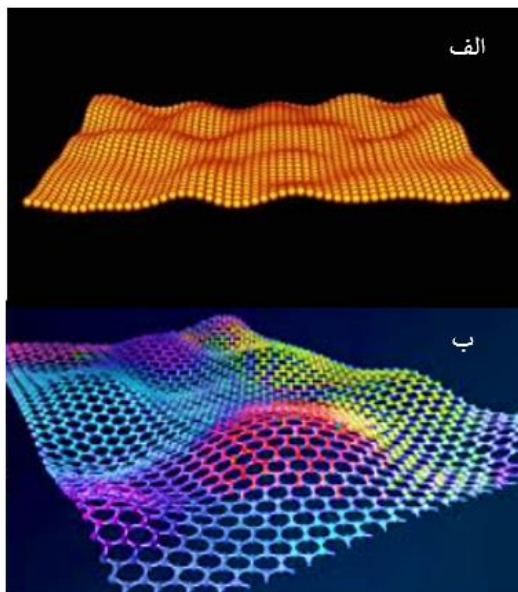
نانو ویسکرها نوعی نانوالیاف با ساختمان کریستالی و قطر کمتر از ۱۰۰ نانومتر هستند و نسبت طول و قطر آنها بیش از ۱۰۰ است (شکل ۸). نانو ویسکرها معمولاً از سلولز به دست می‌آیند (شارما و همکاران، ۲۰۱۷).



شکل ۸- نانوویسکرها

نانو صفحه

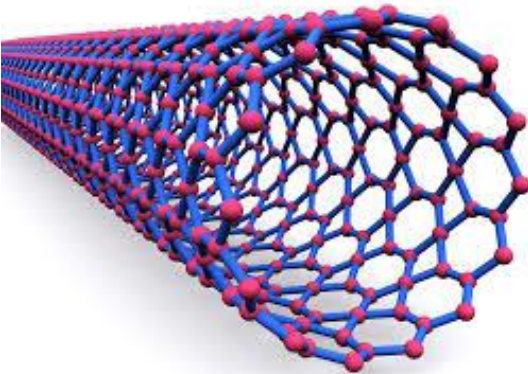
نانو صفحه نانوساختاری دو بعدی با ضخامتی بین ۱ تا ۱۰۰ نانومتر است. نمونه‌ای معمولی از نانوصفحات گرافن است که نازک‌ترین ماده دو بعدی (0.34 نانومتر) در جهان است و از یک لایه اتم کربن با شبکه‌های شش ضلعی تشکیل شده است (شکل ۹).



شکل ۹- الف) نانوصفحه، ب) گرافن

نانو لوله کربنی

نانولوله کربنی لوله‌ای از کربن است که قطر آن معمولاً بر حسب نانومتر اندازه‌گیری می‌شود. این مواد ساختار لوله‌ای دارند و از صفحات گرافن لوله‌شده تشکیل شده‌اند. این مواد علاوه بر نانوساختارهای منحصر به فرد، خواص قابل توجهی از خود نشان می‌دهند که برخی از این خواص مشابه گرافیت و برخی دیگر از ساختار تک‌بعدی آن‌ها ناشی می‌شود (شکل ۱۰) (شارما و همکاران، ۲۰۱۷).



شکل ۱۰- نانولوله کربنی

نانورس

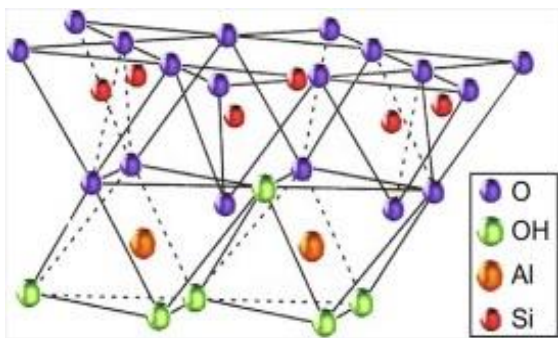
نانورس‌ها نانوذراتی از سیلیکات‌های معدنی لایه‌ای هستند. نانورس‌های اصلاح‌شدهٔ آلی که رس آلی شناخته می‌شوند، دسته‌ای از نانومواد آلی-معدنی ترکیبی هستند که می‌توانند در نانوکامپوزیت‌های پلیمری به‌عنوان اصلاح‌کننده‌های رئولوژیک، جاذب گاز و حامل‌های دارو استفاده شوند.

پرکننده‌های به‌فرم نانوصفحه می‌توانند خاک رس طبیعی یا مصنوعی و همچنین فسفات‌های فلزات واسطه باشند. نانوکامپوزیت‌های مبتنی بر خاک رس عملکرد فیزیکی را افزایش می‌دهند که پرکاربردترین آن‌ها فیلوسیلیکات‌ها^۱

¹ phyllosilicates

هستند. فیلوسیلیکات‌ها ساختار کریستالی پوسته‌ای شکل با ضخامت نانومتری دارند. رس‌ها به‌طور کلی بر اساس ساختار کریستالی و کمیت و موقعیت یون‌ها درون شبکهٔ اولیه طبقه‌بندی می‌شوند.

بسته به ترکیب شیمیایی و مورفولوژی نانوذرات، نانورس‌ها به چندین گروه مانند مونت‌موریلونیت^۱، بنتونیت^۲، کائولینیت^۳، هکتوریت^۴ و هالوئیزیت^۵ سازمان‌دهی می‌شوند (شکل ۱۱).



شکل ۱۱- نانوذرات رس

مونت‌موریلونیت یک کانی با بار منفی ساختاری دائمی است که برای تعادل به کاتیون‌های خارجی نیاز دارد.

1 Montmorillonite
2 Bentonite
3 Kaolinite

4 Hectorite
5 Halloysite

بنتونیت خاک رسی است که معمولاً از تجزیه خاکستر آتشفشانی یا گاهی از سنگ‌های آذرین یا رسوبی دیگر تشکیل می‌شود. بنتونیت یک خاک رس بسیار پلاستیک است که در پاسخ به حذف (یا اضافه شدن) آب به طور قابل توجهی منقبض (یا متورم) می‌شود.

کائولینیت کانی نرم، خاکی، و معمولاً سفید (رس فیلوسیلیکات دو وجهی) است که از هوازدهی شیمیایی کانی‌های سیلیکات آلومینیم مانند فلدسپات تولید می‌شود. ظرفیت انقباض - تورم کم و ظرفیت تبادل کاتیونی پایینی دارد.

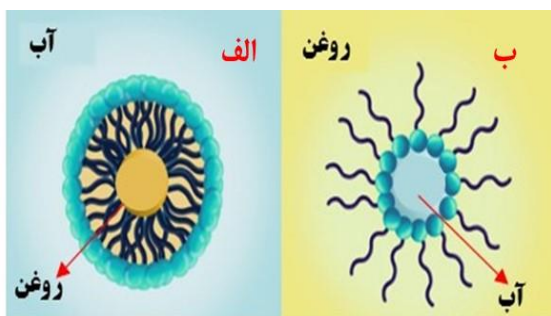
هکتوریت یک سیلیکات منیزیم-لیتیم لایه لایه طبیعی و با ساختمان سه وجهی است.

هالوزیت شکل طبیعی کائولینیت بسیار سفید است و مانند کائولینیت، هالوزیت یک آلومینوسیلیکات است. با این حال، ساختار بلوری لوله ای دارد که به طور قابل توجهی با ساختار بلوری صفحه‌ای کائولینیت متفاوت است (گوپتا و ری، ۲۰۲۰).

نانو امولسیون

نانو امولسیون‌ها ذرات پراکنده مایع در مایع با اندازه قطره‌های حدود ۱۰۰ نانومتر هستند. اندازه کوچک آن‌ها منجر به

ایجاد خواص مفیدی مانند مساحت سطح بالا در واحد حجم، پایداری قوی، ظاهر شفاف و ایجاد خواص رئولوژیک دلخواه می‌شود (شکل ۱۲). نانوامولسیون‌ها به دو دسته نانوامولسیون روغن در آب و نانوامولسیون آب در روغن دسته‌بندی می‌شوند.



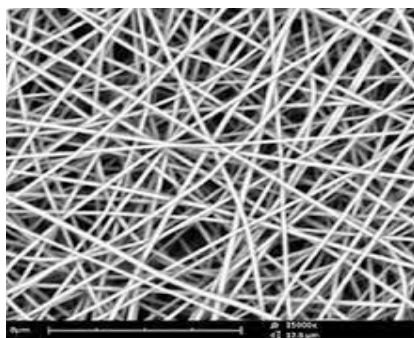
شکل ۱۲- نانوامولسیون؛ الف) روغن در آب، ب) آب در روغن

نانو الیاف

نانوالیاف طولی حدود ۱ میکرومتر و قطری بین ۱ تا ۱۰ نانومتر دارند، بدین ترتیب بسیار ناهمسان‌گرد^۱ هستند (بدیعی و همکاران، ۱۳۹۸). نانوالیاف از پلیمرهای مختلف طبیعی و مصنوعی تولید می‌شوند و از این رو خواص فیزیکی و پتانسیل‌های کاربردی متفاوتی دارند. نمونه‌هایی از پلیمرهای طبیعی عبارت‌اند از کلاژن، سلولز، فیبروئین ابریشم، کراتین،

1 Anisotropic

ژلاتین، پروتئین آب‌پنیر و پلی ساکاریدهایی مانند کیتوزان و آلژینات. نمونه‌هایی از پلیمرهای مصنوعی عبارت‌اند از پلی-لاکتیک اسید (PLA)، پلی‌کاپرولاکتون (PCL) و پلی-اورتان^۳ (PU). قطر نانوالیاف به نوع پلیمر مورد استفاده و روش تولید بستگی دارد. همه نانوالیاف پلیمری به دلیل نسبت سطح به حجم زیاد، تخلخل بالا، استحکام مکانیکی قابل توجه، و انعطاف‌پذیری‌شان عملکرد منحصر به فردی دارند (شکل ۱۳).



شکل ۱۳- نانوالیاف

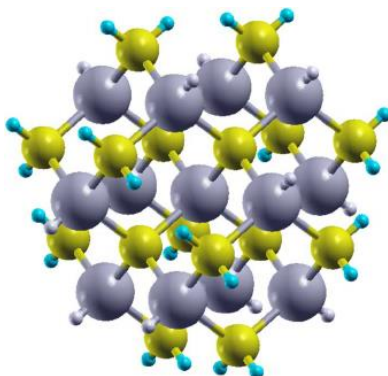
نانو کریستال

نانوکریستال ذره‌ای کریستالی با حداقل یک بعد کمتر از ۱۰۰ نانومتر است که متشکل از تعدادی اتم با آرایش تک

1 Polylactic Acid (PLA)
2 Polycaprolactone (PCL)

3 Polyurethane (PU)

یا چند بلوری است (شکل ۱۴) (مفتون آزاد و راماسوامی، ۲۰۱۸).



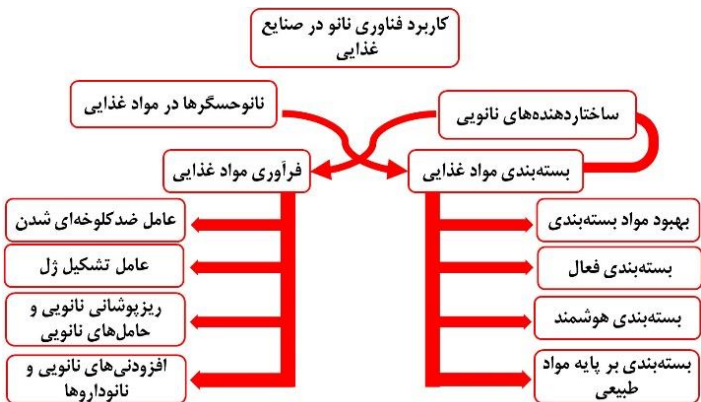
شکل ۱۴- نانوکریستال

نانوکریستال‌ها اغلب از موادی مانند فلزات، نیمه‌هادی‌ها و اکسیدها ساخته می‌شوند و خواص آن‌ها بسته به اندازه، شکل و ترکیب‌شان می‌تواند متفاوت باشد. دو نمونه از نانوکریستال‌های پرکاربرد نانوبلورهای طلا و نقاط کوانتومی هستند. نانوبلورهای طلا به دلیل خواص نوری منحصر به فردشان در تصویربرداری زیستی، تجزیه و صنعت الکترونیک استفاده می‌شوند. شکل نانوبلورهای طلا کروی و دارای ابعاد ۱-۴ نانومتر هستند. نقاط کوانتومی، نانوکریستال‌های نیمه‌هادی هستند که در اثر تحریک با پرتوهای فرابنفش از

خود نور ساطع می‌کنند و در نمایشگرها و تصویربرداری زیستی استفاده می‌شوند (جارویس^۱ و همکاران، ۲۰۱۹).

کاربردهای فناوری نانو در بسته‌بندی

شکل ۱۵ کاربردهای فناوری نانو در صنایع غذایی را نشان می‌دهد. فعال‌ترین حوزه در تحقیقات فناوری نانو در مواد غذایی، کاربرد آن در بسته‌بندی مواد غذایی است. استفاده از این فناوری می‌تواند همه کارکردهای اصلی بسته‌بندی، از جمله نگهداری، حفاظت، بازاریابی، توزیع و ارتباطات را بهبود بخشد.



شکل ۱۵- کاربردهای فناوری نانو در صنایع غذایی

کاربرد فناوری نانو در پلیمرها شامل طراحی، ساخت، فرآوری و استفاده از مواد پلیمری پر شده با ذرات نانو یا استفاده از دستگاه‌هایی با دامنه نانو است. بسیاری از شرکت‌های بزرگ بسته‌بندی مواد غذایی در جهان به‌طور فعال به دنبال استفاده از فناوری نانو برای ارتقای ویژگی‌های مواد پلیمری و دستیابی به مواد بسته‌بندی جدید با خواص مکانیکی، بازدارندگی و ضد میکروبی بهبود یافته هستند که می‌تواند شرایط مواد غذایی را به هنگام حمل و نقل و نگهداری، ردیابی و کنترل کند.

نقش حیاتی فناوری نانو در فرآیند بسته‌بندی مواد غذایی به عنوان گسترده‌ترین کاربرد تجاری در بخش مواد غذایی محسوب می‌شود. در سال‌های اخیر، تحقیقات و نوآوری در بسته‌بندی مواد غذایی افزایش یافته است و مواد مختلف مبتنی بر فیلم، نانولوله‌های کربنی (CNT) و نانو پوشش‌های زیست‌تخریب پذیر برای مواد غذایی مختلف توسعه یافته‌اند. در قرن بیست و یکم، تولیدکنندگان، واحدهای فرآوری، فروشندگان و مصرف‌کنندگان مواد غذایی به دنبال سیستم‌های بسته‌بندی جدید با کارایی، ایمنی و کیفیت بالا و قابلیت ردیابی مواد غذایی هستند. این تقاضا به ابزار و فناوری‌های نوآورانه‌ای نیاز دارد که بتواند آن‌ها را برای کاربرد در بسته‌بندی مواد غذایی سازگار سازد و در عین حال هزینه‌های اضافه شده مرتبط با فناوری را توجیه کند.

نانوذرات می‌توانند در تولید مواد جدید بسته‌بندی با خواص مکانیکی، نفوذناپذیری و ضد میکروبی بهبود یافته و دوام بالاتر استفاده شوند. علاوه بر خواص ضد میکروبی، نانوذرات را می‌توان به‌عنوان حاملی برای تحویل آنتی‌اکسیدان‌ها، آنزیم‌ها، مواد معطر، عوامل ضد قهوه‌ای شدن و بسیاری موارد دیگر استفاده کرد (پیدایی^۱ و همکاران، ۲۰۲۱).

یک پلیمر به‌تنهایی نمی‌تواند تمام خواص مطلوب و مورد نیاز برای بسته‌بندی مواد غذایی را ارائه دهد. بنابراین ترکیب پلیمر(ها) یا فیلم‌های چندلایه پیچیده پیشنهاد می‌شود. با استفاده از نانوکامپوزیت‌های پلیمری به‌عنوان بسته‌بندی‌های نوین برای مواد غذایی می‌توان این خلأ را پر کرد.

تقویت فیلم‌های طبیعی و سنتزی با نانوذرات

نانومواد مختلفی مانند سیلیس، خاک رس، گرافن، نانوبلورهای پلی‌ساکاریدی، نانولوله‌های کربنی، کیتوزان، ترکیبات سلولزی، و سایر نانوذرات فلزی، مانند اکسید روی، مس کلوئیدی و تیتانیوم به‌طور گسترده به‌عنوان پرکننده برای تقویت فیلم‌های بسته‌بندی به‌کار گرفته می‌شوند (پیدایی و همکاران، ۲۰۲۱).

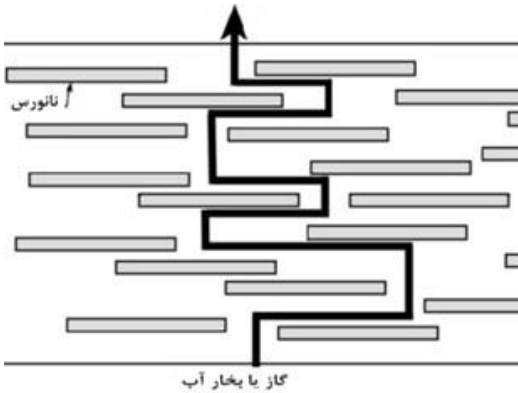
خاک‌رس و سیلیکات‌ها به دلیل در دسترس بودن، هزینه کم و فرآیندپذیری نسبتاً ساده، توجه محققان را به عنوان نانوذرات تقویت کننده به خود جلب کرده‌اند.

سیلیکات‌های لایه‌ای با ضخامت حدود ۱ نانومتر و طول چند میکرون معمولاً در نانوکامپوزیت‌ها به صورت ساختار دو بعدی استفاده می‌شوند. ترکیب سیلیکات‌ها و پلیمرها خاصیت بازدارندگی بسیار خوبی در برابر عبور رطوبت و گازها ایجاد می‌کند.

وارد کردن صفحات نانویی رس به درون پلیمر و تولید فیلم نانوکامپوزیت نیز مسیر زیگزاگی را در ماتریس پلیمری به وجود می‌آورد که عبور آب، اکسیژن، آروما و ترکیبات رنگی را به تاخیر می‌اندازد و بنابراین سرعت نفوذ را کاهش می‌دهد (شکل ۱۶). اغلب، وارد کردن مقداری اندک مثلاً ۵ درصد رس در نانوکامپوزیت می‌تواند خواص سدکنندگی را نسبت به پلیمر اولیه چند برابر افزایش دهد. پخش شدن یکنواخت نانوذرات رس در ماتریس پلیمری باعث می‌شود سطح مشترک پلیمر و پرکننده بسیار بزرگ شود، تحرک مولکولی تغییر یابد و خواص حرارتی و مکانیکی ماده تغییر کند. پرکننده‌هایی مانند نانوالیاف‌ها که نسبت بزرگ‌ترین به کوچک‌ترین بعد آنها^۱ زیاد است، مطلوب‌ترند زیرا مساحت

1 aspect ratio

سطح ویژه بزرگی دارند و اثر تقویت‌کنندگی بهتری نشان می‌دهند.



شکل ۱۶- مسیر پر پیچ و خم عبور گاز در بستر پلیمری حاوی نانورس (الکساندر و دوبوا^۱، ۲۰۰۰).

اگر رس به‌خوبی در ماتریس پخش شده باشد، نفوذپذیری به گازها محدود می‌شود و خواص سدکنندگی در برابر گازها بهبود می‌یابد. این ویژگی باعث می‌شود تا مواد نانویی پلیمر-نانورس برای بسته‌بندی انواع مواد غذایی مانند گوشت فرآوری شده، پنیر، محصولات قنادی، غلات، مواد غذایی قابل پخت در داخل بسته^۲، پوشش‌های اگستروید شده برای آب‌میوه‌ها و محصولات لبنی یا فرآوری‌های کواگستروژن برای ساخت بطری‌های ماء‌الشعیر و نوشابه‌های کربناته مناسب شوند (سیلوستر^۳ و همکاران، ۲۰۱۱).

¹ Alexander and Dubois

³ Silvestre

² food in the bags foods

برهم‌کنش سیلیکات‌ها یا نانورس‌ها با مواد پلیمری می‌تواند سه شکل مختلف کامپوزیت را ایجاد کند (شکل ۱۷). اگر پلیمر را نتوان بین لایه‌های سیلیکات یا نانورس قرار داد، نانوکامپوزیت غیر لایه‌ای^۱ به دست می‌آید که ساختار معمولی میکروکامپوزیت‌ها را دارد (شکل ۱۷-الف). نانوکامپوزیت‌های درهم^۲ ساختار چندلایه‌ای منظم حاوی لایه‌های یک در میان پلیمر-رس با فاصله تکرار شده چند نانومتر ایجاد می‌کنند. چنین ساختارهایی از طریق نفوذ زنجیره‌های پلیمری به ناحیه بین لایه‌ای نانوذرات رس حاصل می‌شود (شکل ۱۷-ب). ساختار لایه‌برداری شده^۳ از نفوذ گسترده لایه‌های رس با پراکندگی تصادفی در ماتریس پلیمر تشکیل شده است. در چنین حالتی لایه‌های رسی به‌طور کامل از هم جدا می‌شوند و آرایشی تصادفی به وجود می‌آورند (شکل ۱۷-ج). این آرایش اگرچه برای نانوکامپوزیت‌ها ایده‌آل است اما دستیابی به آن دشوار خواهد بود (مفتون آزاد و راماسوامی، ۲۰۱۸).

بنابراین، مزیت اصلی استفاده از نانوسیلیکات‌ها یا نانورس‌ها افزایش قدرت سدکنندگی ماده پلیمری به گاز و آب است. در بسیاری از کاربردهای تجاری ادعا می‌شود که ذرات رس می‌توانند نفوذپذیری را تا ۷۵ درصد کاهش دهند

1 Phase separated microcomposite

2 Intercalate nanocomposite

3 Exfoliated nanocomposite

(کاوا^۱ و همکاران، ۲۰۰۶). گزارش شده است که رس‌ها خواص مکانیکی، پایداری حرارتی و مقاومت به شعله را در بسیاری از پلیمرها نیز بهبود می‌دهند (ویس و همکاران، ۲۰۰۶، پارک^۲ و همکاران، ۲۰۰۳).



نانوکامپوزیت‌های
غیر لایه‌ای



ب

نانوکامپوزیت‌های درهم



ج

ساختار لایه‌برداری شده



نانوذرات رس یا
سیلیکات



پلیمر

شکل ۱۷- انواع کامپوزیت به دست آمده از برهمکنش بین سیلیکات‌های لایه‌ای و پلیمرها؛ (الف) غیر لایه‌ای، (ب) درهم و (ج) لایه‌برداری شده

تقویت پلیمرهای زیست تخریب پذیر

1 Gava

2 Park

اکثر مواد بسته‌بندی مورد استفاده برای مواد غذایی تجزیه‌ناپذیرند و مشکلات زیست‌محیطی جدی در سراسر دنیا ایجاد کرده‌اند. مواد بسته‌بندی بر پایه پلیمرهای طبیعی به صورت فیلم‌های زیست‌تخریب‌پذیر و خوراکی برای افزایش ماندگاری، بهبود کیفیت مواد غذایی و کاهش زباله‌های حاصل از مواد بسته‌بندی گسترش یافته‌اند. ولی کاربرد پلیمرهای زیست‌تخریب‌پذیر و خوراکی به دلیل مشکلاتی چند محدود شده است، مشکلاتی مانند کارایی پایین آنها (شکنندگی، شکنندگی ضعیف در برابر گازها و رطوبت)، قابلیت فرآوری ضعیف (مانند دمای تجزیه حرارتی پایین) و هزینه‌های بالا. برای مثال به نشاسته به عنوان پلیمری گرمانرم (ترموپلاستیک) و زیست‌تخریب‌پذیر توجه زیادی شده است ولی این ماده به دلیل حساسیت زیاد به آب و خواص مکانیکی محدود آن (مانند شکنندگی زیاد) کارایی پایینی دارد. کاربرد فناوری نانو امکانات جدیدی را برای بهبود خواص و کاهش هزینه مواد بسته‌بندی بر پایه نشاسته و دیگر پلیمرهای طبیعی به وجود آورده است. برای مثال، افزودن نانوذرات رس به نشاسته و تولید فیلم نانوکامپوزیت نشاسته، روشی مناسب برای ارتقای خواص فیزیکی، مکانیکی و نفوذناپذیری فیلم نشاسته است و بدین ترتیب می‌توان فیلم نانوکامپوزیت نشاسته را در بسته‌بندی محصولات کشاورزی

استفاده کرد (بدیعی و همکاران، ۱۳۹۲). به‌طور کلی، قرار گرفتن یکنواخت رس در ماتریس نشاسته در مقیاس نانو باعث بهبود خواص نشاسته می‌شود و هرچه پخش‌شدگی رس در داخل نشاسته بهتر و یکنواخت‌تر باشد، اثر آن بر بهبود ویژگی‌های فیلم نشاسته بیشتر می‌شود. افزودن رس باعث تشدید تخریب ساختاری نشاسته و آسان‌تر شدن فرآوری آن می‌شود و از واسرشت شدن^۱ نشاسته جلوگیری می‌کند، باعث بهبود خواص مکانیکی و کاهش حساسیت آن به رطوبت و آبدوستی نشاسته می‌شود. بنابراین، کاربردهای نشاسته در صنایع بسته‌بندی را امکان‌پذیر می‌سازد (بدیعی و همکاران، ۱۳۹۱).

تقویت پلیمرهای سنتزی

تقویت پلیمرهای سنتزی با نانوذرات رس باعث استحکام و ارتقای خواص عملکردی این پلیمرها می‌شود. برای مثال، بسته‌بندی نان تست معمولی با فیلم‌های نانوکامپوزیت پلی-اتیلن-رس باعث می‌شود رطوبت نان، نسبت به نان بسته‌بندی شده در فیلم معمولی، بهتر حفظ شود. پخش شدن لایه-های نانورس در ماتریس پلیمری مسیرهای پریچ و خمی برای عبور مولکول‌های بخار آب و گازها ایجاد می‌کند و سرعت انتقال بخار آب را کاهش می‌دهد (الکساندر و دوبوا،

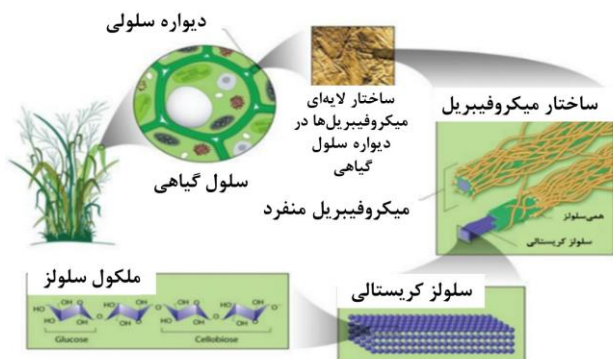
1 Retrogradation

۲۰۰۰). هرچه پخش‌شدگی نانوذرات رس در پلیمر زمینه بیشتر و یکنواخت‌تر باشد، سرعت عبور بخار آب و گازها کمتر می‌شود. به‌همین دلیل میزان رطوبت نان در بسته‌های نانویی به‌طور قابل توجهی نسبت به نان در بسته‌بندی معمولی افزایش می‌یابد. افزایش رطوبت نان در داخل بسته باعث نرم‌شدن بافت و کاهش سفتی نان در مدت نگهداری می‌شود. از طرفی، کاهش سرعت خروج آب از نان بسته‌بندی شده در فیلم نانوکامپوزیت باعث کاهش سرعت تغییر رنگ، کاهش تیرگی و به‌طور کلی کاهش بیاتی نان نسبت به محصول نگهداری شده در بسته‌بندی معمولی می‌شود (بدیعی و همکاران، ۱۳۹۳).

تقویت‌کننده‌های نانویی مبتنی بر سلولز

سلولز پلیمر طبیعی بسیار قوی است که در مقادیر فراوان در طبیعت موجود است. این ماده ساختمانی از سلول‌های فیبری بلند تشکیل شده است. استفاده از سلولز برای بسته‌بندی مقرون به صرفه است و ضمن سازگاری با محیط زیست، بازیافت آن نیز آسان است. استفاده از نانوسلولز باعث افزایش سطح ذرات و افزایش فعالیت‌های مرتبط با آن می‌شود. میکرو فیبریل‌ها و ویسکرها دو نوع تقویت‌کننده نانویی هستند که از سلولز به‌دست می‌آیند. زنجیره‌های سلولزی، که به صورت میکرو فیبریل‌ها (نانوالیاف) وجود

دارند، دسته‌ای از مولکول‌ها هستند که از طریق پیوند هیدروژنی تثبیت می‌شوند. میکروفیبریل‌ها از تجمع رشته-های ابتدایی تشکیل می‌شوند که شامل بخش‌های کریستالی و آمورف (بی‌شکل) هستند. قطعات کریستالی را می‌توان با تیمارهای هیدرولیز اسیدی جدا کرد که به‌عنوان ویسکر، نانوکریستال، نانومیله یا میکروبلورهای میله مانند سلولز شناخته می‌شوند (شکل ۱۸) (شارما و همکاران، ۲۰۱۷).



شکل ۱۸- ساختار دیواره گیاهی و میکروفیبریل‌های سلولزی

مفتون‌آزاد و همکاران (۲۰۲۰) دریافتند که با افزایش نانوسلولز تا سطح ۵ درصد مقاومت خزشی فیلم‌های تهیه شده از آرد نخود و نیز دامنه ویسکوالاستیک خطی فیلم‌ها افزایش می‌یابد.

تقویت‌کننده‌های نانویی مبتنی بر سلولز استحکام و ویژگی‌های حرارتی پلیمر را بهبود می‌بخشد. برای مثال، با

کاربرد فناوری نانو در بسته‌بندی محصولات کشاورزی

افزودن ۵ درصد نانوسلولز به فیلم‌های پکتینی می‌توان فیلم‌های بیونانوکامپوزیت با دمای شیشه‌ای بالاتر و ویژگی‌های مطلوب مکانیکی تولید کرد. این فیلم‌ها، مقاومت بسیار مطلوبی در برابر رطوبت دارند، به‌طوری که در مقایسه با فیلم پکتینی معمولی نفوذپذیری به بخار آب را تا ۴۰ درصد کاهش می‌دهند (هاشمی و همکاران، ۱۳۹۸). نمونه‌ای از مراحل تهیه فیلم نانوکامپوزیتی فعال بر پایه پکتین در شکل ۱۹ نشان داده شده‌است.



شکل ۱۹- مراحل کلی ساخت فیلم فعال نانوکامپوزیت بر پایه اولتراسوند

فصل سوم

بسته‌بندی فعال

مقدمه

بر خلاف بسته‌بندی معمولی مواد غذایی، بسته‌بندی فعال^۱ سیستمی از بسته‌بندی است که با هدفی خاص طراحی شده و شامل اجزایی است که می‌توانند موادی مانند عوامل ضد میکروبی یا آنتی‌اکسیدانی را به‌داخل بسته آزاد کنند یا موادی مانند اکسیژن یا بخار آب را از محصولات غذایی بسته‌بندی شده یا محیط اطراف جذب کنند.

ترکیبات فعال عواملی مانند ترکیبات ضد میکروبی، نگهدارنده‌ها، جاذب‌های اکسیژن^۲ و بخار آب، حذف‌کننده‌های اتیلن^۳ و غیره هستند که ادغام شدن آن‌ها با پلیمر بسته‌بندی برای افزایش ماندگاری و کیفیت محصولات غذایی داخل بسیار موثر است. در جدول ۱ انواع بسته‌بندی-های فعال و کاربردهای آن‌ها برای فرآورده‌های غذایی نشان داده شده است (کاسواندی،^۴ ۲۰۱۶).

1 Active Packaging
2 Oxygen absorbers

3 Ethylene scavengers
4 kuswandi

کاربرد فناوری نانو در بسته‌بندی محصولات کشاورزی

جدول ۱- انواع بسته‌بندی‌های فعال

عملکرد	هدف	مواد مورد استفاده	موارد کاربرد
حذف اکسیژن	کاستن یا جلوگیری از رشد کپک‌ها، مخمرها و باکتری‌های هوازی؛ جلوگیری از اکسیداسیون چربی‌ها، روغن-ها، ویتامین‌ها، رنگ؛ جلوگیری از آسیب‌رسانی کرم‌ها، حشرات و لارو حشرات	ترکیبات دارای آهن، اسیداسکوربیک، نمک‌های فلزات، گلوکز اکسیدازها، الکل اکسیداز	پنیر، محصولات گوشتی، محصولات آماده مصرف، محصولات نانوبی، قهوه، چای، مغزها و شیر خشک
حذف دی‌اکسید کربن	جلوگیری از ترکیدن بسته	هیدروکسید کلسیم و هیدروکسید سدیم یا هیدروکسید پتاسیم، اکسید کلسیم و سیلیکاژل	قهوه بو داده- شده، گوشت خشک، گوساله، محصولات خشک
حذف بو، آمین‌ها و آلدئیدها	کاهش طعم تلخ در آب گریپ فرویت، بهبود بوی ماهی و غذاهای حاوی روغن	فیلم استات سلولز شامل آنزیم نارینجیناز، نمک آهن و اسیداسکوربیک یا اسیدسیتریک	آب میوه‌ها، ماهی، غذاهای دارای روغن مانند چیپس سیب‌زمینی، بیسکویت و

فصل سوم - بسته‌بندی فعال

عملکرد	هدف	مواد مورد استفاده	موارد کاربرد
جاذب	کاهش	پلی‌اولفین‌ها مانند	محصولات غله‌ای، آبجو
های نور و پرتو	فتواکسیداسیون	پلی‌اتیلن و پلی-پروپیلن که با	حساس به نور مانند گوشت
فرابنفش		جاذب‌های پرتو	خوک و نوشیدنی‌ها
		فرابنفش پر شده-اند،	
حذف-کننده لاکتوز	ارائه محصولات لبنی به افرادی که لاکتوز را تحمل نمی‌کنند.	لاکتاز تثبیت شده در مواد بسته بندی	شیر و دیگر محصولات لبنی
حذف-کننده کلسترول	بهبود سلامت و بهداشت محصولات شیری	کلسترول ردوکتاز تثبیت شده در ماده بسته بندی	شیر و دیگر محصولات لبنی

بسته‌بندی‌های فعال حاوی نانوذرات معدنی

اثر نانومواد مشتق‌شده از فلزات مختلف مانند نقره، طلا، روی و اکسیدهای فلزی، دی‌اکسیدتیتانیوم، اکسید روی، اکسید سیلیکون و اکسید منیزیم در بسته‌بندی‌های فعال بررسی شده‌اند (کاسواندی، ۲۰۱۶). این ذرات یا به‌صورت تماس مستقیم عمل می‌کنند یا می‌توانند به آرامی مهاجرت کنند و با مواد آلی موجود در غذا واکنش نشان دهند. فعالیت ضد میکروبی نانوذرات ممکن است به دلیل یکی از مکانیسم‌های زیر باشد (شکل ۲۰):

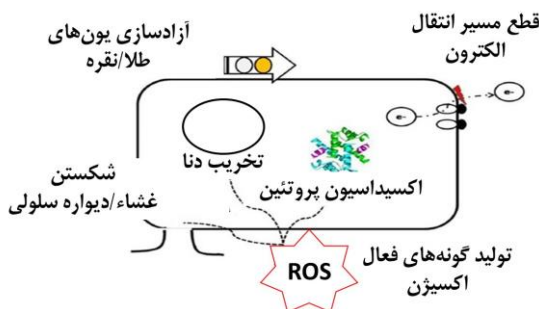
✓ برهمکنش مستقیم با سلول‌های میکروبی (قطع انتقال الکترون از طریق ایجاد اختلال در غشا یا نفوذ به پوشش سلولی)،

✓ اکسیداسیون اجزای سلولی،

✓ تولید محصولات ثانویه (برای مثال، گونه‌های فعال

اکسیژن (ROS)^۱ یا یون‌های محلول فلزات سنگین که به آسیب سلولی می‌انجامد).

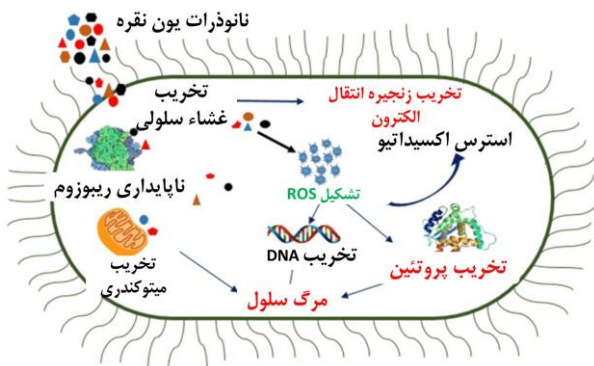
¹ Reactive oxygen species (ROS)



شکل ۲۰- مکانیسم عملکرد نانوذرات دارای فعالیت ضد میکروبی

بسته‌بندی‌های فعال حاوی نانوذرات نقره

نانوذرات نقره به دلیل داشتن اثر ضد میکروبی در سویه‌های مختلف باکتری‌های غیر بیماری‌زا و بیماری‌زا، یکی از نانوذراتی است که بیشترین مطالعات روی آن صورت گرفته‌است. علاوه بر سویه‌های باکتریایی، نانوذرات نقره به عنوان مهارکنندهٔ چندین قارچ و چندین ویروس شناخته شده‌اند. نقره متابولیسم باکتری‌ها را با اتصال به DNA، پروتئین و آنزیم‌ها هدف قرار می‌دهد که منجر به اثر کشندگی می‌شود. نانوذرات نقره غشای بیرونی و نیز غشای سیتوپلاسمی را بی‌ثبات و مختل می‌کند. این ترکیب، آنزیم‌های زنجیره تنفسی را نیز مهار می‌کند و می‌تواند تولید گونه‌های فعال اکسیژن را تحریک کند. در شکل ۲۱، مکانیسم اثر نانوذرات نقره بر سلول باکتری نشان داده شده است.



شکل ۲۱- مکانیسم اثر نانوذرات نقره بر سلول باکتری

از ژئولیت‌های نقره برای ایجاد کامپوزیت‌های پلیمری ضدباکتری نیز استفاده می‌شود. نانوکامپوزیت‌های مبتنی بر نانوذرات نقره پایدارند و یون نقره را به آهستگی در غذاهای ذخیره‌شده آزاد می‌کنند و در نتیجه فعالیت ضد میکروبی پایداری دارند.

نانوکامپوزیت‌های حاوی نانوذرات نقره ممکن است در بسته‌های غذایی، که نیاز به حمل و نقل یا نگهداری طولانی‌تری دارند، استفاده شوند. برخی از نانوذرات مبتنی بر نقره مانند نیترات نقره یا سیستم‌های بسته‌بندی حاوی نقره و دی‌اکسید تیتانیوم که فعالیت ضد میکروبی دارند نیز قادر به جذب و تجزیهٔ اتیلن هستند (گی‌کوارد^۱ و همکاران، ۲۰۲۰).

¹ Gaikwad

اتیلن هورمون گیاهی طبیعی است که طی رسیدن میوه تولید می‌شود. حذف اتیلن از محیط بسته‌بندی به افزایش دوره نگهداری محصولات تازه مانند میوه‌ها و سبزی‌ها کمک می‌کند. فیلم‌ها و پوشش‌های فعال حاوی نانوذرات نقره در محصولاتی مانند هویج، گلابی، مارچوبه و میوه عناب باعث افزایش ماندگاری، کاهش سرعت پوسیدگی و به تأخیر افتادن رسیدگی میوه می‌شوند (مفتون آزاد و همکاران، ۱۳۹۳ الف). بالشتک‌های سلولزی حاوی نانوذرات نقره باعث کاهش میزان شیرابه‌های حاصل از آلودگی میکروبی گوشت نگهداری‌شده در بسته‌بندی با اتمسفر اصلاح شده می‌شوند. کاربرد این بالشتک‌ها در محصولات تازه نیز باعث کاهش سرعت رسیدن محصول و افزایش ماندگاری آن می‌شوند (پیدایی و همکاران، ۲۰۲۱).

بسته‌بندی‌های فعال حاوی دیگر نانوذرات با خواص ضد میکروبی

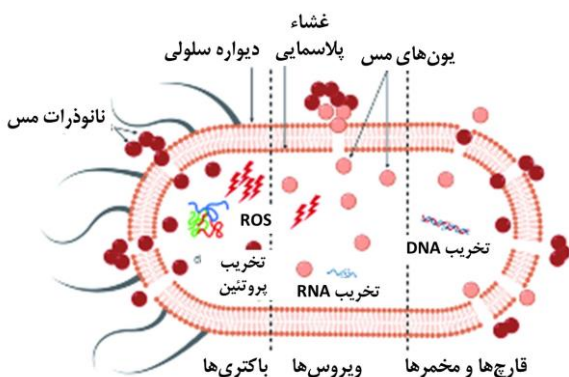
نانوذرات مس قرار گرفته روی کامپوزیت‌های پلیمری از رشد میکروارگانیسم‌های مختلف مانند ساکارومایسس سرویزیه^۱، اشریشیا کلای^۲، استافیلوکوکوس اورئوس^۳، لیستریا مونوسیتوژنز^۴ و باسیلوس سابتیلیس^۵ جلوگیری

1 *Saccharomyces cerevisiae*
2 *E. coli*

3 *Staphylococcus aureus*
4 *Listeria monocytogenes*
5 *Bacillus subtilis*

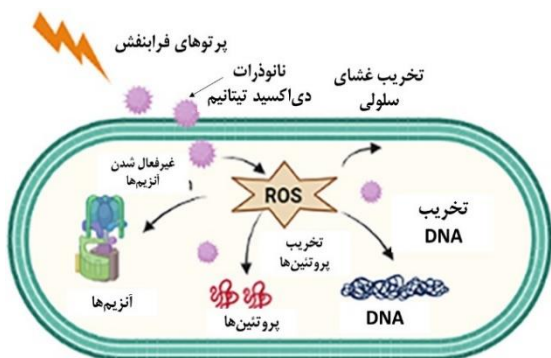
کاربرد فناوری نانو در بسته‌بندی محصولات کشاورزی

می‌کنند. فعالیت ضد میکروبی نانوذرات مس به دلیل تولید گونه‌های فعال اکسیژن، پراکسیداسیون چربی‌ها، اکسیداسیون پروتئین و تخریب DNA است (شکل ۲۲).



شکل ۲۲- مکانیسم اثر نانوذرات مس بر سلول باکتری

اکسید(های) نانوذرات مختلف مانند دی‌اکسید تیتانیوم (TiO_2)، اکسید روی، اکسید سیلیکون و اکسید منیزیم به عنوان مسدودکننده‌های پرتوهای فرابنفش در بسته‌بندی‌های مواد غذایی کاربرد دارند. در این میان، ذرات دی‌اکسید تیتانیوم بیشترین تاثیر را نشان داده است. دی‌اکسید تیتانیوم فعالیت فتوکاتالیستی دارد و فعالیت ضد میکروبی آن تنها با حضور نور فرابنفش فعال امکان‌پذیر است (شکل ۲۳).



شکل ۲۳- مکانیسم اثر نانوذرات TiO_2 بر سلول باکتری

نانوذرات دی اکسید تیتانیم فعالیت خوبی در برابر رشد *سالمونلا کلراسیوس*^۱، *ویبریو پاراهمولیتیکوس*^۲ و *لیستریا مونوسیتوزنز* نشان می‌دهند (کاسواندی، ۲۰۱۶). دی اکسید تیتانیم در تهیه نانوذرات، نانومیلها، نانوسیمها، نانولوله‌ها استفاده می‌شود. مکانیسم دقیق فعالیت میکروب‌کشی دی اکسید تیتانیم نامشخص است، اما این مکانیسم را ممکن است به حمله اکسیداتیو اولیه آن به غشای سلولی خارجی/درونی باکتری، تغییرات فعالیت آنزیم وابسته به کوآنزیم A و آسیب DNA از طریق رادیکال‌های هیدروکسیل نسبت داد. بسته‌بندی سیب، گوجه فرنگی و لیمو با فیلم‌های پلاستیکی پوشش داده شده با نانوذرات دی اکسید تیتانیم از رشد *پنی‌سیلیوم اکسپنسوم*^۳ جلوگیری می‌کند که

1 *Salmonella choleraesuis*

3 *Penicillium expansum*

2 *Vibrio parahaemolyticus*

دلیل آن خواص فوتوکاتالیستی ذرات دی‌اکسید تیتانیم پس از قرار گرفتن در معرض نور است (شارما و همکاران، ۲۰۱۷). شرکت بایر پلیمرز^۱ آلمان فیلم بسته‌بندی تقویت‌شده با نانوذرات سیلیکات را ساخته که ورود اکسیژن و دیگر گازها و از دست دادن رطوبت را به‌تعویق می‌اندازد و در نتیجه از فساد مواد غذایی جلوگیری می‌کند (شارما و همکاران، ۲۰۱۷). شرکت نانوکرآدر ایالات متحده، نانوکامپوزیت مبتنی بر نانوذرات خاک رس تولید کرده‌است. نانوکامپوزیت‌های متشکل از ۵ درصد نانوذرات سیلیس می‌توانند خواص مکانیکی و فیزیکی فیلم بسته‌بندی را بهبود بخشند (شارما و همکاران، ۲۰۱۷).

نانوذرات سیلیکا (nSiO_2) باعث بهبود خواص مکانیکی یا ممانعت‌کنندگی ماتریس‌های پلیمری مختلف می‌شوند. این ویژگی ممکن است به‌دلیل برهمکنش‌های کووالانسی قوی بین نانوذرات سیلیکا و ماتریس پلیمری باشد.

نانو ذرات اکسید روی (ZnO) فعالیت ضدباکتریایی خوبی از خود نشان می‌دهند که این خاصیت با کاهش اندازه ذرات افزایش می‌یابد. نانوذرات روی برای فعال شدن به نور مرئی نیاز دارند. تماس مستقیم آن با دیواره سلولی میکروبی ممکن است منجر به تخریب یکپارچگی سلول باکتری،

1 Bayer Polymers

2 Nanocare

آزادسازی یون‌های ضد میکروبی Zn^{2+} و تولید ROS شود (شارما و همکاران، ۲۰۱۷).

الکتروریسی^۱ یکی از روش‌های بسیار پرکاربرد در تولید نانو الیاف از پلیمرهای طبیعی و مصنوعی (به صورت ذوب شده یا محلول) است. در این روش از قرار گرفتن محلول پلیمرها در معرض ولتاژ بالا نانوالیاف تولید می‌شود. استفاده از یک درصد سینمالدهید^۲ در فیلم الکتروریسی شده حاصل از ایزوله پروتئینی نخود و پلی‌وینیل الکل می‌تواند رشد باکتری‌های گرم مثبت و گرم منفی را در محیط کشت و نیز مواد غذایی متوقف کند (شکل ۲۴) (مفتون‌آزاد و همکاران، ۲۰۱۹ الف).

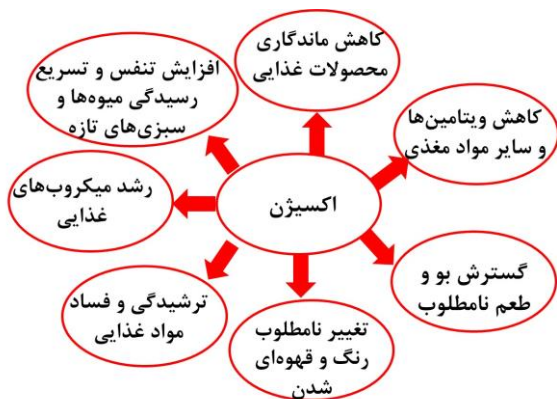


شکل ۲۴- فیلم آنتی‌باکتریال تولید شده بر پایه ایزوله پروتئینی نخود و سینمالدهید به روش الکتروریسی (مفتون‌آزاد و همکاران، ۲۰۱۹ الف)

1 Electrospinning
2 Cinnamaldehyde

جاذب‌های اکسیژن حاوی نانوذرات

شکل ۲۵ تاثیرهای نامطلوب اکسیژن بر محصولات غذایی را به‌طور خلاصه نشان می‌دهد. اکسیژن در بسته‌بندی مواد غذایی باعث بروز فرآیندهای تخریبی متنوع مانند قهوه‌ای شدن، ترشیدگی، رشد میکروفلور هوازی، کاهش ویتامین‌ها، تغییر رنگ و گسترش بو و طعم نامطلوب و در نتیجه کاهش ماندگاری محصول می‌شود. میوه‌ها و سبزی‌های تازه در دوره نگهداری، تنفس می‌کنند که باعث تسریع در رسیدگی پس از برداشت و کوتاه شدن ماندگاری محصول می‌شود. برای مقابله با این اثرهای زیان‌آور، ورود گاز اکسیژن به داخل بسته‌بندی باید متوقف شود یا با توجه به محصول تا حد قابل قبولی کاهش یابد.



شکل ۲۵- اثرهای نامطلوب اکسیژن بر مواد غذایی

براساس فیلم‌های نانوکامپوزیت برای مهار کردن اکسیژن و اتیلن یا محدود کردن مسیر انتشار اکسیژن، بسته‌بندی‌های فعال مختلفی بررسی قرار گرفته‌اند.

فیلم‌های پلیمری جاذب اکسیژن حاوی نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم به عنوان فیلم‌های بسته‌بندی برای مواد غذایی حساس به اکسیژن استفاده می‌شوند. از فیلم‌های پلی‌اتیلن با دانسیته بالا ادغام‌شده با کائولینیت حاوی آهن نیز برای تولید فیلم‌های بسته‌بندی مهارکننده اکسیژن استفاده می‌شود (شارما و همکاران، ۲۰۱۷). مواد جاذب اکسیژن می‌توانند به صورت فیلم، ساشه یا درپوش بطری استفاده شوند (اشکال ۲۶ الف تا ج).



شکل ۲۶- انواع بسته‌های جاذب اکسیژن؛ (الف) فیلم، (ب) ساشه، (ج) درپوش بطری

کاربرد فناوری نانو در بسته‌بندی محصولات کشاورزی

در مقیاس نانو، دی‌اکسید تیتانیم می‌تواند بر اثر تابش فرابنفش برانگیخته‌شود و الکترون‌ها روی سطح آن تجمع یابند. در واکنش‌های فوتوکاتالیستی، انتقال الکترون به اکسیژن هوا مرحله تعیین‌کننده سرعت است و حفره‌های نوری تولید شده ($+h$) دارای پتانسیل اکسیداسیون قوی هستند که می‌توانند با آب و دیگر ترکیبات واکنش دهند. از طرف دیگر، رسوب نانوکریستالی TiO_2 روی لایه‌های شیشه و استات، محیطی بسته بدون اکسیژن تشکیل می‌دهد و از خواص فوتوکاتالیستی آن می‌توان برای حذف اتیلن تولید شده و به تاخیر انداختن رسیدگی میوه‌های فرازگرا استفاده کرد. گاز اتیلن باعث تسریع رسیدگی محصولات باغبانی می‌شود (شکل ۲۷). فیلم‌های پلی‌پروپیلن با پوشش TiO_2 برای حذف اتیلن در محصولات باغبانی بسته‌بندی شده استفاده می‌شوند. این فیلم‌ها می‌توانند گاز اتیلن را در صورت تابش پرتو فرابنفش تجزیه کنند. این نوع بسته‌بندی با حذف مداوم گاز اتیلن می‌تواند باعث به‌تاخیر افتادن رسیدگی میوه‌های فرازگرا به‌هنگام حمل و نقل طولانی‌مدت آن‌ها شود (شکل ۲۸).



شکل ۲۷- تسریع رسیدگی محصولات باغی در اثر گاز اتیلن



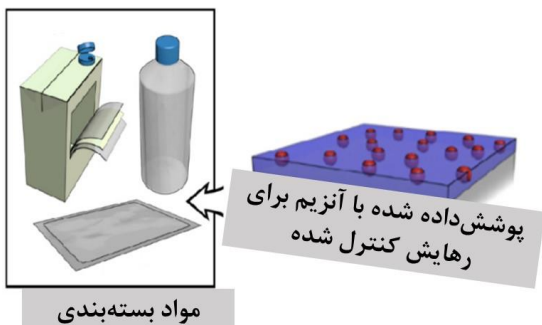
شکل ۲۸- نمونه‌ای از ظرف‌های پلاستیکی حاوی نانوذرات
تیتانیوم

بسته‌بندی‌های فعال - تثبیت آنزیم‌ها

آنزیم‌ها نقش‌های چندگانه‌ای در صنایع غذایی دارند ولی گاهی کاربرد آن‌ها در سیستم‌های غذایی به دلیل حساسیت به شرایط محیطی (دما و pH)، یا بازدارنده‌های آنزیمی محدود می‌شود.

روش تثبیت آنزیم‌ها و گنجاندن آن‌ها در مواد بسته‌بندی راه‌حلی مناسب برای استفاده مستقیم از آنزیم‌ها در ماتریس غذاست. تثبیت آنزیم در مقیاس نانو، سطح تماس آن را افزایش می‌دهد و عملکرد و فعالیت آنزیم را با افزایش پایداری آنزیم به pH، دما و مقاومت به پروتئازها ارتقا می‌بخشد، و افزون بر آن رهایش آنزیم‌ها را به داخل سیستم غذایی کنترل می‌کند. برای مثال، افزودن لاکتاز (یا کلاسترول ردوکتاز به مواد بسته‌بندی می‌تواند ارزش مواد غذایی داخل بسته را از طریق تجزیه قند لاکتوز محصولات لبنی یا کاهش

میزان کلسترول آن افزایش دهد و نیازهای مصرف کنندگانی را برطرف کند که بدن آن‌ها از نظر فعالیت این آنزیم‌ها دچار مشکل است (شارما و همکاران، ۲۰۲۲). در شکل ۲۹، تصویر کلی روش تثبیت آنزیم‌ها روی سطح ماده بسته‌بندی نشان داده شده است (باستاراجیا^۱ و همکاران، ۲۰۱۵).



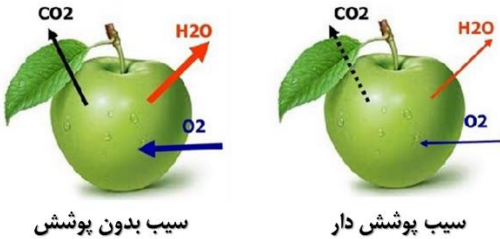
شکل ۲۹- تصویر کلی تثبیت آنزیم‌ها روی سطح ماده بسته‌بندی (برگرفته از باستاراجیا و همکاران، ۲۰۱۵)

پوشش‌دهی محصولات باغی

پوشش‌های خوراکی برپایه پلیمرهای طبیعی به‌شکلی گسترده برای افزایش ماندگاری میوه‌ها و سبزی‌های مختلف استفاده می‌شوند. پوشش‌های امولسیون به‌طور مستقیم روی سطح محصولات باغی تازه قرار می‌گیرند و با تغییر اتمسفر داخلی هریک از محصولات باغی، به‌صورت بسته‌بندی با اتمسفر اصلاح شده عمل می‌کنند (شکل ۳۰). این پوشش‌ها

¹ Bastarrachea

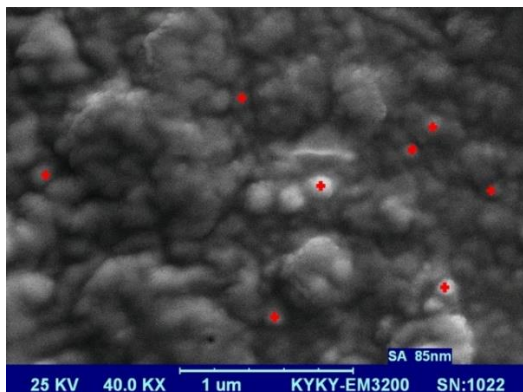
می‌توانند با جلوگیری از ورود رطوبت، گازها، بو، چربی و با حفظ کیفیت غذا بعد از باز شدن اولین لایه بسته‌بندی آن، ویژگی‌های کیفی ماده غذایی را بهبود بخشند.



شکل ۳- کاهش میزان نفوذپذیری به گازهای تنفسی و بخار آب با پوشش‌دهی محصولات باغی

یکی از راه‌های افزایش کارایی و بهبود عملکرد فیلم‌ها و پوشش‌ها برای بسته‌بندی، استفاده از فناوری نانو و تهیه نانوذرات است. تاثیر یک نوع پوشش نانوامولسیون بر پایه کیتوزان بر ماندگاری محصولات مختلف باغی مانند سیب گلاب (بدیعی و همکاران، ۱۳۹۲)، توت‌فرنگی (هاشمی و همکاران، ۱۳۹۴)، پرتقال (هاشمی و همکاران، ۱۳۹۲ الف)، نارنگی (هاشمی و همکاران، ۱۳۹۲ ب)، خرما (مفتون‌آزاد و همکاران، ۱۳۹۳ الف)، و انجیر سیاه (مفتون‌آزاد و همکاران، ۱۳۹۳ ب) نشان داده است که این نوع پوشش نانویی باعث افزایش ماندگاری و بهبود کیفیت این محصولات تازه می‌شود. تصویربرداری با میکروسکوپ الکترونی نشان می‌دهد

که اندازه ذرات در این پوشش‌ها تا ۱۰۰ نانومتر کاهش یافته است (شکل ۳۱). کاهش اندازه ذرات و کوچک‌تر شدن منافذ پوشش‌ها باعث افزایش کارایی آنها نسبت به پوشش‌های خوراکی معمولی می‌شود.



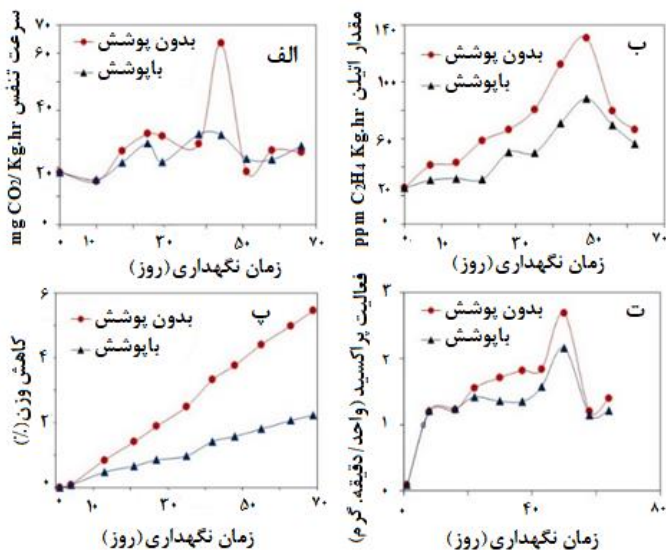
شکل ۳۱- تصویر پوشش نانوامولسیون کیتوزان با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (برخی از ذرات با اندازه کمتر از ۱۰۰ نانومتر با علامت قرمز نشان داده شده‌اند). (بدیعی و

همکاران، ۱۳۹۲)

با پوشش‌دهی سیب گلاب کهنر با پوشش‌های نانوامولسیون کیتوزان، رسیدگی طبیعی میوه کندتر می‌شود و میوه‌ها از نظر کیفی شرایط بهتری دارند. پوشش‌دهی میوه باعث کوچک‌تر شدن قطر منافذ تنفسی سطح میوه و کاهش میزان نفوذپذیری به گازهای تنفسی و بخار آب می‌شود. در نتیجه، پوشش‌ها شدت تنفس و میزان تولید اتیلن را در مرحله

فرازگرایی، نسبت به سیب‌های بدون پوشش، به‌طور معنی‌داری کاهش می‌دهند (بدیعی و همکاران، ۱۳۹۲) و این نشان می‌دهد که پوشش‌های به‌کاررفته به‌طور معنی‌داری فرآیندهای رسیدگی سیب را به‌تاخیر می‌اندازند. کاربرد این پوشش‌ها می‌تواند میزان افت وزن سیب را در دوره نگهداری تا بیش از ۲/۵ برابر کاهش دهد. پوشش‌دهی مقدار ویتامین ث را پیش از ورود میوه به فاز فرازگرایی بیشتر حفظ می‌کند. در پایان دوره نگهداری و پس از پایان مرحله فرازگرایی، فعالیت آنزیم پلی‌فنل اکسیداز در میوه‌های پوشش داده‌شده کاهش می‌یابد و میزان قهوه‌ای‌شدگی بافت میوه نیز در همین زمان همراه با کاهش فعالیت این آنزیم در میوه‌های پوشش‌دار کمتر می‌شود. به‌طور کلی، پوشش خوراکی بر پایه نانوامولسیون کیتوزان می‌تواند باعث کاهش افت وزن سیب در انبار، کاهش شدت تنفس و کاهش میزان اتیلن شود، رسیدگی میوه را به‌تعویق اندازد، عمر انباری آن را افزایش و ضایعات کمی و کیفی سیب را در دوره نگهداری کاهش دهد (شکل ۳۲).

شکل ۳۲- تاثیر نوع پوشش بر سرعت تنفس (الف)، میزان



تولید اتیلن (ب)، مقدار کاهش وزن (پ) و فعالیت آنزیم پراکسیداز (ت) در سیب گلاب کهنز (بدیعی و همکاران، ۱۳۹۲)

استفاده از پوشش نانوامولسیون کیتوزان باعث افزایش ماندگاری و حفظ کیفیت مطلوب توت‌فرنگی می‌شود (هاشمی و همکاران، ۱۳۹۴). استفاده از پوشش نانوامولسیون کیتوزان حاوی عنصر مس با اندازه ذرات ۵۰ تا ۱۱۰ نانومتر باعث حفظ ویتامین ث و آنتوسیانین‌ها، کاهش شدت تنفس و افت وزن میوه توت‌فرنگی در مدت ۲۰ روز نگهداری در دمای 4 ± 1 درجه سلسیوس و رطوبت نسبی ۷۰ درصد می‌شود و از رشد کپک‌ها جلوگیری می‌کند (شکل ۳۳).

ماندگاری توت‌فرنگی در این پوشش از ۸ روز به ۱۶ روز افزایش می‌یابد و در صورت استفاده از پوشش نانوامولسیون کیتوزان حاوی مس یا بدون مس با اندازه ذرات ۵۰ تا ۱۱۰ نانومتر ماندگاری توت‌فرنگی از ۸ روز به ۲۰ روز (۲/۵ برابر) افزایش خواهد یافت (هاشمی و همکاران، ۱۳۹۴).



شکل ۳۳- الف: توت فرنگی پوشش داده شده با پوشش نانوامولسیون کیتوزان و ب: توت فرنگی بدون پوشش و کپک-زده بعد از ۸ روز نگهداری در دمای 4 ± 1 درجه سلسیوس (هاشمی و همکاران، ۱۳۹۴)

کاربرد پوشش نانوامولسیون کیتوزان باعث کاهش افت وزن رطب در حین نگهداری و کاهش شدت تنفس میوه می‌شود و به‌طور کلی رسیدگی میوه را به‌تعویق می‌اندازد، عمر انباری آن را افزایش و ضایعات کمی و کیفی را در دوره نگهداری کاهش می‌دهد (شکل ۳۴) (مفتون‌آزاد و همکاران، ۱۳۹۳ الف). در مورد انجیر سیاه استهبان نیز پوشش‌دهی با پوشش نانوامولسیون کیتوزان نتایج مشابهی دارد و عمر

نگهداری میوه را افزایش می‌دهد (شکل ۳۵) (مفتون‌آزاد و همکاران، ۱۳۹۳ ب).



شکل ۳۴- الف: رطب کبکاب بدون پوشش نانوکیتوزان پس از یک ماه نگهداری در ۵ درجه سلسیوس و ب: رطب کبکاب پوشش دار پس از یک ماه نگهداری در ۵ درجه سلسیوس (مفتون‌آزاد و همکاران، ۱۳۹۳ الف)



شکل ۳۵- الف: انجیر سیاه بدون پوشش نانوکیتوزان پس از یک ماه نگهداری در ۵ درجه سلسیوس و ب: انجیر سیاه پوشش دار پس از یک ماه نگهداری در ۵ درجه سلسیوس (مفتون‌آزاد و همکاران، ۱۳۹۳ ب)

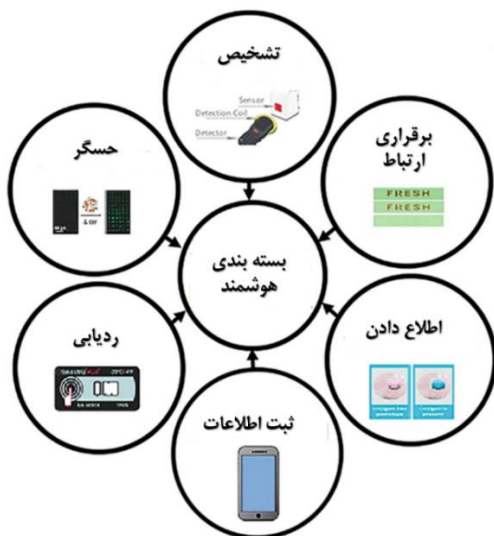
فصل چهارم

بسته‌بندی هوشمند

مقدمه

سیستم‌های بسته‌بندی هوشمند^۱ جنبه ارتباطی بسته‌بندی را تقویت می‌کنند. این نوع بسته‌بندی‌های پیشرفته می‌توانند ویژگی غذای بسته‌بندی شده را تشخیص دهند و مکانیسم‌های مختلفی را برای ثبت و انتقال اطلاعات در مورد کیفیت یا وضعیت موجود در غذا، ضمن در نظر گرفتن ایمنی آن، به کار گیرند. شکل ۳۶ عملکرد بسته‌بندی هوشمند را به طور خلاصه نشان می‌دهد. چنین سیستمی از روش‌های ارتباطی ابتکاری متفاوتی مانند سنسورهای نانو، نشانگرهای دما، سنسورهای اکسیژن، نشانگرهای تازگی و غیره استفاده می‌کند (شارما و همکاران، ۲۰۱۷).

¹ Smart/Intelligent packaging

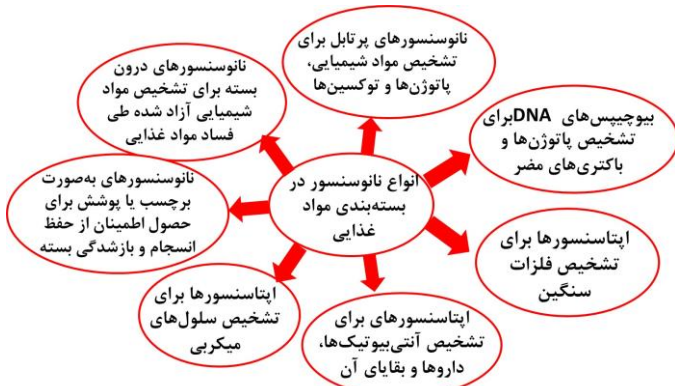


شکل ۳۶- تصویر کلی از نحوه عمل بسته‌بندی هوشمند

نانوحسگرها

نانوحسگرها حسگرهایی با فناوری نانو هستند که با طیف وسیعی از تغییرات مشخص می‌شوند. به طور کلی، نانوحسگرها را می‌توان به عنوان برچسب یا پوشش برای افزودن عملکرد هوشمند به بسته‌بندی مواد غذایی اضافه کرد تا بدین وسیله از یکپارچگی بسته از طریق تشخیص نشتی (برای مواد غذایی بسته بندی شده در خلأ یا اتمسفر خنثی)، نشانگرهای تغییرات زمان و دما (برای مثال: انجماد - ذوب - انجماد مجدد)، یا ایمنی محصول (فساد میکروبی) آگاه شد.

شکل ۳۷ انواع مختلف نانوحسگرهای به کار رفته در بسته بندی محصولات کشاورزی را نشان می‌دهد.



شکل ۳۷- انواع نانوحسگرهای مورد استفاده برای بسته‌بندی مواد غذایی

گنجاندن نانوحسگرها در سیستم‌های بسته‌بندی مواد غذایی به شناسایی تغییرات مرتبط با فساد، عوامل بیماری‌زا و آلاینده‌های شیمیایی کمک می‌کند و در نتیجه سناریوی دقیقی از تازگی محصولات غذایی را ارائه می‌دهد.

خواص شیمیایی و الکترواپتیکی منحصر به فرد ذرات نانومقیاس باعث می‌شود نانوحسگرها بتوانند به تغییرات محیطی (مانند دما یا رطوبت در اتاق‌های ذخیره‌سازی، مقادیر اکسیژن موجود در بسته)، تخریب محصول یا آلودگی

کاربرد فناوری نانو در بسته‌بندی محصولات کشاورزی

میکروبی پاسخ دهند. در جدول ۲، انواع حسگر و کاربردهای آن‌ها برای فرآورده‌های غذایی نشان داده شده‌است.

جدول ۲- انواع حسگرهای مورد استفاده در بسته‌بندی هوشمند

نوع حسگر	مکانیسم عمل	خروجی	موارد کاربرد
حسگرهای دما - زمان	مکانیکی، شیمیایی یا آنزیمی	شرایط نگهداری	غذاهای نگهداری شده در یخچال و فریزر
حسگرهای اکسیژن	نمک‌های ردوکس -نمک- های حساس به تغییرات pH و آنزیم‌ها	شرایط درون بسته	غذاهای بسته‌بندی شده در غلظت کم اکسیژن
حسگرهای دی‌اکسید کربن	شیمیایی	حسگر دی اکسید کربن	شیمیایی
حسگرهای تولید متابولیت‌های میکروبی	نمک‌های حساس به تغییرات pH، کلیه رنگ‌های واکنش دهنده با برخی متابولیت‌ها	حسگرهای تولید متابولیت‌های میکروبی	رنگ‌های pH، کلیه رنگ‌های واکنش دهنده با برخی متابولیت‌ها
حسگرهای پاتوژن	روش‌های متعدد شیمیایی و ایمونولوژیک واکنش دهنده با توکسین‌ها	باکتری‌های پاتوژن مانند <i>E. coli</i>	غذاهای فسادپذیر مانند گوشت، ماهی و ماکیان

حسگرهای گاز

حسگرهای گاز در اساس برای تشخیص ترکیبات گازی در بسته استفاده می‌شوند. سنسورهای نوری اکسیژن بر پایه تغییرات جذب ناشی از تماس مستقیم با اکسیژن عمل می‌کنند. در حالی که سنسورهای نوری - شیمیایی برای بررسی کیفیت محصولات با سنجش ترکیبات گازی مانند سولفید هیدروژن، دی‌اکسیدکربن و آمین‌های فرار استفاده می‌شوند.

حسگر اکسیژن

برای محدود کردن میزان اکسیژن در اطراف مواد غذایی، محصول باید در شرایط خلأ یا با گاز نیتروژن همراه با استفاده از حسگرهای برگشت‌ناپذیر اکسیژن بسته‌بندی شود. حسگرهای برگشت‌ناپذیر در برابر مقادیر مشخصی از ماده واکنش‌دهنده به صورت دائمی تغییر رنگ می‌دهند و هرگز به حالت اول خود بر نمی‌گردند. در خصوص بسته‌های با اتمسفر اصلاح‌شده، غلظت اکسیژن در فضای خالی بسته باید تا حدی کاهش یابد که منجر به آغاز واکنش‌های تخمیری، خصوصاً در میوه‌ها و سبزی‌ها، نشود یا اینکه به‌طور کامل مطابق با نیاز پاره‌ای از محصولات غذایی حذف‌شود. از نانوذرات اکسید تیتانیم می‌توان برای حساس شدن به نور در فرآیند احیای متیلن بلو به‌عنوان حسگر رنگ‌سنجی

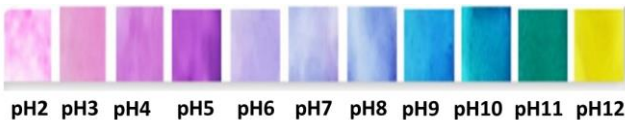
استفاده کرد. تابش پرتو فرابنفش به بی‌رنگ شدن حسگر می‌انجامد و تا زمانی که در معرض اکسیژن قرار نگیرد بی‌رنگ می‌ماند (شارما و همکاران، ۲۰۱۷). سرعت تغییر رنگ با میزان اکسیژن موجود مرتبط است. می‌توان حسگر غشایی اکسیژن فعال شونده با پرتو فرابنفش را از طریق روش الکتروریسی تولید کرد.

حسگر دی‌اکسید کربن

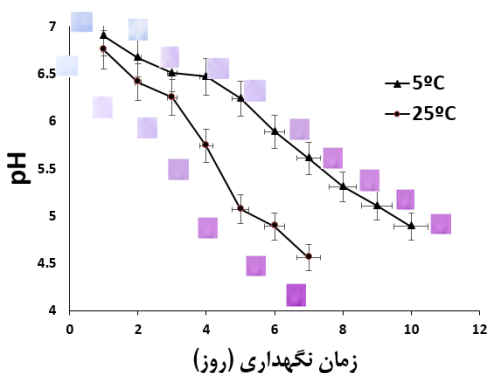
برای پایش تازگی یا کیفیت غذاهای بسته‌بندی شده در دوره نگهداری می‌توان از حسگرهای دی‌اکسید کربن استفاده کرد. حسگرهای دارای رنگ حساس به pH می‌توانند به این منظور به کار روند (شارما و همکاران، ۲۰۱۷). مفتون آزاد و راماسوامی^۱ (۲۰۱۹ ب) از نانوفیبرهای الکتروریسی شده پلی‌وینیل الکل به همراه عصاره گیاه کلم قرمز، *Brassica oleracea*، برای طراحی یک زیست-حسگر حساس به pH استفاده کردند. ویژگی‌های شیمیایی و ریزساختار این زیست‌حسگر مطالعه و حساسیت آن به محلول‌های با pH متفاوت با استفاده از یک رنگ‌سنج ارزیابی گردید. نتایج تحقیق نشان داد که این زیست‌حسگر قادر است تغییرات pH را در دامنه ۲-۱۲ و با استفاده از چشم غیرمسلح نشان دهد. تغییرات pH در حین نگهداری میوه

1 Ramaswamy

رطب در دو دمای ۵ و ۲۵ درجه سلسیوس با استفاده از این زیست حسگر با موفقیت تشخیص داده شد (شکل‌های ۳۸ و ۳۹). از دیگر ویژگی‌های این زیست‌حسگر می‌توان به برگشت‌پذیری و نیز قابلیت بازیافت آن اشاره کرد. این زیست‌حسگر با استفاده از پلیمرهای زیست‌تخریب‌پذیر طراحی شده است و از این رو به راحتی قابل تجزیه شدن است و از نظر آلودگی‌های زیست‌محیطی نیز مشکلی ایجاد نمی‌کند. این زیست‌حسگر به خوبی می‌تواند تغییرات کیفی محصول را با استفاده از چشم غیر مسلح نشان دهد. از این زیست‌حسگر می‌توان برای تشخیص فساد در دیگر محصولات غذایی استفاده کرد.



شکل ۳۸- تغییرات رنگ زیست‌حسگر الکتروریسی شده بر پایه پلی‌وینیل الکل در pH های متفاوت (مفتون آزاد و راماسوامی، ۲۰۱۹ ب)



شکل ۳۹- پایش تغییرات pH و فساد در رطب با استفاده از زیست‌حسگر الکتروریسی شده بر پایه پلی‌وینیل الکل (مفتون آزاد و راماسوامی، ۲۰۱۹ ب)

حسگرهای میکروبی

در تشخیص آلودگی به میکروارگانیسم‌ها و عوامل بیماری‌زا، حسگرهای میکروبی کاربردهای فراوانی دارند. بیماری‌های ناشی از مواد غذایی حاصل از باکتری‌ها، قارچ‌ها یا ویروس‌ها همچنان یکی از نگرانی‌های بهداشت عمومی در سراسر جهان به‌شمار می‌رود. نیاز مبرم به ایجاد روش تشخیصی سریع، دقیق و کم‌هزینه وجود دارد. روش‌های تشخیصی که در حال حاضر دنبال می‌شوند، عمدتاً سنجش‌های ایمنی‌شناسی وابسته به برهمکنش انتخابی بین آنتی‌بادی و آنتی‌ژن هستند. در ایالات متحده تقریباً ۴۸ میلیون مورد بیماری ناشی از مصرف غذا در سال گزارش

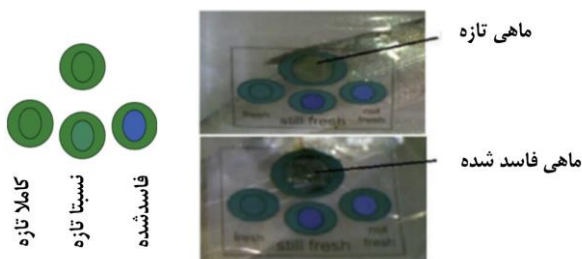
می‌شود. تخمین زده می‌شود کاهش در بروز عفونت ناشی از غذا حتی به میزان ۱ درصد به نفع حدود ۵۰۰۰۰۰ نفر خواهد بود. حسگرهای میکروبی حاوی نانوذرات، افزون بر داشتن ویژگی‌های نوری و الکتریکی منحصر به فرد، باید سطح فعالیت زیاد با عملکرد مناسب نیز داشته باشند. آنتی‌بادی‌های جفت‌شده به نانوموادى مانند نقاط کوانتومی^۱ (QD) عمدتاً برای شناسایی باکتری‌ها بررسی می‌شوند. نقاط کوانتومی نانوبلورهای نیمه‌هادی با یک هسته واکنش‌دهنده هستند که خواص نوری آنها را کنترل می‌کند و می‌توانند الکترون‌ها را منتقل کنند (شارما و همکاران، ۲۰۱۷).

حسگرهای تازگی

حسگرهای تازگی با هدف ارائه اطلاعات واقعی در مورد کیفیت محصول غذایی در هنگام نگهداری، حمل و نقل و عرضه استفاده می‌شوند. واکنش بین متابولیت‌های میکروبی و شاخص‌های تعریف‌شده یک سری اطلاعات بصری در مورد کیفیت میکروبی محصول ارائه می‌دهد. این شاخص‌ها به ترکیبات فساد یا متابولیت‌های میکروبی تولید شده در هنگام فساد محصول غذایی مانند سولفیدهای فرار و آمین‌ها حساس هستند.

1 Quantum dots

یک نمونه از حسگرهای تازگی، فیلم پلی‌آنیلین حساس به گروهی از آمین‌های فرار آزاد شده طی فساد ماهی است. چنین فرآیندی در تشخیص زمان واقعی فساد ماهی در دماهای مختلف بسیار کاربردی و مفید است (شکل ۴۰) (شارما و همکاران، ۲۰۱۷).



شکل ۴۰- کاربرد حسگر تازگی بر پایه فیلم پلی‌آنیلین در تشخیص فساد ماهی (برگرفته از کاسواندی، ۲۰۱۶)

حسگر تازگی باید نسبت به متابولیت‌های میکروبی سریعاً واکنش نشان دهد. تشکیل متابولیت‌های مختلف بستگی دارد به ماهیت فلور میکروبی فاسدکننده محصول بسته‌بندی شده و نوع بسته‌بندی. حسگرهای تعبیه شده در فیلم بسته‌بندی باید بتواند ارگانایسم‌های فاسد کننده مواد غذایی و شروع تغییر رنگ سریعاً برای هشدار به مصرف‌کننده در مورد تاریخ انقضا تشخیص دهد. شکل ۴۱ نمونه‌هایی از بسته‌های دارای حسگر تازگی برای تشخیص

کیفیت گوشت و میوه را نشان می‌دهد (شارما و همکاران، ۲۰۱۷).



شکل ۴۱- حسگرهای تازگی برای تشخیص کیفیت الف) گوشت و ب) میوه انبه

حسگرهای دما-زمان

دمای نگهداری مواد غذایی به‌هنگام حمل و نقل و توزیع یکی از عوامل محیطی اصلی مسئول کاهش ماندگاری مواد غذایی است. برای مقابله با تأثیرات نامطلوب مختلف دما، از حسگرهای دما-زمان برای نظارت بر تاریخچه حرارتی طی ذخیره سازی، جابه‌جایی و توزیع مواد غذایی استفاده می‌کنند. این حسگرها به تولیدکنندگان اجازه می‌دهند تا نگهداری مواد غذایی را در دمای مناسب بررسی کنند؛ به خرده‌فروشان

کمک می‌کنند تا از نگهداری مواد غذایی در دمای مناسب اطمینان حاصل کنند. مصرف‌کنندگان نیز می‌توانند با استفاده از این حسگرها از کیفیت محصول غذایی آگاه شوند که قصد خرید آن را دارند. این حسگرها همچنین به تولیدکنندگان در نظارت بر مواد غذایی در سراسر زنجیره عرضه کمک می‌کنند. نمونه‌ای از بسته‌بندی‌های مجهز به حسگر دما-زمان در شکل ۴۲ مشاهده می‌شود (شارما و همکاران، ۲۰۱۷).



شکل ۴۲- حسگر دما-زمان

فصل پنجم

خطرهای بالقوه و سلامت مواد بسته‌بندی

نانویی

مقدمه

در سال‌های اخیر فناوری نانو توسعه‌ی سریعی یافته‌است و در هر زمینه‌ای از جمله صنایع غذایی تأثیری چشمگیر داشته‌است، ولی به دلیل حفظ سلامت مصرف‌کنندگان، داشتن اطلاعات جامع در مورد رابطه بین نانوذرات و سلول‌ها و بافت‌های موجودات زنده و به‌ویژه آگاهی از خطرهای احتمالی آنها برای سلامت انسان الزامی است. در فرآیند تولید و توسعه هر گونه مواد بسته‌بندی جدید برای مواد غذایی، خواص مهاجرت اجزا باید بررسی شود تا احتمال مهاجرت هر جزء زیان‌آور یا نامطلوب از داخل بسته به درون غذا مشخص شود. طبق تعریف کمیسیون اروپا در سال ۲۰۱۱، آزمایش مهاجرت به معنای "تعیین انتشار مواد از ماده یا کالا به داخل غذا یا درون

سیستم غذایی شبیه‌سازی شده" است (سوزا^۱ و همکاران، ۲۰۱۶).

برخی اثرهای سمی نانوذرات موجود در بسته‌بندی مواد غذایی

در سال‌های اخیر در بارهٔ مهاجرت نانوذرات به درون محصولات غذایی تحقیقات متعددی شده است. بیشتر این تحقیقات در زمینهٔ مهاجرت نانو ذرات نقره بوده است (بومبادسانفاروک و کو^۲، ۲۰۱۵). نانو ذرات نقره ویژگی‌های مختلفی در مواد بسته بندی ایجاد می‌کنند اما به دلیل پتانسیل بالای ایجاد سمیت، کاربرد آن محدود شده است. نانو ذرات نقره می‌توانند باعث سمیت در سیستم عصبی و ژنتیکی شوند و می‌توانند در کبد، کلیه، و مغز رسوب کنند، اما مهاجرت نانوذرات نقره تا این سطح در غذا بسیار کم است. داده‌ها نشان می‌دهد که نانوذرات آبدوست با بار مثبت توان افزایش شدید گردش خون را دارند و تهدیدی برای اندام‌ها هستند، اما به مطالعات بیشتری در این زمینه نیاز خواهد بود.

1 Souza

2 Bumbudsanpharoke and Ko

مکانیسم عمل نانوذرات در سیستم‌های زیستی

نانوذرات ممکن است از طریق استنشاق، بلع یا قرار گرفتن در معرض پوست وارد بدن شوند. هنگامی که نانوذرات به محیط بیولوژیک نفوذ می‌کنند، به ناچار با تعداد زیادی از مولکول‌های زیستی (پروتئین‌ها، قندها و لیپیدها) که در مایعات بدن از جمله مایع بین سلول‌ها، لنف یا خون وجود دارند، در تماس خواهند بود. مطالعات روی نانوذرات تیتانیوم و نقره نشان می‌دهد این مواد ممکن است وارد گردش خون شوند و حل نشدن آنها منجر به تجمع آنها در اندام‌های بدن شود. کبد و طحال عمده‌تأ مسئول توزیع نانوذرات هستند (شارما و همکاران، ۲۰۱۷).

مسیرهای استنشاقی و قرار گرفتن در معرض پوست، در مقایسه با بلع به عنوان مسیری برای ورود نانوذرات، بیشتر بررسی شده است. نانوذرات اکسید منیزیم به‌صورت استنشاقی می‌توانند از طریق آکسون‌های عصب بویایی در بینی به قسمت بویایی زیر بخش جلو مغز راه پیدا کنند. به‌علاوه، استنشاق نانومواد و احتمال ورود آنها از راه نفوذ به پوست، به ویژه برای کارگران و مصرف‌کنندگانی که در تماس مستقیم و منظم هستند، بسیار نگران‌کننده است. داده‌های موجود نشان می‌دهد که نانوذرات آبدوست و دارای بار مثبت مانند نانونقره، نسبت به نمونه‌های خنثی یا آنیونی مانند نانوذرات لیپیدی یا نانوذرات طلا، سمی‌تر هستند زیرا

تمایل آن‌ها به غشای پلاسمایی سلول با بار منفی بیشتر است و منجر به آسیب لیزوزومی و سمیت سلولی القایی می‌شود (شارما و همکاران، ۲۰۱۷).

نانوذراتی که راه خود را به جریان خون می‌یابند، ممکن است بر پوشش رگ‌های خونی و عملکرد آن‌ها تأثیر بگذارند؛ راهیابی نانوذرات به جریان خون ممکن است به لخته شدن خون و حتی بروز بیماری‌های قلبی عروقی بینجامد. از این رو، به‌دست آوردن اطلاعات در مورد تأثیر نانوذرات بر عروق خونی و احتمال مهاجرت آن‌ها به جنین ضروری است. نانوذرات سیلیس ممکن است از طریق ایجاد استرس اکسیداتیو سمی منجر به آسیب‌دیدگی DNA و تحریک آپوپتوز^۱ (خزان یاخته‌ای) شوند. گزارش‌های علمی مختلف این فرضیه را در مدل‌های رده سلولی بافت پوششی^۲ روده تایید می‌کند.

نانوذرات آلی مانند پروتئین‌ها، لیپیدها، نشاسته و کیتوزان به‌طور طبیعی سمی نیستند زیرا به طور کامل در دستگاه گوارش انسان هضم می‌شوند و زیست پایدار نیستند (اشوق^۳ و همکاران، ۲۰۲۲). نانوذرات آلی ممکن است دسترسی به برخی ترکیبات را افزایش دهند و از این راه باعث بروز سمیت شوند. بنابراین، برای توسعه مواد بسته‌بندی نانویی حاوی نانوذرات معدنی یا آلی، مطالعات درون‌تنی^۴ و

1 Apoptosis
2 Epithelium

3 Ashfaq
4 in vivo

آزمایشگاهی^۱ برای تولید محصولات غذایی ایمن مورد نیاز خواهد بود.

اندازهٔ کوچک نانوذرات به آنها اجازه می‌دهد تا از سد سلولی عبور کنند و باعث تشکیل رادیکال‌های آزاد در بافت‌ها و در نهایت منجر به آسیب اکسیداتیو به سلول‌ها و بافت‌ها شوند. نانوذرات کوچک‌تر، نسبت به نانوذرات بزرگ‌تر، سمیت بیشتری نشان می‌دهند. مساحت سطح بالا در مقایسه با جرم کل نانوذرات کوچک‌تر، برهم‌کنش آن‌ها را با مولکول‌های بیولوژیکی افزایش می‌دهد و منجر به واکنش‌های نامطلوب می‌شود. گزارش شده‌است که استنشاق دوزهای بسیار بالا (۱۰ میلی گرم بر متر مکعب) نانو تیتانیم با بروز تومورهای ریه مرتبط است (شارما و همکاران، ۲۰۱۷). در چندین مطالعه آزمایشگاهی نیز مسمومیت سلولی ناشی از نانوذرات نقره از راه مکانیسم وابسته به استرس اکسیداتیو و همچنین از طریق اثرهای درون سلولی مستقل از استرس اکسیداتیو نشان داده شده است.

عوامل موثر بر مهاجرت نانوذرات به داخل مادهٔ غذایی

در زمینه تعیین سمیت احتمالی نانوذرات ادغام شده در بسته‌بندی مواد غذایی، مطالعات بسیار اندک است. مهاجرت منجر به انتقال مواد تشکیل‌دهنده با جرم مولکولی کم از مواد

1 in vitro

بسته‌بندی به محصول غذایی داخل بسته می‌شود. این انتقال ناخواسته و نامطلوب اجزای بسته‌بندی می‌تواند نگرانی‌های مصرف‌کنندگان را درباره ایمنی ماده غذایی افزایش دهد.

مهاجرت نانوذرات به ماتریس غذا عمدتاً به خواص شیمیایی و فیزیکی مواد غذایی و پلیمرهای درگیر بستگی دارد. از دیگر پارامترهای کنترل‌کننده مهاجرت نانوذرات به داخل مواد غذایی می‌توان به غلظت، وزن مولکولی و اندازه ذرات، انحلال‌پذیری و انتشار ماده در پلیمر، مقدار pH، دما، ساختار پلیمر، ویسکوزیته پلیمر، تنش مکانیکی، زمان تماس و ترکیب مواد غذایی اشاره کرد.

انحلال‌پذیری نانوذرات فلزی در محلول آبی نسبت مستقیم با دما و نسبت معکوس با pH دارد که در نهایت باعث افزایش مهاجرت فلز به ماتریس غذا می‌شود. علاوه بر مسیر ورود به بدن، میزان سمیت نانوذرات به غلظت ذرات و مدت در معرض قرارگرفتن، حساسیت میزبان و وضعیت ارگانیزم نیز بستگی دارد.

مهاجرت نانورس بستگی دارد به دما، مدت زمان تماس مستقیم با غذا و واکنش‌های نانورس و پلیمر. برخی از نانورس‌ها با قرار گرفتن طولانی مدت در معرض آن‌ها، اثرهای سمی برای سلول‌های بدن ایجاد می‌کنند (باندیوپادهیی و ری، ۲۰۱۹).

به‌هرحال، هنوز تعریف دقیقی از سمیت بسیاری از مواد نانویی ارائه نشده‌است و اطلاعات کافی در مورد سمیت نانوذرات و اثر خطرناک آنها هنوز در دسترس نیست. کمبود داده‌های آزمایشی بالینی و مطالعات ارزیابی خطر، کاربرد نانومواد در بخش بسته‌بندی مواد غذایی را محدود می‌کند. از این‌رو نگرانی‌های مربوط به مهاجرت نانوذرات به مواد غذایی بسته‌بندی شده همچنان مطرح است، ولی میزان خطر هنوز قطعی نشده‌است. با این حال، اگر نانوذرات به درستی در ماتریس پلیمری جاسازی شوند، شانس مهاجرت آنها زیاد نیست، اما برخی عوامل خارجی می‌توانند باعث مهاجرت آنها به داخل مواد غذایی شوند. بنابراین، مطالعه مهاجرت، میزان سمیت، حد مجاز و برهمکنش نانوذرات با پلیمر، پیش از ساخت هر نانوکامپوزیتی که در تماس مستقیم با مواد غذایی است، با اهمیت خواهد بود.

فصل ششم

جمع‌بندی و پیشنهادها

در سراسر دهه گذشته ساختارهای با اندازه‌های نانو توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند که عمدتاً به دلیل کاربردهای متعدد آنها در صنایع مختلف است. پیش‌بینی می‌شود در آینده نانوبیوتکنولوژی، نسبت به فناوری‌های مرسوم، کاربردهای بیشتری در صنایع غذایی داشته باشد.

فیلم‌های مخصوص بسته‌بندی مواد غذایی که از نظر فنی ارتقا یافته‌اند، در شرایط کنونی بسیار مورد توجه صنایع قرار گرفته‌اند. نانومواد مختلفی را می‌توان براساس TiO_2 و پوشش‌های نانویی برپایه پلیمرهای طبیعی ساخت که ویژگی‌های منحصر به فردی داشته باشند، مانند خود تمیزشوندگی و مقاومت در برابر رطوبت. ترکیب این فیلم‌ها با تجهیزات کنترل‌کننده pH، دما و سنجش تازگی محصول می‌تواند مشخصات

و ویژگی‌هایی افزون بر فیلم‌های معمولی بسته‌بندی داشته باشند. از نانومواد پیشرفته برای توسعه سیستم‌های احراز هویت مبتنی بر جوهر نانو استفاده می‌شود که می‌توانند جعل و تقلب را تشخیص دهند. با استفاده از گرما نانوحسگرهای کرومی سازگار با محیط زیست در سیستم بسته بندی، می‌توان ایمنی و امنیت مواد غذایی را پیش‌بینی کرد. برای افزایش ایمنی و یکپارچگی مواد غذایی، می‌توان حسگرهای بررسی‌کننده وضعیت تقلب روغن‌های پخت و پز، فساد گوشت، و آلودگی میکروبی محصولات نانوایی را در مواد بسته‌بندی تعبیه کرد. سیستم‌های مسدود کننده پرتوهای فرابنفش (UV)، و سیستم‌های مهارکننده اتیلن می‌توانند انقلاب و پیشرفت را در کشاورزی صنعتی به وجود آورند. به همین ترتیب، طراحی فیلم‌های مبتنی بر نانو مواد میکرو بکش و از بین برنده پاتوژن‌ها، پتانسیل تغییر شرایط فعلی صنعت بسته بندی مواد غذایی را دارند. با این حال، شکاف‌های مشخصی در تحقیقات وجود دارد که نیاز به تأمل و بررسی دارد. رفتار مهاجرت نانومواد و درک تعاملات بیولوژیکی آن‌ها نیاز به بررسی دقیق‌تری دارد. داده‌های غیرقطعی در مورد سمیت سلولی، ارزیابی ناکافی خطر

و مطالعات محدود مدیریتی، کاربرد نانومواد را در مقیاس تجاری در صنایع و فناوری‌های مرتبط با مواد غذایی محدود می‌کند. افزون بر این، پذیرش و تایید مصرف‌کننده از عوامل مهمی هستند که در توسعه فناوری نانو و راه‌اندازی بازار محصولات نانویی باید در نظر گرفته شوند. برای ایجاد محیطی سالم، نیاز به وضع قوانین و نهادهای معتبر است تا با وضع مقرراتی باعث تشویق مصرف‌کنندگان به استفاده از محصولات تهیه شده از فناوری نانو شود. بنابراین، برای حصول اطمینان از تجاری سازی نانومواد در صنعت بسته‌بندی مواد غذایی باید به کسب رضایت مصرف‌کنندگان، ایمنی و سلامت مواد غذایی در داخل بسته‌بندی نانویی و روش‌های ساخت پایدار این نوع بسته‌بندی‌ها توجه شود.

منابع

بدیعی، ف، مفتون آزاد، ن،، بهمدی، ه. ه. شریف‌نسب، ه.، حسین، گ. و کشاورز، ن. ۱۳۹۱. تولید فیلم های قابل نانو کامپوزیت نشاسته به منظور بسته بندی محصولات کشاورزی و بررسی خصوصیات آنها. مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی. شماره ۴۲۲۱۷. ۶۲ صفحه.

بدیعی، ف، هاشمی، م،، فرخی، ف. ۱۳۹۸. تهیه نانوالیاف از پروتئین آب‌پنیر با روش کاویتاسیون هیدرودینامیک و بررسی خواص عملکردی آن در فرمولاسیون غذایی. انتشارات سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، شماره ۵۶۲۹۶. ۱۱۶ صفحه.

بدیعی، ف،، مفتون آزاد، ن،، رفیعی، ز. و شریف نسب، ه. بررسی ویژگیهای فیلم نانوکامپوزیت نشاسته به منظور بسته بندی محصولات کشاورزی. بیست یکمین کنگره ملی علوم و صنایع غذایی ایران، دانشگاه شیراز، ایران. ۹-۷ آبان ۱۳۹۲.

بدیعی، ف، هاشمی، م، مفتون آزاد، ن، رفیعی، ز، کشاورز، ن. خیام‌نکویی، س. ۱۳۹۲. بررسی تاثیر یک نوع پوشش نانوامولسیون برپایه کیتوزان در افزایش ماندگاری سیب رقم گلاب کهنژ. انتشارات سازمان تحقیقات،

آموزش و ترویج کشاورزی، شماره ۴۴۰۰۸ . ۸۸
صفحه.

بدیعی، ف، هاشمی، م، شریف‌نسب، ه، احمدی، ک،، رفیعی،
ز. ۱۳۹۳. بررسی اثر بسته‌بندی با فیلم نانوکامپوزیت
پلی‌اتیلن-رس بر افزایش ماندگاری نان تست.
انتشارات سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج
کشاورزی، شماره ۴۶۵۳۴ . ۵۹ صفحه.

مفتون آزاد، ن، هاشمی، م، بدیعی، ف،، شاه امیریان، م. و
جوکار، ا. ۱۳۹۳ الف. بررسی تاثیر پوشش خوراکی
نانوآمولسیون بر پایه کیتوزان در افزایش ماندگاری ۲
رقم خرمای مرطوب (رطب) استان فارس (شاهانی و
کبکاب). انتشارات سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج
کشاورزی، شماره ۴۶۵۳۵ . ۹۶ صفحه.

مفتون آزاد، ن، هاشمی، م، بدیعی، ف،، شاه امیریان، م. و
جوکار، ا. ۱۳۹۳ ب. بررسی تاثیر پوشش خوراکی
نانوآمولسیون بر پایه کیتوزان در افزایش ماندگاری
انجیر سیاه استهبان. انتشارات سازمان تحقیقات،
آموزش و ترویج کشاورزی، شماره ۴۶۶۸۳ . ۸۵
صفحه.

هاشمی، م، بدیعی، ف،، محمدی، ع،، مفتون آزاد، ن. و
کشاورز، ن. ۱۳۹۴. بررسی تأثیر نوعی پوشش نانو
آمولسیون تهیه شده بر پایه کیتوزان در افزایش

ماندگاری و برخی ویژگی‌های کیفی میوه توت
فرنگی در طول انبارمانی. انتشارات سازمان تحقیقات،
آموزش و ترویج کشاورزی، شماره ۴۷۹۶۷. ۱۲۰
صفحه.

هاشمی، م.، بدیعی، ف.، مفتون‌آزاد، ن. ۱۳۹۸. تولید، بهینه-
سازی و بررسی ویژگی‌های فیلم پکتینی ضد میکروبی
تقویت شده با نانوسلولز و تاثیر آن بر ماندگاری گوشت
مرغ. انتشارات سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج
کشاورزی، شماره ۵۶۳۷۵. ۱۲۴ صفحه.

هاشمی، م.، بدیعی، ف.، مفتون‌آزاد، ن. و خیام‌نکویی، س.
۱۳۹۲ الف. بررسی تاثیر دو نوع پوشش نانو-
میکرومولسیون بر پایه کیتوزان در افزایش ماندگاری
پرتقال تامسون و خونی. انتشارات سازمان تحقیقات،
آموزش و ترویج کشاورزی، شماره ۴۲۷۷۶. ۶۴
صفحه.

هاشمی، م.، بدیعی، ف.، مفتون‌آزاد، ن. و خیام‌نکویی، س.
۱۳۹۲ ب. بررسی تاثیر دو نوع پوشش نانو-
میکرومولسیون بر پایه کیتوزان در افزایش ماندگاری
نارنگی محلی تنکابن. انتشارات سازمان تحقیقات،
آموزش و ترویج کشاورزی، شماره ۴۲۷۷۵. ۶۰
صفحه.

Alexander, M. and Dubois, P. 2000.
Polymer-layered silicate

- nanocomposites: preparation, properties and uses of a new class of materials. Materials Science and Engineering, 28, 1-63.
- Ashfag, A. Khursheed, N. Fatima, S. Anjum, Z. and Younis K. 2022. Application of nanotechnology in food packaging: Pros and Cons. Journal of Agriculture and Food Research, 7, 100270: 1-14.
- Bandyopadhyay, J. and Ray, S.S. 2019. Are nanoclay-containing polymer composites safe for food packaging applications—an overview. Applied Polymer Science. 136 (12):1-22.
- Bastarrachea, L. J. Wong, D. E. Roman, M. J. Lin, Z. and Goddard, J. M. 2015. Active packaging coatings. Coatings, 5, 771-791.
- Bumbudsanpharoke, N. and Ko, S. 2015. Nano-food packaging: an overview of market, migration research, and safety regulations, R910–R923. Journal of Food Science. 80 (5): 10-23.
- Cava, D. Glimenez, E. Gavara, R. and Lagaron, J.M. 2006. Comparative performance and barrier properties of bio degradable thermoplastics and

- nanobiocomposites versus PET for food packaging applications. *Journal of Plastic Film Sheeting*, 22, 312-320.
- Gaikwad, K. K., Singh, S., & Negi, Y. S. 2020. Ethylene scavengers for active packaging of fresh food produce. *Environmental Chemistry Letters*, 18, 269-284.
- Gupta, O., and Roy, S. 2020. Recent progress in the development of nanocomposite membranes. *Nanocomposite Membranes for water and Gas Separation*, 29-67.
- Jarvis, M., Krishnan, V., and Mitragotri, S. 2019. Nanocrystals: A perspective on translational research and clinical studies. *Bioengineering & translational medicine*, 4(1), 5-16.
- Kuswandi, B. 2016. Nanotechnology in food packaging. *Nanoscience in food and agriculture* 1, 151-183.
- Maftoonazad, N. and Ramaswamy, H. 2018. Novel techniques in food processing: bionanocomposites. *Current Opinion in Food Science*, 23, 49-56.

- Maftoonazad, N. Shahamirian, M. John, D. and Ramaswamy, H. 2019a. Development and evaluation of antibacterial electrospun pea protein isolate-polyvinyl alcohol nanocomposite mats incorporated with cinnamaldehyde. *Materials Science and Engineering, C*, 94, 393-402.
- Maftoonazad, N. and Ramaswamy, H. 2019b. Design and testing of an electrospun nanofiber mat as a pH biosensor and monitor the pH associated quality in fresh date fruit (Rutab). *Polymer Testing*, 75, 76-84.
- Maftoonazad, N. Badii, F. Mohamed, A. Ramaswamy, H. 2020. Evaluation of physico-chemical, thermo-mechanical and structural properties of chickpea flour composite films reinforced with crystalline nano-cellulose. *Journal of Applied Polymer Science*, 137, 48389.
- Naseer, B. Srivastava, G. Qadri, O.S. Faridi, S.A. Islam, R.U. Younis, K. 2018. Importance and health hazards of nanoparticles used in the food industry, *Dec, Nanotechnol. Rev.* 7 (6): 623–641.
- Panwar, K., Jassal, M., & Agrawal, A. K. 2015. In situ synthesis of Ag–SiO₂

- Janus particles with epoxy functionality for textile application. *Paticuology*, 19, 107-112.
- Park, H. M. Lee, W. K. Park, C. Y. Cho, W. J. and Ha, C. S. 2003. Environmentally friendly polymer hybrids: part I mechanical, thermal, and barrier properties of the thermoplastic. starch/clay nanocomposites. *Journal of Material Science*, 38, 909-915.
- Peidaei, F., Ahari, H., Anvar, A., & Ataei, M. 2021. Nanotechnology in Food Packaging and Storage: A Review. *Iranian Journal of Veterinary Medicine*, 15(2).
- Sharma, V.K. Sharma, M. Usmani, Z. Pandey, A. Singh, B.N. Tabatabaei, M. and Gupta, V.K. 2022. Tailored enzymes as next-generation food-packaging tools. *Trends in Biotechnology*, 40 (8): 1004-1017.
- Sharma, C. Dhiman, R. Rokana, N. and Panwar, H. 2017. Nanotechnology: an untapped resource for food packaging. *Frontiers in microbiology*, 8, 1735.
- Silvestre, C. Duraccio, D. and Cimmino, S. 2011. Food packaging based on

- polymer nanomaterials. Progress in Polymer Science, 36(12), 1629-1782.
- Souza, V.G.L. and Fernando, A.L. 2016. Nanoparticles in food packaging: Biodegradability and potential migration to food-A review. Food Packagaging and Shelf Life, 8, 63–70.
- Yadav, J., Jasrotia, P., Kashyap, P. L., Bhardwaj, A. K., Kumar, S., Singh, M., & Singh, G. P. 2021. Nanopesticides: Current status and scope for their application in agriculture. Plant Protection Science, 58(1), 1-17.
- Weiss, J. Takhistov, P. and McClements, D. J. 2006. Functional materials in food nanotechnology. Journal of Food Science, 71, 107-16.