تحقیقات مهندسی صنایع غذایی/جلد ۲۶ / شماره ۷۸/ بهار و تابستان/۱۴۰۴/ ص ۹۲- ۷۳
سایت مجله: https://fooder.areeo.ac.ir

نوع مقاله: مروری

مطالعه مروری بر خاصیت فلورسانس و فتوکاتالیک و نانوذرات جاذب مغناطیسی در فیلم‌های خوراکی جهت بسته‌بندی مواد غذایی

ایرج کریمی ثانی*[۱]، نادره تبریزی[۲]، بهرام حسنی[۳]، انیس طالبی[۴]، شهین زمردی[۵]، فرید امیرشقاقی[۶]

[۱*و۲و۵و۶]بخش تحقیقات فنی و مهندسی مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی آذربایجان غربی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، ارومیه، ایران

[۳]دانش آموخته دکتری، گروه صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

[۴]دانشجو دکتری، گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران.

تاریخ ارسال: ۱۴۰۳/۰۷/۰۴ **تاریخ پذیرش:** ۱۴۰۴/۰۱/۳۰

چکیده

در تحقیقات مواد غذایی، بسته‌بندی اهمیت بسیاری دارد زیرا از مواد غذایی محافظت و نگهداری می‌کند. استفاده از پلیمرهای نفتی سنتی به عنوان بسته‌بندی اصلی رایج بوده است، اما مصرف‌کنندگان نیز امروزه نگران تأثیرات زیست‌محیطی و سلامتی این پلیمرها هستند. بنابراین، نیاز به جایگزین‌هایی با ویژگی‌های زیست تخریب‌پذیر و تجدیدپذیر احساس می‌شود. فیلم‌های خوراکی با استفاده از ماکرومولکول‌های طبیعی به عنوان جایگزین برای پلیمرهای مصنوعی مطرح شده‌اند. از طرفی نانوذرات مغناطیسی به دلیل خواص فوق‌پارامغناطیس، سطح بزرگ، زیست‌سازگاری، غیرسمی، امکان استفاده مجدد، مورد توجه قرار گرفته‌اند. همچنین، ترکیبات فتوکاتالیست انرژی خورشیدی را برای استفاده در فعالیت‌های اکسیداسیون در صنعت‌های مختلفی همچون تصفیه آب و هوا، تولید هیدروژن، تغییر می‌دهند؛ بطوریکه تولید فیلم‌های خوراکی با خواص فتوکاتالیستی و فلورسانسی می‌تواند مزایایی همچون افزایش ظرفیت آنتی‌اکسیدانی، افزایش خاصیت ضدمیکروبی و بهبود ماندگاری محصول غذایی داشته باشد. در نهایت، استفاده از فناوری نانو در این فیلم‌های خوراکی موجب تقویت خواص فیزیکی و شیمیایی، بهبود ماندگاری مواد غذایی، و افزایش کارایی بسته‌بندی می‌شود؛ لذا این پژوهش به بررسی این فیلم‌های خوراکی حاوی نانوذرات مغناطیسی با خواص فلورسانسی و فتوکاتالیستی برای بسته‌بندی مواد غذایی می‌پردازد.

واژه‌های کلیدی: فلورسانس، فتوکاتالیست، نانوذرات مغناطیسی، فیلم خوراکی، بسته‌بندی

مقدمه

بسته‌بندی‌های خوراکی و زیست تخریب‌پذیر جایگزین مناسبی برای بسته‌بندی‌های بر پایه سوخت های فسیلی می‌باشند (Foroumandi *et al.*, 2018)؛ به‌طوری‌که امروزه کاربرد پلیمرهای طبیعی مانند پلی‌ساکاریدها (سلولوز، کیتوزان، نشاسته، دکسترین)، پـروتئین‌ها (گلوتن گندم، آب پنیر، ذرت و سویا) و لیپیدها (اسید چرب و واکس) در تولید بسته‌بندی‌های خوراکی و سازگار با محیط زیست جهت بسته‌بندی محصولات غذایی بسیار مورد توجه قرار گرفته است (Jorge *et al.*, 2023; Sani et al., 2021). پوشش و فیلم‌های خوراکی از مزایای گوناگونی از جنبه‌های سلامت بخشی، اقتصادی و حسی برخوردارند (Hassani *et al.*,

نویسنده مسئول: **Email:** eng.irajkarimi@gmail.com
http://doi: 10.22092/FOODER.2025.367139.1405
© 2023,The Author(s). Published by Agricultural Engineering Research Institute. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

2023). از جمله این مزایا می‌توان به دارا بودن ارزش تغذیه‌ای، افزایش مدت ماندگاری محصول، عدم آلودگی محیط زیست به دلیل زیست تخریب پذیر بودن، ممانعت از قهوه‌ای شدن آنزیمی و غیر آنزیمی مواد غذایی در حین انبارداری و افزایش استحکام و یکپارچگی بافت ماده غذایی اشاره کرد (Khodaei *et al*., 2023)؛ لذا به واسطه دارا بودن مزایای عنوان شده این فیلم‌ها جایگزین مناسب با فیلم‌های سنتزی می‌باشند (Pilevar *et al*., 2019; Ribeiro *et al*., 2021). از طرفی بیشتر غذاها به دلیل خراب شدن یا فساد در حین نگهداری یا توزیع پس از فرآوری ارزش خود را از دست می‌دهند. راهبردی که برای رفع این مشکل استفاده می‌شود، افزودن مواد افزودنی به خود غذا است، اما با آگاهی مصرف‌کنندگان از اثرات مضر نگهدارنده‌های شیمیایی در غذا، این امر محبوبیت خود را از دست داده است (Wang *et al*., 2022). یک رویکرد جایگزین که در سال‌های اخیر به طور فزاینده‌ای محبوب شده است، استفاده از بسته‌بندی فعال و هوشمند است که شامل افزودن عمدی مواد فعال مانند ترکیبات ضد میکروبی و آنتی‌اکسیدان‌ها به مواد بسته‌بندی است (Sani *et al*., 2019; Soleimani-Rambod et al., 2018) که با مواد غذایی بسته‌بندی شده یا با فضای اصلی محصول تعامل دارند. در بین ترکیبات افزوده شده نانومواد مانند نانورس، نانو فلزات و نانو اکسیدهای فلزی از جمله مواد افزودنی فعال تجاری هستند؛(Ezati and Rhim, 2022)؛ بطوریکه استفاده از فناوری نانو سبب تقویت استحکام مکانیکی فیلم‌های خوراکی، بهبود خواص فیزیکی و شیمیایی، پوشاننده طعم‌های نامطبوع، جلوگیری از تخریب شیمیایی (Zomorodi and Aberun, 2015)، افزایش حلالیت، بهبود رفتار نوری و ... گردیده است (Amiri *et al*., 2022; Foghara *et al*., 2020)؛ و از طرفی در طی سال‌های اخیر به دلیل اینکه برخی از نانوذرات دارای خواص فوق پارامغناطیس، سطح ویژه بزرگ، زیست سازگاری بالا، غیرسمی بودن، تولید در مقیاس بزرگ و قابلیت بازیافت می‌باشند؛ لذا توجه محققان و دانشمندان را به خود جلب کرده‌اند (Rezaei *et al*., 2020; Yu et al., 2024). فیلم‌ها و پوشش‌های فتوکاتالیستی می‌توانند بی‌حرکتی فتوکاتالیست‌های اندازه نانو را محقق کنند و به عنوان یک استراتژی کارآمد برای حل این مشکلات ظاهر شده‌اند (Garlisi *et al*., 2020). سیستم پوشش فتوکاتالیستی به‌دست‌آمده، مراحل فیلتر کردن و بازیابی کاتالیزور را پس از استفاده حذف می‌کند (Arjeh *et al*., 2022)، که به پوشش اجازه می‌دهد مستقیماً مجدداً استفاده شود و به طور مداوم برای مدت طولانی بدون از دست دادن و غیرفعال شدن مقدار زیادی کاتالیزور اجرا شود (Liu and Choi, 2021; Tian *et al*., 2023). همچنین مهمترین ویژگی نوری نانوذرات مغناطیسی، نشر فلورسانس می‌باشد؛ که مکانیسم‌های اثر اندازه کوانتومی، نقص حالات سطحی و حالات مولکولی پدیده نشر فلورسانس را توجیه می‌کنند. اثر اندازه کوانتومی به تأثیر اندازه بر روی ترکیب تابشی جفت الکترون- حفره اشاره می‌کند (Zhao *et al*., 2020). در نهایت تولید فیلم‌های خوراکی با خواص فتوکاتالیستی و فلورسانسی می‌تواند یک گام اساسی و مفید در این صنعت باشد (Pirsa *et al*., 2023; Pirsa *et al*., 2022)؛ زیرا بدین طریق مزایایی همچون ظرفیت آنتی‌اکسیدانی، خاصیت ضدمیکروبی و ماندگاری محصول غذایی بهبود می‌یابد. بنابراین هدف از مقاله مروری بررسی فیلم‌ها و پوشش‌های خوراکی حاوی نانومواد با خاصیت فلورسانسی و فتوکاتالیستی جهت بسته‌بندی مواد غذایی می‌باشد.

پلیمرهای زیست تخریب پذیر

امروزه بیوپلیمرهای زیست‌تخریب‌پذیر به‌منظور کاهش آلودگی‌های زیست محیطی ناشی از پلاستیک‌های با منشاء نفتی و مشتقات نفتی بسیار مورد توجه محققان قرار گرفتند. براساس استاندارد بین‌المللی و استاندارد اروپا، زیست تخریب‌پذیر بودن به‌معنای توانایی تجزیه شدن یک ترکیب به ترکیباتی مانند دی اکسید کربن، متان، آب، ترکیبات

معدنی و زیست توده می‌باشد؛ به‌طوری‌که حداقل یکی از مراحل تجزیه آن‌ها از طریق متابولیسم طبیعی موجودات زنده انجام شده و معمولاً در شرایط مطلوب نظیر رطوبت، دما و اکسیژن، تجزیه بیولوژیکی آن‌ها موجب تکه تکه شدن، تخریب و تولید محصولات جانبی آلی بی ضرر، می‌شود به همین علت به آن‌ها پلاستیک‌های زیست تخریب‌پذیر نیز می‌گویند (Omerović *et al.*, 2021).

فیلم و پوشش خوراکی در بسته‌بندی مواد غذایی

بسته‌بندی‌های خوراکی را می‌توان به عنوان مواد اولیه بسته‌بندی که از پلیمرهای زیستی ساخته شده است توصیف کرد؛ به‌طوری‌که یک لایه از ماده خوراکی را می‌توان مستقیماً بر روی مواد غذایی اعمال کرد یا به یک ساختار مستقل شکل داد تا به عنوان بسته‌بندی مواد غذایی عمل کند (Khalid and Arif, 2022; Khodaei *et al.*, 2023). بسته‌بندی‌های خوراکی را می‌توان به دو طبقه‌بندی اصلی تقسیم‌بندی کرد: پوشش‌ها و فیلم‌ها. تمایز این دو دسته براساس روش‌های کاربرد آنها در محصولات غذایی است. پوشش‌ها به شکل مایع استفاده می‌شوند و روی محصول غذایی اعمال می‌شوند، در حالی که فیلم‌ها به عنوان موجودیت‌های جداگانه ایجاد می‌شوند و متعاقباً اعمال می‌شوند (Hamed *et al.*, 2022). علاوه بر این، برخی از محققان فیلم‌های خوراکی را براساس ضخامت آنها متمایز می‌کنند. فیلم‌ها به عنوان لایه‌های مستقل با ترکیب نازک (۰/۰۵-۰/۲۵۰ میلی‌متر) توصیف می‌شوند، در حالی‌که آن‌هایی با ضخامت بیشتر (بیش از ۰/۲۵۰میلی‌متر) به عنوان ورق نامیده می‌شوند (Janowicz, Galus, *et al.*, 2023; Sani, Aminoleslami, *et al.*, 2023). اولین اشاره به استفاده از پوشش‌های خوراکی روی مرکبات در چین به قرن دوازدهم می‌رسد. با این وجود، مفهوم استفاده از فیلم‌ها و پوشش‌های خوراکی روی محصولات غذایی در دهه ۱۹۵۰ مورد توجه دانشمندان قرار گرفت (Sani *et al.*, 2021)؛ که به این دلیل می‌باشد که در دهه‌های اخیر، بشر با مسائلی همچون مشکلات زیست‌محیطی مواجه بوده است که به عنوان نیرو محرکه بسیاری از تحقیقات علمی تبدیل شده‌اند. از طرفی افزایش آگاهی مصرف کنندگان از مواد غذایی و تأثیرات محیطی بر سلامت آنها، دانشمندان و شرکت‌ها را مجبور کرده است تا راه‌های مختلفی را برای تولید غذاهای طبیعی با ترکیب فواید زیست محیطی و پایداری کشف کنند (Chaichi *et al.*, 2017). استفاده از پوشش‌ها، فیلم‌ها و ورق‌های خوراکی برای محصولات غذایی مزایای زیادی دارد؛ به‌طوری‌که به عنوان موانع رطوبت، گاز و املاح مورد استفاده قرار می‌گیرند که عمر مفید محصولات غذایی مختلف را افزایش می‌دهد (Foghara *et al.*, 2020)؛ همچنین می‌توانند به عنوان حامل برای افزودنی‌های غذایی از جمله عطرها، رنگ‌ها، طعم‌دهنده‌ها، ادویه‌ها و مواد مغذی، عوامل ضد میکروبی، ترکیبات آنتی‌اکسیدان و عوامل ضدقهوه‌ای عمل کنند، که این امرمنجربه افزایش کیفیت کلی محصولات غذایی بسته‌بندی شده می‌گردد (Garg *et al.*, 2022; Janowicz, Kadzińska, *et al.*, 2023; Sani, Masoudpour-Behabadi, *et al.*, 2023).

بیوپلیمرهای مورد استفاده در فیلم‌ها و پوشش‌های خوراکی

طیف وسیعی از مواد بسته‌بندی به دست آمده از منابع پایان ناپذیر در چند سال اخیر توسعه یافته است. بسیاری از محصولات جانبی گیاهی و حیوانی دارای پلی ساکاریدها و پروتئین‌های بالایی هستند که می‌توان از آنها برای ساخت پوشش‌های خوراکی یا زیست‌تخریب‌پذیر و ترکیبات فیلم استفاده کرد. فرصت‌های تجاری برای مواد جایگزین و جدید ساخته شده از مواد غذایی کم استفاده، منابع تجدیدپذیر، و ارزش‌گذاری زباله‌ای کشاورزی و صنعتی و دریایی وجود دارد. در یک اقتصاد دایره‌ای، استفاده از این منابع به محصولات زائد ارزش می‌افزاید و جایگزینی فریبنده برای منابع تجدیدناپذیر فراهم می‌کند (Gupta *et al.*, 2022). علاوه بر این، اکثریت قریب به اتفاق نه تنها زیست

تخریب‌پذیر هستند، بلکه خوراکی نیز هستند. این محصولات فرعی می‌توانند از مواد غذایی کم استفاده، منابع تجدیدپذیر و ارزش‌گذاری پسماندهای کشاورزی و صنعتی و دریایی و سایر منابع به دست آیند. پوسته، پر، پوسته، پوست، دانه، پوست، ساقه و برگ نمونه‌هایی از محصولات جانبی با پتانسیل ارزش قابل توجهی هستند (Chiralt *et al.*, 2020). از آنجایی که طبیعت این پلیمرها آبدوست هستند، یعنی آب را به راحتی جذب می‌کنند، بنابراین در مقایسه با مواد پلاستیکی، موانع بخار آب و خواص مکانیکی ضعیفی از خود نشان می‌دهند. به همین دلیل است که تحقیقات کنونی عمدتاً بر بهبود این خواص پلیمرها با ترکیب عوامل تقویت‌کننده مانند نانو ذرات، ترکیبات عملکردی زیست فعال و غیره متمرکز شده است تا آنها را مانند مواد پلاستیکی در برابر آب مقاوم‌تر کند و نیازهای مواد بسته‌بندی مواد غذایی عملکردی را برآورده کند (Cano *et al.*, 2017).

بیوپلیمرهای مورد استفاده در فیلم و پوشش به چهار دسته پروتئین‌ها، پلی‌ساکاریدها، لیپیدها و پلی‌استرها تقسیم می‌شوند که شامل موارد زیر می‌باشند:

الف) پروتئین‌ها مانند زئین ذرت، گلوتنین و گلیادین گندم، پروتین سویا، ژلاتین، کازئین شیر، پروتئین‌های آب پنیر شیر، پروتئین‌های تخم‌مرغ

ب) کربوهیدرات‌ها مانند سلولز و مشتقات سلولز (متیل سلولز، کربوکسی متیل سلولز، هیدروکسی پروپیل سلولز)، نشاسته و مشتقات آن، ترکیبات پکتیکی، کیتین و کیتوزان، صمغ‌هایی مانند آلژینات، کاراگینان، پولولان، لوان، گزانتان، خرنوب و گوار

ج) لیپیدها مانند چربی‌ها و روغن‌های گیاهی و حیوانی، موم‌ها مثل موم زنبور عسل، مشتقات گلیسیریدی مثل گلیسرول منواستئارات و سورفاکتانت‌ها (امولسیفایر).

د) پلی‌استرها مانند پلی‌هیدروکسی بوتیرات، پلی‌هیدروکسی والرات، پلی‌لاکتیک اسید، پلی‌گلیکولیک اسید. البته این دسته بیشتر حالت زیست تخریب‌پذیر غیرخوراکی دارد (Galus *et al.*, 2020).

کاربرد و مزایای فیلم‌ها و پوشش‌های خوراکی

فیلم‌ها و پوشش‌های خوراکی عمدتاً به منظور حذف بسته‌بندی غیرخوراکی استفاده نمی‌شوند بلکه به همراه بسته‌بندی‌های مرسوم به بهبود کیفیت و ماندگاری کمک می‌کنند، تعداد لایه‌های بسته‌بندی را کاهش می‌دهند و بعد از اینکه بسته باز شد حفاظت از غذا را ادامه می‌دهند (Espitia *et al.*, 2016; Salgado *et al.*, 2015).

از مهمترین کاربردهای فیلم و پوشش می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

۱) به تأخیر انداختن تبادل رطوبت بین ماده غذایی و محیط که منجربه جلوگیری از کاهش کیفیت بافتی مواد غذایی می‌گردد.

۲) به تأخیر انداختن جذب و مهاجرت چربی‌ها

۳) حامل ترکیبات ضدمیکروبی، مواد طعم زا، مواد رنگی، آنزیم، آنتی‌اکسیدان و ...

۴) جلوگیری از مهاجرت آروما، مواد طعمی و رنگی ماده غذایی به محیط و بین اجزا مواد غذایی

۵) جلوگیری از نفوذ میکروارگانیسم به ماده غذایی

۶) افزایش ارزش غذایی محصول

۷) استفاده برای میکروانکپسولاسیون افزودنی‌های غذایی

۸) حفاظت محصول در برابر صدمات مکانیکی

۹) کاهش مقدار ماده بسته‌بندی و پیچیدگی آن

۱۰) کاهش تبادل گازهای تنفسی (CO_2 و O_2) بین محیط و ماده غذایی

۱۱) ممانعت از قهوه‌ای شدن و فعالیت پلی فنول اکسیداز

معایب فیلم‌ها و پوشش‌های خوراکی

استفاده از فیلم‌ها و پوشش‌های خوراکی به عنوان ماده بسته‌بندی در کنار مزایای عنوان شده دارای معایب و محدودیت‌هایی است نظیر شکنندگی، ناپایداری گرمایی، مقاومت ذوب کم، قابلیت دوخت گرمایی دشوار، تراوایی زیاد

به بخار آب و اکسیژن، به دلیل ماهیت آبدوست برخی بیوپلیمرها به خاصیت سدکنندگی ضعیف در برابر بخار آب، محدود شدن پایداری بلند مدت، تضعیف خواص مکانیکی، فرآیندپذیری ضعیف، تردی و آسیب‌پذیر بودن در برابر تجزیه نیز می‌توان اشاره کرد (Jafarzadeh *et al*., 2021).

فیلم خوراکی فعال و هوشمند

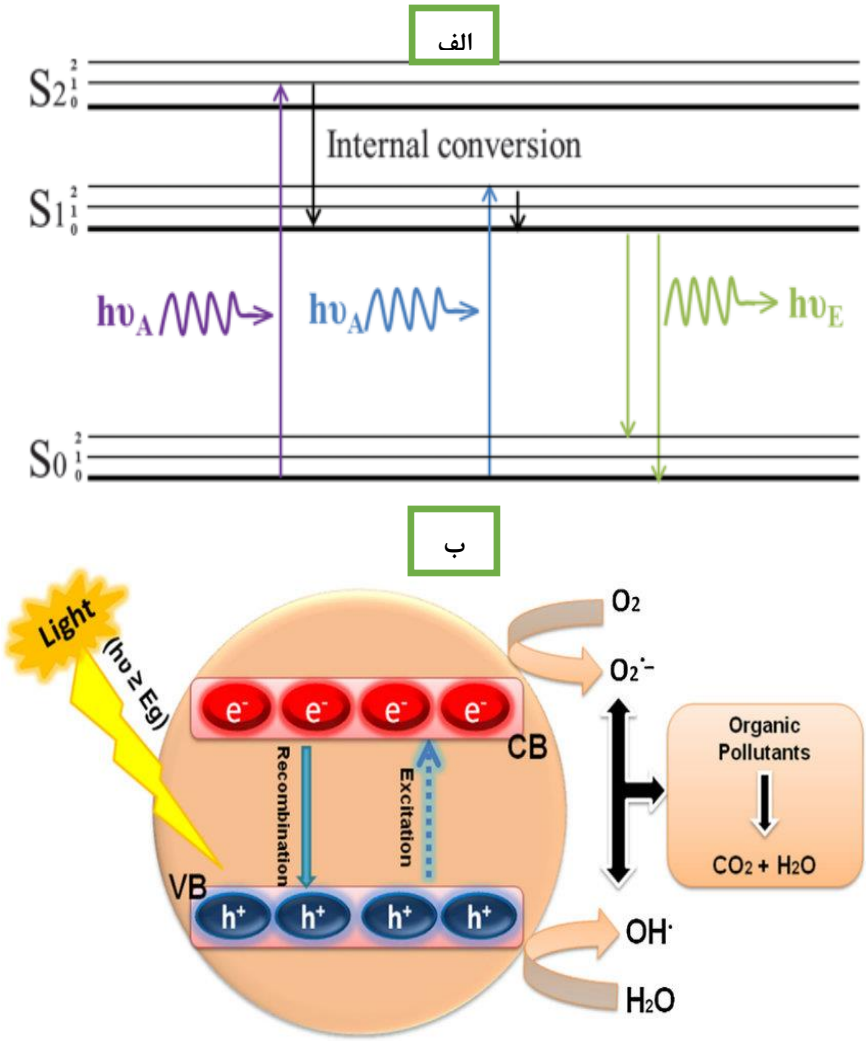
بسته‌بندی مواد غذایی سه عملکرد اساسی را انجام می‌دهد: مهار، حفظ کیفیت و محافظت در برابر عوامل محیطی، فیزیکی و میکروبیولوژیکی. در زمان‌های اخیر، با تغییر ترجیحات و انتظارات مصرف‌کننده، نقش بسته‌بندی فراتر از عملکرد اصلی آن افزایش یافته است (Bhargava *et al*., 2020; karimi sani and Alizadeh, 2022). در حال حاضر، بسته‌بندی مواد غذایی به افزایش عمر مفید کمک می‌کند و به عنوان شاخص کیفیت محصولات غذایی بسته-بندی شده عمل می‌کند. همچنین تمرکز بر توسعه سیستم‌های بسته‌بندی افزایش یافته و به عنوان بسته‌بندی فعال و هوشمند طبقه‌بندی شده‌اند (Ahmadi Gheshlagh *et al*., 2019). در بسته‌بندی فعال، مواد افزوده شده عمدی (جاذب یا ساطع کننده‌ها) با محیط داخلی بسته در تعامل هستند تا ماندگاری غذا را افزایش دهند (Hassani *et al*., 2023; Yong and Liu, 2020). در طی سال‌های اخیر، رایج‌ترین فناوری‌های بسته‌بندی‌های فعال در صنایع غذایی آن‌هایی هستند که به‌طور خاص برای حذف اکسیژن از بسته‌بندی طراحی شده‌اند. هدف اولیه بسته‌بندی‌های فعال، در مقایسه با سایر تکنیک‌های بسته‌بندی مواد غذایی، تقویت ایمنی مواد غذایی است. همچنین عوامل دیگری همچون تغییرات در نور، رطوبت (به دست آوردن یا از دست دادن)، واکنش‌های غیراکسیداتیو، رشد میکروبی و فعالیت آنزیمی می‌توانند به طور مستقل یا تجمعی در تجزیه محصولات غذایی نقش داشته باشند؛ که نوآوری و القای مواد فعال جدید، می‌توانند منجربه پایداری بیشتر و بهبود خواص فیزیکی و شیمیایی نمونه بسته‌بندی شده با فیلم خوراکی فعال باشند (Farajinejad *et al*., 2023). از طرفی در بسته‌بندی هوشمند، مواد افزوده شده عمدی با محیط بسته‌بندی تعامل دارند و بر وضعیت (زمان نگهداری، دما، ماندگاری و غیره) محصولات غذایی بسته‌بندی شده نظارت می‌کنند؛ این نوع بسته‌بندی‌ها می‌توانند در مورد فساد یا هر مشکل احتمالی در مواد غذایی بسته‌بندی شده، که به عنوان «بسته‌بندی هوشمند» و «بسته‌بندی هوشمندانه» نامیده می‌شود، هشداری را شناسایی و ارائه دهند (de Oliveira Filho *et al*., 2021; Eghbaljoo *et al*., 2023; Zhai *et al*., 2017). این سیستم‌ها به عنوان شاخص‌های کیفیت برای تضمین ایمنی مواد غذایی عمل می‌کنند و به طور کلی به عنوان شاخص‌های مستقیم (رطوبت، دما-زمان، تازگی و آسیب، و حسگر زیستی) و غیرفعال (قابلیت ردیابی و ردیابی) طبقه بندی می‌شوند. تغییرات در اطلاعات کیفی ارائه شده توسط این شاخص‌ها به دلیل واکنش‌های شیمیایی یا رشد میکروبی با زمان و پردازش متفاوت است (Azman *et al*., 2022; Otálora González *et al*., 2022). واکنش بین متابولیت‌های تولید شده در اثر رشد میکروبی و مواد شاخص، نشانه‌های بصری و اطلاعاتی را در مورد بدتر شدن یا کیفیت غذا ارائه می‌دهد (Fang *et al*., 2017). رنگدانه‌ها و رنگ‌های مصنوعی متعددی در توسعه سیستم‌های بسته‌بندی هوشمند استفاده می‌شوند؛ به‌طوری‌که این ترکیبات ممکن است به طور بالقوه سمی و جهش‌زا باشند، که ممکن است از مواد بسته‌بندی آزاد شوند و بنابراین برای بسته‌بندی مواد غذایی مناسب نیستند (Bhargava *et al*., 2020). از این رو، تحقیقات اخیر بر ترکیب رنگدانه‌های مشتق شده طبیعی از محصولات گیاهی و ضایعات غذایی متمرکز است که به راحتی در دسترس، غیرسمی، مقرون به‌صرفه، حساس، ایمن، قابل اعتماد، سریع، غیرمخرب و غیرتهاجمی هستند (Nalbandi *et al*., 2021). مواد گیاهی و غذایی سرشار از رنگدانه‌ها از جمله آنتوسیانین‌ها، کورکومین، بتالائین، کلروفیل، کاروتنوئیدها، تانن‌ها و .. هستند (Kurnianto *et*

al., 2020; Yao *et al*., 2020; Zhang *et al*., 2020). این ترکیبات می‌توانند برای توسعه مواد بسته‌بندی زیست تخریب‌پذیر هوشمند استفاده شوند. هنگامی که سیستم‌های بسته‌بندی هوشمند در معرض شرایط مختلف نگهداری و پردازش قرار می‌گیرند، متابولیت‌هایی (آمین‌های فرار و اسید آلی) به دلیل تخریب میکروبی محصولات غذایی در بسته‌بندی تولید می‌کنند. این ترکیبات با سیستم بسته‌بندی واکنش نشان می‌دهند و تغییرات قابل توجهی را ایجاد می‌کنند. این سیستم‌ها به عنوان شاخص‌های بصری عمل می‌کنند و به دلیل حساسیت بالا، تغییراتی را در رنگ خود نشان می‌دهند؛ که بیانگر فساد و کیفیت غذا می‌باشد (Balbinot-Alfaro *et al*., 2019; Latos-Brozio and Masek, 2020).

خاصیت فلورسانسی و فتوکاتالیستی و مکانیسم آن

فلورسانس شکلی از پدیده‌های لومینسانس است و به عنوان انتشار نور از ماده‌ای که نور یا سایر تشعشعات الکترومغناطیسی را جذب کرده است تعریف می‌شود. در بیشتر موارد، نور تابشی دارای طول موج بلندتر با انرژی کمتر از نور جذب شده یا تابش الکترومغناطیسی است. نمودار جابلونسکی معمولاً برای نشان دادن فرآیندهایی که بین جذب و گسیل نور رخ می‌دهد استفاده می‌شود (Lakowicz, 2006). شکل ۱-الف یک نمودار جابلونسکی ساده شده است که فرآیندهای مولکولی را در طول چرخه تحریک و انتشار یک فلوروفور نشان می‌دهد. S_0، S_1 و S_2 به ترتیب نشان دهنده حالت پایه منفرد، حالت اول و دوم الکترونیکی هستند. در هر حالت انرژی الکترونیکی سطوح انرژی ارتعاشی مختلفی وجود دارد که به صورت ۰، ۱ و ۲ نشان داده شده است. فلوروفور می‌تواند در هر یک از آن سطوح انرژی ارتعاشی وجود داشته باشد. به دنبال جذب نور، فلوروفور معمولاً به سطح ارتعاش بالاتر از حالت الکترونیکی S_1 یا دوم S_2 برانگیخته می‌شود. مولکول به سرعت به پایین‌ترین سطح ارتعاش S_1 از طریق یک فرآیند تبدیل داخلی شل می‌شود. این فرآیند معمولاً در ۱۰ ثانیه یا کمتر اتفاق می‌افتد، و عموماً قبل از گسیل نور کامل می‌شود. به دلیل از دست دادن انرژی فلوروفور در طول فرآیند تبدیل داخلی، نور ساطع شده معمولاً انرژی کمتری نسبت به نور جذب شده دارد (Jameson, 2014; Limpouchová and Procházka, 2016). در نهایت، فلوروفور هنگامی که به حالت پایه S_0 برمی‌گردد نور ساطع می‌کند. دو ویژگی مهم یک فلوروفور عبارتند از: بازده کوانتومی فلورسانس و طول عمر. بازده کوانتومی به عنوان تعداد فوتون‌های ساطع شده نسبت به تعداد فوتون‌های جذب شده تعریف می‌شود. از این رو مواد با بازده کوانتومی بالاتر نسبت به مواد با بازده کوانتومی کمتر در شرایط آزمایشی مشابه، به سیگنال‌های فلورسانس قابل تشخیص بالاتر منجر می‌شوند (Li and Que, 2014). همچنین فتوکاتالیست‌ها به عنوان ماده‌ای تعریف می‌شوند که قادر به جذب نور، تولید جفت الکترون-حفره هستند که تبدیل شیمیایی آلاینده‌هایی را که به طور مکرر در تماس با آن قرار می‌گیرند به محصولات سبزتر و بازسازی ترکیب شیمیایی آن پس از هر چرخه چنین فعل و انفعالی فراهم می‌کنند. فتوکاتالیست‌ها مواد برجسته‌ای هستند که به راحتی می‌توانند انرژی خورشیدی را برای استفاده در فعالیت‌های اکسیداسیون و کاهش تغییر دهند (Eghbaljoo-Gharehgheshlaghi *et al*., 2022). فتوکاتالیست‌ها در چندین زمینه مانند حذف آلاینده‌ها از هوا و آب، تقسیم آب برای تولید H_2، کنترل بو، غیرفعال‌سازی سلول‌های سرطانی و غیرفعال‌سازی باکتری‌ها استفاده می‌شوند (Ameta, 2018). در طول دهه گذشته، مواد فتوکاتالیست به دلیل پتانسیل آنها برای حذف ترکیبات سمی و خطرناک از محیط، توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند. هنگامی که یک فتوکاتالیست در معرض نور قرار می‌گیرد، فوتون‌هایی با طول موج مورد نظر (انرژی کافی) توسط یک الکترون از باند ظرفیت جذب شده و به نوار رسانایی منتقل می‌شوند. در نتیجه این فرآیند، یک حفره در باند ظرفیت ظاهر می‌شود.

در این فرآیند، جفت الکترون و حفره به صورت حالت‌های تحریک‌شده با نور ظاهر می‌شوند. متعاقباً، الکترون‌ها و حفره‌ها به سطح فتوکاتالیست مهاجرت می‌کنند (شکل ۱- ب). فتوکاتالیست‌ها به دلیل دارا بودن خواصی مانند مقاومت کم، انتقال نور، یکنواختی، پایداری در عملیات حرارتی، سختی مکانیکی و رفتار آبگریز و پیزوالکتریک، مواد بسیار متنوع هستند. همچنین برخی از کاربردهای فتوکاتالیست‌ها عبارتند از صرفه جویی در انرژی، بو زدایی، استریل کردن، خود تمیز شوندگی، رسوب‌زدایی، ضدمه و تصفیه فاضلاب (Farajinejad *et al*., 2023; Zhang and Lou, 2019).



شکل ۱- الف: نمودار جابلونسکی ساده شده، ب: مکانیسم اساسی فتوکاتالیز (Limpouchová and Procházka, 2016, Zhang and Lou, 2019)

Fig. 1. A: Simplified Jablonski diagram, B: Basic mechanism of photocatalysis (Limpouchová and Procházka, 2016, Zhang and Lou, 2019)

مزایا و معایب ترکیبات دارای فلورسانس و فتوکاتالیست

امروزه توسعه فناوری‌های جدید به منظور حفظ محیط زیست و حذف آلاینده‌های محیطی مورد توجه قرار گرفته‌اند؛ به‌طوری‌که در این بین فتوکاتالیست‌ها و فلورسانس‌ها راه‌حل‌های بسیار کارآمدی برای رسیدگی به معضلات مربوط به آلودگی زیست‌محیطی و بحران‌های انرژی، به‌ویژه در حضور طیف‌های متنوع خورشیدی هستند. فتوکاتالیست‌ها و فلورسانس‌ها چندین مزیت متمایز نسبت به فرآیندهای

مرسوم دارد، از جمله مراحل خسته کننده، دما و فشار بالا و استفاده از کاتالیزورهای فلزات واسطه را ندارند. فتوکاتالیست‌ها و فلورسانس‌ها به دلیل استفاده از نور، که بدون زحمت قابل دسترسی است و جو را آلوده نمی‌کنند و به عنوان یک فرآیند کاربردی، جهانی و به طور گسترده قابل اجرا، پتانسیل بالایی را نشان می‌دهند. همچنین این ترکیبات خنثی، غیرسمی و ارزان، توانایی نابودی دامنه گستردهای از میکروب‌های مختلف را دارا می‌باشند؛ بطوریکه به دلیل توانایی آن در آسیب رساندن به غشای سلولی، جامد کردن پروتئین‌های ویروس، کنترل فعال شدن ویروس در مواد دارویی هم استفاده می‌شوند. در کنار مزایای عنوان شده دارای محدودیت‌هایی نظیر شکاف انرژی بزرگ که برای تحریک الکترون‌ها توسط نور نیاز به پرتو فرابنفش دار،. ناپایداری در محیط مایع که باعث تجزیه شیمیایی آن‌ها می‌شود، نرخ بالای ترکیب مجدد الکترون–حفره می‌باشند (Xu *et al.*, 2019; Zhang *et al.*, 2023).

ترکیبات دارای خاصیت فلورسانس و فتوکاتالیست

در سال‌های اخیر با توسعه صنعتی شدن جهانی، بسیاری از محصولات صنعتی جدید وارد زندگی روزمره ما شده‌اند. به عنوان مثال، انواع مختلفی از آنتی‌بیوتیک‌ها، آفت کش‌ها، مکمل‌های پروتئینی، آنتی‌اکسیدان‌ها و رنگ‌ها و شیرین کننده‌های مختلف در مواد غذایی وجود دارند (Gonuguntla *et al.*, 2023; Zhang *et al.*, 2024)؛ بطوری‌که راحتی زیادی را برای زندگی روزمره ما به ارمغان آورده‌اند، اما با مشکلات مختلفی همراه هستند؛ به‌طوری‌که آنالیز مواد غذایی جهت ارزیابی کیفیت و همچنین کنترل ایمنی، ضروری می‌باشد. روش‌های رایج تشخیص این نوع ترکیبات عمدتاً شامل طیف‌سنجی جذب اتمی، طیف‌سنجی رامان، کروماتوگرافی گازی، طیف سنجی جرمی، کروماتوگرافی مایع با کارایی بالا، ارزیابی ایمنی، کشت و شمارش کلنی، رزونانس مغناطیس هسته‌ای و روش‌های الکتروشیمیایی می‌باشند (Luo *et al.*, 2020). مزایای این روش‌ها شامل تکرارپذیری، حساسیت و انتخاب پذیری بالا می‌باشد؛ ولی با این وجود این روش‌ها نیازمند تجهیزات گران قیمت، افراد آموزش دیده و جداسازی‌های طولانی مدت می‌باشند (Eghbaljoo *et al.*, 2022). بنابراین، توسعه روش‌های کارآمد و ارزان برای شناسایی منطقی است (Fu *et al.*, 2024)؛ از این رو در سال‌های اخیر، انواع مختلفی از تحقیقات بر روی اثرات ترکیبات فتوکاتالیستی و فلورسانسی مختلف در فیلم‌های خوراکی جهت بسته‌بندی مواد غذایی انجام شده است، که در اینجا به بررسی برخی از این ترکیبات پرداخته شده است. سورفکتانت‌ها سطوح مختلفی از تأثیر را بر فلورسانس ترکیبات دارند که عمدتاً به دلیل خواص یونی آنها است. سورفکتانت‌ها به شکل میسل به عنوان محیط سازمان یافته‌ای عمل می‌کنند که تمایل به محافظت از مولکول‌های یک ترکیب از ناخالصی‌ها و ویژگی‌های خاموش کننده دارند. میسل‌ها تمایل دارند املاح را در داخل خود یا روی سطح کلوئیدی خود مرتب کنند؛ هنگامی که املاح از محیط آبی به محیط میسلی حرکت می‌کنند، تغییراتی در چندین ویژگی مانند حلالیت، واکنش پذیری و ویژگی‌های طیف سنجی ایجاد می‌شود. این تغییرات در خواص منجر به افزایش شدت فلورسانس به دلیل افزایش حساسیت می‌شود. همچنین ویسکوزیته نسبی ریزمحیط‌های میسلی نیز از خاموش شدن توسط اکسیژن مولکولی جلوگیری می‌کند (Jung *et al.*, 2015; Koka, 2011).

تیتانیا اکسید تیتانیوم است که به طور طبیعی وجود دارد. این اکسید طبیعی را می‌توان استخراج کرد و به عنوان منبع تیتانیوم تجاری استفاده کرد. تیتانیا در سه اصل وجود دارد: روتیل تتراگونال (پایدار در دمای اتاق)، آناتاز تتراگونال (به دلایل جنبشی غیرپایدار) و بروکیت ارتورومبیک (از نظر تجاری قابل دوام نیست). هر یک از اشکال فوق دارای خواص فیزیکی متفاوتی مانند انکسار یا واکنش شیمیایی یا فتوشیمیایی است که امکان استفاده از آن را در کاربردهای خاصی که معمولاً به اندازه ذرات خاصی نیاز دارند را می‌دهد.

کاربردهای دی اکسید تیتانیوم به طور گسترده‌ای به عنوان رنگدانه سفید در جهان استفاده می‌شود؛ بطوریکه سمی و از نظر شیمیایی پایدار نیست (Pirsa *et al.*, 2022)، عمدتاً برای دستیابی به کدورت و سفیدی محصولات تجاری استفاده می‌شود (Ziental *et al.*, 2020). دی‌اکسیدتیتانیوم به دلیل درخشندگی و ضریب شکست بالای آن در حدود ۲/۷ پرمصرف‌ترین رنگدانه سفید است. همچنین یک مات کننده کارآمد به شکل پودری است که بیشتر به عنوان رنگدانه برای ایجاد سفیدی و شفافیت محصولات رایج مانند رنگ، کاغذ، پلاستیک، جوهر، مواد غذایی، داروها (در قرص‌ها) و همچنین در اکثر خمیردندان‌ها استفاده می‌شود. در غذا بیشتر برای سفیدکردن شیر بدون چربی استفاده می‌شود که طعم آن را افزایش می‌دهد و به دلیل ضریب شکست بالا، قابلیت جذب قوی اشعه ماوراء بنفش و مقاومت در برابر تغییر رنگ در زیر نور ماوراء بنفش در ضد آفتاب استفاده می‌شود (Koka, 2011).

کربن کوانتوم دات‌ها ترکیباتی نیمه هادی هستند که ویژگی‌های الکترونیکی آنها ارتباط نزدیکی با اندازه و شکل هر کریستال دارد. به‌طورکلی، هر چه اندازه کریستال کوچکتر باشد، شکاف باند بزرگ‌تر باشد، اختلاف انرژی بین بالاترین نوار ظرفیت و کمترین نوار رسانایی بیشتر است. بنابراین انرژی بیشتری برای برانگیختن نقطه مورد نیاز است و همزمان با بازگشت کریستال به حالت استراحت، انرژی بیشتری آزاد می‌شود (Koka, 2011). کربن کوانتوم دات‌ها دسته‌ای از نقاط کوانتومی با ویژگی‌های منحصربه‌فرد نظیر پایداری بالا، ویژگی‌های نوری خارق‌العاده، حلالیت خوب در آب، سمیت کم، نسبت سطح به حجم زیاد، آنتی‌باکتریایی و آنتی‌اکسیدانی هستند. این ویژگی‌ها ذرات کوانتومی کربن را برای کاربرد در زمینه‌های وسیعی از جمله تصویربرداری زیستی، حسگر زیستی، سد فرابنفش و بسته‌بندی بسیار مطلوب می‌کند. همچنین، اندازه بسیار کوچک و گروه‌های عملکردی سطح ذرات کوانتومی کربن‌ها موجب اثر بازدارندگی آن‌ها در برابر سلول‌های باکتری از جمله باکتری‌های گرم مثبت و گرم منفی می‌شود (Kousheh *et al.*, 2020). برای تهیه کرن کوانتوم دات‌ها از روش‌های مختلف فیزیکی و شیمیایی همچون سنتز شیمی اولتراسونیک، الکتروشیمی، اکسیداسیون اسیدی، روش هیدروترمال، مایکروویو و شیمی محلول استفاده می‌شود. که در بین روش‌های عنوان شده، روش هیدروترمال به دلیل مقرون به صرفه بودن و سادگی مورد توجه قرار گرفته است (Kumar *et al.*, 2019; Sabet and Mahdavi, 2019).

کاربرد ترکیبات دارای خاصیت فلورسانس و فتوکاتالیست

ترکیبات دارای خاصیت فتوکاتالیستی و فلورسانسی برای تبدیل مواد آلی سمی و غیرقابل تجزیه به CO_2، H_2O و غیرآلی استفاده می‌گردد؛ به عبارتی این ترکیبات جهت تخریب آلاینده‌های آلی، حذف فلز و تولید هیدروژن از طریق تقسیم آب استفاده می‌شوند. همچنین به منظور تصفیه آب (سم‌زدایی فاضلاب‌های شهری و آزمایشگاهی، تخریب رنگ‌ها و مواد آلی مضر در آب، ارائه آب مناسب و تمیز برای مصارف انسانی، کشاورزی یا صنعتی، تجزیه مولکول آب و تولید هیدروژن به عنوان یک سوخت سازگار با محیط زیست) و تصفیه هوا (تصفیه شیمیایی و بیولوژیکی هوای داخلی و خارجی (Pirsa *et al.*, 2020)، از بین بردن بوهای نامطبوع، از بین بردن اتیلن در هنگام نگهداری میوه‌ها و سبزی‌ها، اصلاح خاک با سلب هوا، تصفیه گازهای خروجی از نیروگاه‌ها و کارخانه‌ها، احیای گاز CO_2 و تبدیل آن به گازهای سودمند) می‌توان استفاده کرد (Sendão *et al.*, 2023).

استفاده از نانوذرات جاذب مغناطیسی در فیلم‌های خوراکی و بسته‌بندی مواد غذایی

در طول دو دهه گذشته، نانوذرات مغناطیسی مختلفی با اندازه‌ها، شکل‌ها و تغییرات سطحی مختلف طراحی، سنتز و با پیشرفت علم مواد مشخص شده‌اند. دانشمندان تحلیلی و دانشمندان علوم غذایی از جمله کسانی هستند که این مواد

جدید را از آزمایشگاه‌ها به کاربردهای تجاری می‌آورند. گروه‌های عملکردی سطحی قدرتمند و همه‌کاره و نسبت سطح به جرم بالا، این نانوذرات مغناطیسی را به ابزارهای مفیدی برای جذب، حتی زمانی که در سطوح ردیابی یا ماتریس‌های غذایی پیچیده وجود دارند، تبدیل کرده است. به همین دلیل است که روش‌های بیشتری برای تشخیص حساس و تعیین کمیت خطرات در غذاها بر اساس این ابزارهای مغناطیسی توسعه می‌یابد (Yu *et al.*, 2021).

نانوذرات مغناطیسی به دلیل خواص فوق پارامغناطیس، سطح ویژه بزرگ، زیست سازگاری بالا، غیرسمی بودن، تولید در مقیاس بزرگ و قابلیت بازیافت توجه فوق‌العاده‌ای را به خود جلب کرده‌اند. مهمتر از همه، گروه‌های هیدروکسیل متعدد روی سطح نانوذرات مغناطیسی می‌توانند مکان‌های جفتی را برای اصلاح‌کننده‌های مختلف فراهم کنند و نانوکامپوزیت‌های همه‌کاره را برای کاربرد در زمینه‌های انرژی، زیست‌پزشکی و محیطی تشکیل دهند (Dong *et al.*, 2024). همچنین نانوذرات مغناطیسی با خواص مغناطیسی، فیزیکی و شیمیایی مختلف می‌توانند برای توسعه برچسب‌های مغناطیسی مورد استفاده قرار گیرند و قابلیت ردیابی منحصربه‌فردی را ارائه می‌دهند که سپس می‌تواند برای بهبود ایمنی محصولات استفاده شود. به عبارتی یکی دیگر از استراتژی‌های ممکن برای توسعه مواد با ویژگی‌های منحصر به فرد برای اهداف ضد جعل، استفاده از نانوذرات مغناطیسی با رفتار سوپرپارامغناطیس است. آنها می توانند سیگنال مغناطیسی را به مواد هیبریدی ارسال کنند که می‌تواند برای اهداف تشخیص استفاده شود. اگرچه ترکیبات مختلفی می‌توانند برای ارائه پاسخ مغناطیسی پیشرفته استفاده شوند، ولی نانوذرات مغناطیسی به دلیل مقرون به صرفه بودن و تولید مقیاس‌پذیر، رقابتی‌تر هستند. علاوه بر این، اندازه کوچک آن‌ها امکان توزیع یکنواخت در بیوپلیمر را فراهم می‌کند، و تاثیر آن را بر خواص فیزیکوشیمیایی به حداقل می‌رساند (de Castro Alves *et al.*, 2024).

همانطورکه قبلا نیز ذکر گردیده است ترکیبات فوتوکاتالیک نانوذراتی با ویژگی‌های نیمه رسانایی مانند جذب نور، انتقال بار و ساختار الکترونیکی مطلوب و غیره هستند. نانوذرات فوتواکتیو به عنوان کاتالیزور در کاربردهای مختلف، از جمله تولید انرژی پایدار و اصلاح محیطی عمل می‌کنند(Saravanan *et al.*, 2022). در مقایسه با مواد حجیم، فتوکاتالیست‌ها ساختار استثنایی و نسبت سطح به حجم بالاتری دارند که عملکرد آنها را تقویت می‌کند (Yin *et al.*, 2021). در نتیجه، کنترل شکل و اندازه مواد فتوکاتالیستی در محدوده نانو، امکان ایجاد و ساخت مواد مناسب برای استفاده در کاربردهای نوآورانه را فراهم می‌کند. نانوذرات فوتواکتیو سبز را می‌توان از منابع بیولوژیکی مختلفی از جمله مواد گیاهی و میکروارگانیسم‌ها تهیه کرد. این رویکرد سنتز سازگار با محیط زیست، سبز، زیست سازگار و مقرون به صرفه است (Sarath *et al.*, 2022). نانوفتوکاتالیست‌های سنتز سبز فعالیت کاتالیزوری بهبود یافته را نشان می‌دهند در حالی که استفاده از مواد شیمیایی پرهزینه و خطرناک را کاهش می‌دهند. استفاده از گونه‌های مختلف باکتری برای ساخت فلزات نجیب مانند طلا، نقره، پلاتین، پالادیم و سایر اکسیدهای نیمه هادی مانند TiO_2 و ZnO نیز برای سنتز سبزتر نانوذرات مطلوب است. جلبک‌ها، باکتری‌ها و قارچ‌ها معمولاً در فرآیندهای واسطه‌ای میکروبی برای تولید نانوذرات فلزی بسیار پایدار استفاده می‌شوند. عصاره‌های گیاهی به دلیل سهولت در تولید و جابجایی و همچنین کم خطر بودن، به طور فزاینده ای محبوب می‌شوند. از آنجایی که نور فراوان، ارزان، تمیز، پایدار و به راحتی در دسترس است، پاکسازی آلودگی فتوکاتالیستی یک راه حل بالقوه است. علاوه بر این، نور می‌تواند واکنش‌های بسیار انتخابی را ایجاد کند (Abdel-Aziz *et al.*, 2020). فتوکاتالیز به راحتی می‌تواند آلاینده های آلی پایدار را از بین ببرد. برای فعال کردن فرآیندهای کاهش اکسیداسیون ناشی از نور (اکسیداسیون) که بسیاری از

آلاینده‌های آلی را با تولید گونه‌های اکسیژن فعال (ROS) اکسید می‌کنند، نانومواد جدید، با کارایی بالا و فتواکتیو مورد نیاز است (Mirzaeifard *et al.*, 2020).

در چند سال گذشته، نیز فیلم‌های کامپوزیتی ساخته شده با نانو مواد به دلیل خواص جدیدشان به‌طور گسترده مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. استفاده از نانوذرات با خواص فتوکاتالیستی و فلورسانسی در فیلم‌های خوراکی خواص فیزیکوشیمیایی، مکانیکی و میکروبی آنها را بهبود می‌بخشد (Sani *et al.*, 2019). بنابراین، در طول عمر مفید، عملکرد بسته‌بندی و همچنین کیفیت و ایمنی مواد غذایی را تأثیر گذار می‌باشند (Mellinas *et al.*, 2020)؛ به‌طوری‌که تولید فیلم‌های نانوکامپوزیتی با فعالیت فتوکاتالیستی، علاوه بر داشتن فواید آنتی‌اکسیدانی و ضدمیکروبی ترکیبات زیست فعال، استحکام ساختاری را افزایش داده و ویژگی‌های مکانیکی و خواص فیزیکی و شیمیایی فیلم‌های خوراکی را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهد (Farajinejad *et al.*, 2024)؛ لذا در این قسمت به برررسی برخی مطالعات و تحقیقات صورت گرفته در این زمینه پرداخته شده است(جدول ۱).

جدول ۱- پیشینه تحقیق استفاده از نانوذرات مغناطیسی با خواص فلورسانس و فتوکاتالیست در فیلم خوراکی برای بسته‌بندی مواد غذایی

Table 1 - Research background on the use of magnetic nanoparticles with fluorescence and photocatalytic properties in edible film for food packaging

موضوع Item	نتایج Results	منابع Reference
بررسی خواص فیزیکوشیمیایی، فتوکاتالیستی و ضد میکروبی فیلم‌های نانوکامپوزیتی بر پایهٔ کیتوزان حاوی نانوذرات NiO Study of the physicochemical, photocatalytic, and antimicrobial properties of chitosan-based nanocomposite films containing NiO nanoparticles	FT-IR و XRD: تشکیل واکنش‌های جدید و افزایش بلورینگی فیلم‌ها SEM: پراکندگی یکنواخت نانو ذرات NiO افزایش خواص مانع آب، استحکام کششی، خواص حرارتی و آبگریزی سطحی فیلم‌ها با افزودن NiONPs فعالیت فوتوکاتالیستی نانوکامپوزیت‌ها با جذب ۷۲ ٪ متیل اورانژ در ۲۷۰ دقیقه تحت تابش پرتوهای فرا بنفش تأیید شد. فعالیت ضدباکتریایی خوبی را در برابر باکتری‌های گرم مثبت و گرم منفی FT-IR and XRD: Formation of new reactions and increased crystallinity of films SEM: Uniform dispersion of NiO nanoparticles. Increased water barrier properties, tensile strength, thermal properties and surface hydrophobicity of films with the addition of NiONPs The photocatalytic activity of the nanocomposites was confirmed by the absorption of 72% of methyl orange in 270 min under ultraviolet irradiation. Good antibacterial activity against gram-positive and gram-negative bacteria	(Marand *et al.*, 2021)
ارزیابی کامل نشاسته سیب‌زمینی شیرین و فیلم‌های خوراکی مبتنی بر پکتین ضایعات لیمو با ترکیبات نانوتیتانیم برای کاربردهای بسته‌بندی مواد غذایی Comprehensive evaluation of sweet potato starch and lemon waste pectin-based edible films with nanotitanium compounds for food packaging applications	فزایش سطح TiO_2-NPs منجر به کاهش میزان رطوبت، انحلال‌پذیری و جذب رطوبت لایه‌ها افزودن غلظت کم TiO_2-NPs به لایه‌های نشاسته–پکتین خواص سد مکانیکی و رطوبتی را بهبود بخشید. SEM: پراکندگی ذرات نانو TiO_2 در غلظت کم دمای انتقال شیشه‌ای با افزایش غلظت TiO_2 به دمای بالاتر منتقل شد و پایداری حرارتی فیلم‌ها افزایش یافت. فعالیت فوتوکاتالیستی نانوکامپوزیت‌ها تحت تابش پرتو فرا بنفش تأیید شد. Increasing the TiO_2-NPs surface area resulted in a decrease in the moisture content, solubility, and moisture absorption of the films. Adding a low concentration of TiO_2-NPs to the starch-pectin films improved the mechanical and moisture barrier properties. SEM: Dispersion of TiO_2 nanoparticles at low concentration The glass transition temperature shifted to a higher temperature with increasing TiO_2 concentration, and the thermal stability of the films increased. The photocatalytic activity of the nanocomposites was confirmed under ultraviolet irradiation.	(Dash *et al.*, 2019)
بررسی خواص حرارتی، مانعی، ساختاری، مورفولوژیکی و نوری فیلم‌های فعال مبتنی بر پکتین حاوی عصارهٔ پوسته دانهٔ کاکائو و نانوذرات اکسید روی/ روی Study of thermal, barrier, structural, morphological and optical properties of pectin-based active films containing cocoa bean shell extract and zinc oxide/zinc nanoparticles	افزایش قابل توجهی در پایداری حرارتی و اکسیداتیو با افزودن ZnO/Zn-NPs افزودن ZnO/Zn-NPs به فیلم خوراکی موجب کاهش میزان انتقال اکسیژن و حفاظت بیشتری در برابر اکسیداسیون گردید. افزودن عصاره و نانوذرات منجر به بهبود واضح (تا ۹۸ ٪) در خواص مانع پرتو فرا بنفش شد. Significant increase in thermal and oxidative stability with the addition of ZnO/Zn-NPs The addition of ZnO/Zn-NPs to the edible film resulted in reduced oxygen transmission and greater protection against oxidation. The addition of the extract and nanoparticles resulted in a clear improvement (up to 98%) in the UV-blocking properties.	(Mellinas *et al.*, 2020)

اثر مونت موریلونیت بر افزایش خواص فیزیکوشیمیایی، نوری و فوتوکاتالیستی فوتوکاتالیست دولایه TiO_2/کیتوزان The effect of montmorillonite on enhancing the physicochemical, optical, and photocatalytic properties of the TiO2/chitosan bilayer photocatalyst	وجود مونت موریلونیت (MT) در داخل کامپوزیت تورم را کاهش و چسبندگی و پایداری حرارتی کیتوزان (CS) را بهبود بخشید. MT به تولید رادیکال‌های هیدروکسیل بالاتر و بهبود اکسیداسیون حالت جامد CS در لایهٔ فرعی جاذب برای افزایش فتوکاتالیستی TiO_2/CS-MT کمک کرد. فعالیت فوتوکاتالیستی TiO_2/CS-MT به ترتیب ۱/۳ و ۴/۲ برابر بهتر از فوتوکاتالیست‌های TiO_2/CS و TiO_2 بود. The presence of montmorillonite (MT) inside the composite reduced swelling and improved the adhesion and thermal stability of chitosan (CS). MT contributed to the generation of higher hydroxyl radicals and improved the solid-state oxidation of CS in the adsorbent sublayer to enhance the photocatalytic activity of TiO2/CS-MT. The photocatalytic activity of TiO2/CS-MT was 1.3 and 4.2 times better than that of TiO2/CS and TiO2 photocatalysts, respectively.	(Bahrudin and Nawi, 2019)
خواص مورفولوژیکی، فیزیکی و فوتوکاتالیستی فیلم‌های بیونانوکامپوزیتی مبتنی بر پروتئین کنجد ترکیب شده با نانوذرات TiO_2 Morphological, physical and photocatalytic properties of bionanocomposite films based on sesame protein combined with TiO_2 nanoparticleS	FT-IR: موفقیت در شکل گیری برهمکنش‌های جدید بین زنجیره‌های پروتئین و TiO_2-NPs FE-SEM: پراکندگی یکنواخت نانوذرات در سرعت انتقال بخار آب و انحلال‌پذیری در آب کاهش و استحکام کششی، زاویهٔ تماس آب و کدورت با افزودن TiO_2 افزایش یافت. رزیابی فعالیت فوتوکاتالیستی بیونانوکامپوزیت‌ها نشان داد که فیلم‌های ۵ ٪ SPI-TiO_2 قادر به حذف ۱۰/۹۶٪ از کسیژن اتمسفر در مدت ۶ ساعت هستند. مطالعات تخریب نوری نشان داد که پس از ۱۲۰ دقیقه تابش پرتو فرا بنفش، بیش از ۷۲/۶۸ ٪ از فیلم‌های بیونانوکامپوزیت رنگ‌آمیزی شد. FT-IR: Successful formation of new interactions between protein chains and TiO_2-NPs FE-SEM: Uniform dispersion of nanoparticles in water vapor transmission rate and water solubility decreased and tensile strength, water contact angle and turbidity increased with the addition of TiO_2. Photocatalytic activity evaluation of bionanocomposites showed that 5% SPI-TiO_2 films were able to remove 10.96% of atmospheric oxygen within 6 hours. Photodegradation studies showed that after 120 min of ultraviolet irradiation, more than 72.68 %of bionanocomposite films were colored	(Fathi *et al*., 2019)
فیلم نانوکامپوزیتی پروتئین پکتین جدا شدهٔ ماش حاوی ریزپوشانی عصارهٔ هل واقعی /نانوذرات/ CeO_2 نقاط کوانتومی کربن گرافیت: بررسی خواص فلورسانس، فوتوکاتالیستی و ضدمیکروبی Nanocomposite film of isolated mung bean pectin protein containing microencapsulated real cardamom extract/CeO_2 nanoparticles/graphitic carbon quantum dots: Investigation of fluorescence, photocatalytic and antimicrobial properties	با افزودن TCEM/CeO_2/CQD ظرفیت آنتی‌اکسیدانی، رطوبت، ضخامت، انحلال‌پذیری و نفوذ بخار آب نمونه‌ها افزایش یافت. FT-IR: یک برهمکنش الکترواستاتیکی را در فیلم نانوکامپوزیت نشان داد. XRD: ساختار کریستالی کاهش یافته را نشان داد. نتایج فعالیت ضد میکروبی بر علیه *اشریشیاکلی* و *استافیلوکوکوس اورئوس* افزایش قطر ناحیه بازدارنده رشد را به دنبال افزودن TCEM/CeO_2/CQD نشان داد نتایج آنالیز فوتوکاتالیستی در نمونه‌های حاوی نانوذرات و نمونه بهینه شده بیشترین درصد تجزیه را نشان داد. The antioxidant capacity, moisture content, thickness, solubility, water vapor permeability of the samples increased with the addition of TCEM/CeO_2/CQD. FT-IR: showed an electrostatic interaction in the nanocomposite film. XRD: showed a reduced crystalline structure. The results of antimicrobial activity against *Escherichia coli* and *Staphylococcus aureus* showed an increase in the diameter of the growth inhibitory zone following the addition of TCEM/CeO_2/CQD. The results of photocatalytic analysis showed the highest degradation percentage in samples containing nanoparticles and the optimized sample.	(Sani and Alizadeh, 2022)
فیلم‌های نانوکامپوزیتی مبتنی بر آلژینات سدیم با خواص آنتی‌اکسیدانی و آنتی‌باکتریایی قوی حاوی عصاره‌های پوست کیوی غنی از پلی‌فنل، نانوذرات نقره اصلاح شده Sodium alginate-based nanocomposite films with strong antioxidant and antibacterial properties containing polyphenol-rich kiwi peel extracts, modified silver nanoparticles	فیلم‌ها فعالیت‌های آنتی‌اکسیدانی و ضدباکتریایی عالی نشان دادند. فیلم‌های تهیه شده دارای استحکام کششی قوی، مقاومت در برابر بخار آب و خواص مانع UV خوبی هستند. فعالیت ضدباکتریایی علیه *استافیلوکوکوس اورئوس* و *اشریشیاکلی* نشان داده شد. The films showed excellent antioxidant and antibacterial activities. The prepared films have strong tensile strength, water vapor resistance and good UV barrier properties. Antibacterial activity was demonstrated against *Staphylococcus aureus* and *Escherichia coli*.	(Sun *et al*., 2021)

نتیجه گیری کلی

در طول دو دهه گذشته، نانوذرات مغناطیسی با اندازه‌ها، شکل‌ها و تغییرات سطحی مختلف طراحی و سنتز شده‌اند و پیشرفت‌های قابل توجهی در علم مواد به همراه داشته‌اند. این نانوذرات به دلیل گروه‌های عملکردی سطحی قدرتمند و نسبت سطح به جرم بالا، ابزارهای مفیدی برای جذب مواد حتی در سطوح ردیابی یا ماتریس‌های غذایی پیچیده شده‌اند و به همین دلیل، روش‌های تشخیص حساس و تعیین کمیت

خطرات غذایی بر اساس این نانوذرات توسعه یافته است. علاوه بر این، فیلم‌های کامپوزیتی ساخته‌شده با نانومواد به دلیل خواص فیزیکوشیمیایی، مکانیکی و میکروبی بهبود یافته‌شان، مورد توجه گسترده‌ای قرار گرفته‌اند. نانوذرات با خواص فتوکاتالیستی و فلورسانسی در این فیلم‌ها موجب بهبود عملکرد بسته‌بندی، کیفیت و ایمنی مواد غذایی می‌شوند. این ترکیبات می‌توانند مواد آلی سمی و غیرقابل تجزیه را به CO_2 و H_2O تبدیل کرده و در تصفیه آب و هوا، حذف آلاینده‌های آلی و فلزی، و تولید هیدروژن از طریق تجزیه آب کاربرد داشته باشند. کربن کوانتوم دات‌ها نیز به دلیل ویژگی‌های نوری خارق‌العاده، پایداری بالا، حلالیت خوب در آب، سمیت کم، و نسبت سطح به حجم زیاد، برای کاربردهای زیستی و حسگری بسیار مطلوب هستند و روش‌های مختلفی برای سنتز آن‌ها وجود دارد که روش هیدروترمال به دلیل سادگی و مقرون به صرفه بودن بیشتر مورد توجه قرار گرفته است.

امروزه توسعه فناوری‌های جدید به منظور حفظ محیط زیست و حذف آلاینده‌های محیطی اهمیت بسیاری یافته است؛ فتوکاتالیست‌ها و فلورسانس‌ها به عنوان راه‌حل‌های کارآمد برای مقابله با آلودگی‌های زیست‌محیطی و بحران‌های انرژی شناخته می‌شوند. این مواد به دلیل نیاز نداشتن به مراحل خسته‌کننده، دما و فشار بالا، و استفاده از کاتالیزورهای فلزات واسطه، مزایای متمایزی نسبت به فرآیندهای مرسوم دارند. فتوکاتالیست‌ها و فلورسانس‌ها از نور بهره می‌گیرند که به راحتی در دسترس است و جو را آلوده نمی‌کند، بنابراین به عنوان فرآیندهای کاربردی و جهانی، پتانسیل بالایی نشان می‌دهند. این ترکیبات خنثی، غیرسمی و ارزان، توانایی نابودی طیف گسترده‌ای از میکروب‌ها را دارا هستند و به دلیل توانایی آسیب رساندن به غشای سلولی و جامد کردن پروتئین‌های ویروس، در مواد دارویی نیز کاربرد دارند. با این حال، محدودیت‌هایی نظیر شکاف انرژی بزرگ که برای تحریک الکترون‌ها نیاز به پرتو فرابنفش دارد و ناپایداری در محیط مایع، عملکرد آن‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهد. فلورسانس‌ها به عنوان انتشار نور از موادی که نور یا تشعشعات الکترومغناطیسی را جذب کرده‌اند تعریف می‌شوند و معمولاً نور تابشی با انرژی کمتر از نور جذب شده دارند. نمودار جابلونسکی فرآیندهای مولکولی بین جذب و گسیل نور را نشان می‌دهد. فتوکاتالیست‌ها مواد برجسته‌ای هستند که می‌توانند انرژی خورشیدی را برای فعالیت‌های اکسیداسیون و کاهش تغییر دهند و در زمینه‌هایی مانند حذف آلاینده‌ها از هوا و آب، تولید H_2، کنترل بو و غیرفعال‌سازی سلول‌های سرطانی و باکتری‌ها استفاده می‌شوند. در نهایت، این مواد به دلیل مقاومت کم، انتقال نور، یکنواختی، پایداری حرارتی، سختی مکانیکی و رفتار آبگریز، کاربردهای متنوعی دارند و به صرفه‌جویی در انرژی، بوزدایی، استریل کردن، خود تمیز شوندگی، رسوب‌زدایی، ضدمه و تصفیه فاضلاب کمک می‌کنند.

بسته‌بندی مواد غذایی سه عملکرد اساسی دارد: مهار، حفظ کیفیت و محافظت در برابر عوامل محیطی، فیزیکی و میکروبیولوژیکی. در سال‌های اخیر، با تغییر ترجیحات و انتظارات مصرف‌کننده، نقش بسته‌بندی فراتر از عملکرد اصلی آن رفته و به افزایش عمر مفید مواد غذایی و عملکرد به عنوان شاخص کیفیت محصولات بسته‌بندی شده منجر شده است. امروزه بسته‌بندی به دو نوع فعال و هوشمند تقسیم می‌شود؛ در بسته‌بندی فعال، مواد افزوده‌شده با محیط داخلی بسته تعامل دارند تا ماندگاری غذا را افزایش دهند و رایج‌ترین فناوری‌ها به‌طور خاص برای حذف اکسیژن طراحی شده‌اند. بسته‌بندی هوشمند بر وضعیت محصولات نظارت کرده و در مورد فساد یا مشکلات احتمالی هشدار می‌دهد. این سیستم‌ها به عنوان شاخص‌های کیفیت عمل کرده و تغییرات کیفی را بر اساس واکنش‌های شیمیایی یا رشد میکروبی نشان می‌دهند. مواد گیاهی و غذایی غنی از رنگدانه‌ها برای توسعه بسته‌بندی‌های زیست‌تخریب‌پذیر

هوشمند استفاده می‌شوند و در برابر شرایط مختلف نگهداری و پردازش، تغییرات قابل توجهی ایجاد می‌کنند. بسته‌بندی‌های خوراکی که از پلیمرهای زیستی ساخته شده‌اند، به دو دسته پوشش‌ها و فیلم‌ها تقسیم می‌شوند و به عنوان موانع رطوبت، گاز و املاح عمل می‌کنند. همچنین این بسته‌بندی‌ها به عنوان حامل افزودنی‌های غذایی مانند عطرها، طعم‌دهنده‌ها، عوامل ضد میکروبی و آنتی‌اکسیدان‌ها عمل می‌کنند و باعث افزایش کیفیت کلی محصولات غذایی می‌شوند. بیوپلیمرهای زیست‌تخریب‌پذیر، به دلیل توانایی تجزیه شدن به ترکیبات بی‌ضرر در شرایط مطلوب، بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند و به کاهش آلودگی‌های زیست محیطی کمک می‌کنند. با توجه به افزایش آگاهی مصرف‌کنندگان و اهمیت پایداری محیط زیست، استفاده از فیلم‌ها و پوشش‌های خوراکی در بسته‌بندی مواد غذایی مزایای فراوانی دارد و نقش مهمی در حفظ کیفیت و ایمنی محصولات غذایی ایفا می‌کند.

تعارض منافع

نویسندگان این مقاله هیچ گونه تعارض منافی ندارند.

منابع

Ahmadi Gheshlagh, P., Seiiedlou, S. S., and Nalbandi, H. (2019). Development, assessment and evaluation of a combined infrared and hot-air dryer to determine its performance characteristics during banana slice drying. *Iranian Food Science and Technology Research Journal*, *15*(5), 623-634.

Ameta, S. C., and Ameta, R. (2018). *Advanced oxidation processes for wastewater treatment: emerging green chemical technology*. Academic press.

Amiri, S., Rezazad Bari, L., Malekzadeh, S., Amiri, S., Mostashari, P., and Ahmadi Gheshlagh, P. (2022). Effect of Aloe vera gel-based active coating incorporated with catechin nanoemulsion and calcium chloride on postharvest quality of fresh strawberry fruit. *Journal of Food Processing and Preservation*, *46*(10), e15960.

Arjeh, E., Khodaei, S. M., Barzegar, M., Pirsa, S., Karimi Sani, I., Rahati, S., and Mohammadi, F. (2022). Phenolic compounds of sugar beet (*Beta vulgaris* L.): Separation method, chemical characterization, and biological properties. *Food Science and Nutrition*, *10*(12), 4238-4246.

Azman, N., Khairul, W. M., and Sarbon, N. (2022). A comprehensive review on biocompatible film sensor containing natural extract: Active/intelligent food packaging. *Food Control*, *141*, 109189.

Bahrudin, N. N., and Nawi, M. A. (2019). Effects of montmorillonite on the enhancement ofphysicochemical, optical and photocatalytic properties of TiO_2/chitosan bilayer photocatalyst. *Korean Journal of Chemical Engineering*, *36*, 478-488.

Balbinot-Alfaro, E., Craveiro, D. V., Lima, K. O., Costa, H. L. G., Lopes, D. R., and Prentice, C. (2019). Intelligent packaging with pH indicator potential. *Food Engineering Reviews*, *11*, 235-244.

Bhargava, N., Sharanagat, V. S., Mor, R. S., and Kumar, K. (2020). Active and intelligent biodegradable packaging films using food and food waste-derived bioactive compounds: A review. *Trends in Food Science and Technology*, *105*, 385-401.

Cano, A., Chafer, M., Chiralt, A., & Gonzalez-Martinez, C. (2017). *Strategies to improve the functionality of starch-based films* (Vol. 1, pp. 311-337). Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc.

Chaichi, M., Hashemi, M., Badii, F., and Mohammadi, A. (2017). Preparation and characterization of a novel bionanocomposite edible film based on pectin and crystalline nanocellulose. *Carbohydrate Polymers*, *157*, 167-175.

Chiralt, A., Menzel, C., Hernandez-García, E., Collazo, S., & Gonzalez-Martinez, C. (2020). Use of by-products in edible coatings and biodegradable packaging materials for food preservation. In *Sustainability of the Food System* (pp. 101-127). Academic Press.

Dash, K. K., Ali, N. A., Das, D., and Mohanta, D. (2019). Thorough evaluation of sweet potato starch and lemon-waste pectin based-edible films with nano-titania inclusions for food packaging applications. *International Journal of Biological Macromolecules*, *139*, 449-458.

de Castro Alves, L., Cerqueira, M. A., González-Goméz, M. A., Garcia-Acevedo, P., Prieto, Á. A., Redondo, Y. P., & Rivas, J. (2024). Innovative films by embedding magnetic nanoparticles in cellulose acetate. *Food Packaging and Shelf Life*, *42*, 101264.

de Oliveira Filho, J. G., Braga, A. R. C., de Oliveira, B. R., Gomes, F. P., Moreira, V. L., Pereira, V. A. C., and Egea, M. B. (2021). The potential of anthocyanins in smart, active, and bioactive eco-friendly polymer-based films: A review. *Food Research International*, *142*, 110202.

Dong, L., Chen, G., Liu, G., Huang, X., Xu, X., Li, L., & Abd El-Aty, A. M. (2024). A review on recent advances in the applications of composite Fe_3O_4 magnetic nanoparticles in the food industry. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, *64*(4), 1110-1138.

Eghbaljoo-Gharehgheshlaghi, H., Shariatifar, N., Arab, A., Alizadeh-Sani, M., Sani, I. K., Asdagh, A., Rostami, M., Alikord, M., and Arabameri, M. (2022). The concentration and probabilistic health risk assessment of trace metals in three type of sesame seeds using ICP-OES in Iran. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, *102* (17), 5936-5950.

Eghbaljoo, H., Alizadeh Sani, M., Sani, I. K., Maragheh, S. M., Sain, D. K., Jawhar, Z. H., Pirsa, S., Kadi, A., Dadkhodayi, R., and Zhang, F. (2023). Development of smart packaging halochromic films embedded with anthocyanin pigments; recent advances. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 1-17.

Eghbaljoo, H., Sani, I. K., Sani, M. A., Rahati, S., Mansouri, E., Molaee-Aghaee, E., Fatourehchi, N., Kadi, A., Arab, A., and Sarabandi, K. (2022). Advances in plant gum polysaccharides; Sources, techno-functional properties, and applications in the food industry-A review. *International Journal of Biological Macromolecules*, *222*, 2327-2340.

Espitia, P. J., Batista, R. A., Azeredo, H. M., and Otoni, C. G. (2016). Probiotics and their potential applications in active edible films and coatings. *Food Research International*, *90*, 42-52.

Ezati, P., and Rhim, J.-W. (2022). Pectin/carbon quantum dots fluorescent film with ultraviolet blocking property through light conversion. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, *219*, 112804.

Fang, Z., Zhao, Y., Warner, R. D., and Johnson, S. K. (2017). Active and intelligent packaging in meat industry. *Trends in Food Science and Technology*, *61*, 60-71.

Farajinejad, Z., Sani, I. K., Alizadeh, M., & Amiri, S. (2024). A review of recent advances in the photocatalytic activity of protein and polysaccharide-based nanocomposite packaging films: antimicrobial, antioxidant, mechanical, and strength properties. *Journal of Polymers and the Environment*, *32*(8), 3437-3447.

Fathi, N., Almasi, H., and Pirouzifard, M. K. (2019). Sesame protein isolate based bionanocomposite films incorporated with TiO2 nanoparticles: Study on morphological, physical and photocatalytic properties. *Polymer Testing*, *77*, 105919.

Foghara, S. K., Jafarian, S., Zomorodi, S., Asl, A. K., and Nasiraei, L. R. (2020). Fabrication and characterization of an active bionanocomposite film based on basil seed mucilage and ZnO nanoparticles. *Journal of Food Measurement and Characterization*, *14*(6), 3542-3550.

Foroumandi, E., Alizadeh, M., and Kheirouri, S. (2018). Age-dependent changes in plasma amino acids contribute to alterations in glycoxidation products. *Journal of Medical Biochemistry*, *37*(4), 426.

Fu, Y.-P., Yang, H., Liu, H.-L., Li, Y.-H., Chen, X.-L., Cui, H.-L., and Wang, J.-J. (2024). Synthesis, structure, fluorescence and photocatalytic properties of two complexes based on a dimethylimidazole biphenyl/isophthalic acid ligand. *Journal of Molecular Structure*, 137741.

Galus, S., Arik Kibar, E. A., Gniewosz, M., and Kraśniewska, K. (2020). Novel materials in the preparation of edible films and coatings-A review. *Coatings*, *10* (7), 674.

Garg, H., Purohit, S. R., Sharma, V., and Sahu, J. K. (2022). Antioxidant-Rich Edible Packaging. In *Edible Food Packaging: Applications, Innovations and Sustainability* (pp. 527-545). Springer.

Garlisi, C., Trepci, E., Li, X., Al Sakkaf, R., Al-Ali, K., Nogueira, R. P., Zheng, L., Azar, E., and Palmisano, G. (2020). Multilayer thin film structures for multifunctional glass: Self-cleaning, antireflective and energy-saving properties. *Applied Energy*, *264*, 114697.

Gonuguntla, S., Kamesh, R., Pal, U., and Chatterjee, D. (2023). Dye sensitization of TiO_2 relevant to photocatalytic hydrogen generation: Current research trends and prospects. *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews*, 100621.

Gupta, V., Biswas, D., & Roy, S. (2022). A comprehensive review of biodegradable polymer-based films and coatings and their food packaging applications. *Materials*, *15* (17), 5899.

Hamed, I., Jakobsen, A. N., and Lerfall, J. (2022). Sustainable edible packaging systems based on active compounds from food processing byproducts: A review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, *21*(1), 198-226.

Hassani, D., Sani, I. K., and Pirsa, S. (2023). Nanocomposite film of potato starch and gum Arabic containing boron oxide nanoparticles and anise hyssop (Agastache foeniculum) essential Oil: investigation of physicochemical and antimicrobial properties. *Journal of Polymers and the Environment*, 1-12.

Jafarzadeh, S., Nafchi, A. M., Salehabadi, A., Oladzad-Abbasabadi, N., and Jafari, S. M. (2021). Application of bio-nanocomposite films and edible coatings for extending the shelf life of fresh fruits and vegetables. *Advances in Colloid and interface Science*, *291*, 102405.

Jameson, D. M. (2014). *Introduction to fluorescence*. Taylor and Francis.

Janowicz, M., Galus, S., Ciurzyńska, A., and Nowacka, M. (2023). The potential of edible films, sheets, and coatings based on fruits and vegetables in the context of sustainable food packaging development. *Polymers*, *15* (21), 4231.

Janowicz, M., Kadzińska, J., Bryś, J., Ciurzyńska, A., Karwacka, M., and Galus, S. (2023). Physical and chemical properties of vegetable films based on pumpkin purée and biopolymers of plant and animal origin. *Molecules*, *28*(12), 4626.

Jorge, A. M., Gaspar, M. C., Henriques, M. H., and Braga, M. E. (2023). Edible films produced from agrifood by-products and wastes. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, *88*, 103442.

Jung, A.-V., Frochot, C., and Bersillon, J.-L. (2015). Fluorescence spectroscopy as a specific tool for the interaction study of two surfactants with natural and synthetic organic compounds. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, *481*, 567-576.

karimi sani, i., and Alizadeh, M. (2022). Packaging of UF cheese with edible film of nanocomposite isolated mung bean protein-apple pectin containing microencapsulation of cardamom extract and serum oxide nanoparticles and quantum carbon Graphite dots: Investigation of its physicochemical properties. *Journal of food Science and Technology (Iran)*, *19*(128), 235-247.

Khalid, M. Y., and Arif, Z. U. (2022). Novel biopolymer-based sustainable composites for food packaging applications: A narrative review. *Food Packaging and Shelf Life*, *33*, 100892.

Khodaei, S. M., Gholami-Ahangaran, M., Karimi Sani, I., Esfandiari, Z., and Eghbaljoo, H. (2023). Application of intelligent packaging for meat products: A systematic review. *Veterinary Medicine and Science*, *9* (1), 481-493.

Koka, V. D. (2011). *A Study of the effects of titanium dioxide nanoparticles on the fluorescent intensity of fluorescent compounds in the presence of known quenchers* East Tennessee State University].

Kousheh, S. A., Moradi, M., Tajik, H., and Molaei, R. (2020). Preparation of antimicrobial/ultraviolet protective bacterial nanocellulose film with carbon dots synthesized from lactic acid bacteria. *International Journal of Biological Macromolecules*, *155*, 216-225.

Kumar, K., Kumar, U., Singh, M., and Yadav, B. (2019). Synthesis and characterizations of exohedral functionalized graphene oxide with iron nanoparticles for humidity detection. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, *30*, 13013-13023.

Kurnianto, M., Poerwanto, B., Wahyono, A., Apriliyanti, M., and Lestari, I. (2020). Monitoring of banana deteriorations using intelligent-packaging containing brazilien extract (Caesalpina sappan L.). IOP conference series: Earth and environmental science,

Lakowicz, J. (2006). In Principles of fluorescence spectroscopy. In: Springer, US: Boston,MA.

Latos-Brozio, M., and Masek, A. (2020). The application of natural food colorants as indicator substances in intelligent biodegradable packaging materials. *Food and Chemical Toxicology*, *135*, 110975.

Li, X., and Que, L. (2014). Fluorescence enhancement enabled by nanomaterials and nanostructured substrates: A brief review. *Rev. Nanosci. Nanotechnol*, *3*(3).

Limpouchová, Z., and Procházka, K. (2016). Theoretical principles of fluorescence spectroscopy. *Fluorescence Studies of Polymer Containing Systems*, 91-149.

Liu, Y., and Choi, C.-H. (2021). Superhydrophobic sands for the preservation and purification of water. *Coatings*, *11* (2), 151.

Luo, X., Han, Y., Chen, X., Tang, W., Yue, T., and Li, Z. (2020). Carbon dots derived fluorescent nanosensors as versatile tools for food quality and safety assessment: A review. *Trends in Food Science and Technology*, *95*, 149-161.

Marand, S. A., Almasi, H., and Marand, N. A. (2021). Chitosan-based nanocomposite films incorporated with NiO nanoparticles: Physicochemical, photocatalytic and antimicrobial properties. *International Journal of Biological Macromolecules*, *190*, 667-678.

Mellinas, A. C., Jiménez, A., and Garrigós, M. C. (2020). Pectin-based films with cocoa bean shell waste extract and ZnO/Zn-NPs with enhanced oxygen barrier, ultraviolet screen and photocatalytic properties. *Foods*, *9* (11), 1572.

Nalbandi, H., Seiiedlou Heris, S. S., and Ahmadi Gheshlagh, P. (2021). Determination of optimum performance characteristics of combined infrared-convectional dryer in drying of banana slices. *Agricultural Mechanization*, *6* (1), 11-21.

Omerović, N., Djisalov, M., Živojević, K., Mladenović, M., Vunduk, J., Milenković, I., Knežević, N. Ž., Gadjanski, I., and Vidić, J. (2021). Antimicrobial nanoparticles and biodegradable polymer composites for active food packaging applications. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, *20*(3), 2428-2454.

Otálora González, C. M., Schelegueda, L. I., Pizones Ruiz-Henestrosa, V. M., Campos, C. A., Basanta, M. F., and Gerschenson, L. N. (2022). Cassava starch films with anthocyanins and betalains from agroindustrial by-products: their use for intelligent label development. *Foods*, *11*(21), 3361.

Pilevar, Z., Bahrami, A., Beikzadeh, S., Hosseini, H., and Jafari, S. M. (2019). Migration of styrene monomer from polystyrene packaging materials into foods: Characterization and safety evaluation. *Trends in Food Science and Technology*, *91*, 248-261.

Pirsa, S., Karimi Sani, I., Pirouzifard, M. K., and Erfani, A. (2020). Smart film based on chitosan/Melissa officinalis essences/pomegranate peel extract to detect cream cheeses spoilage. *Food Additives and Contaminants: Part A*, *37*(4), 634-648.

Pirsa, S., Khodaei, S. M., Karimi Sani, I., Ghasemi, Y., Jawhar, Z. H., and Eghbaljoo, H. (2023). Hydrogels and biohydrogels: investigation of origin of production, production methods, and application. *Polymer Bulletin*, *80*(10), 10593-10632.

Pirsa, S., Sani, I. K., and Mirtalebi, S. S. (2022). Nano-biocomposite based color sensors: Investigation of structure, function, and applications in intelligent food packaging. *Food Packaging and Shelf Life*, *31*, 100789.

Rezaei, M., Pirsa, S., and Chavoshizadeh, S. (2020). Photocatalytic/antimicrobial active film based on wheat gluten/ZnO nanoparticles. *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials*, *30*(7), 2654-2665.

Ribeiro, A. M., Estevinho, B. N., and Rocha, F. (2021). Preparation and incorporation of functional ingredients in edible films and coatings. *Food and bioprocess Technology*, *14*, 209-231.

Sabet, M., and Mahdavi, K. (2019). Green synthesis of high photoluminescence nitrogen-doped carbon quantum dots from grass via a simple hydrothermal method for removing organic and inorganic water pollutions. *Applied surface Science*, *463*, 283-291.

Salgado, P. R., Ortiz, C. M., Musso, Y. S., Di Giorgio, L., and Mauri, A. N. (2015). Edible films and coatings containing bioactives. *Current Opinion in Food Science*, *5*, 86-92.

Sani, I. K., and Alizadeh, M. (2022). Isolated mung bean protein-pectin nanocomposite film containing true cardamom extract microencapsulation/CeO_2 nanoparticles/graphite carbon quantum dots: Investigating fluorescence, photocatalytic and antimicrobial properties. *Food Packaging and Shelf Life*, *33*, 100912.

Sani, I. K., Aminoleslami, L., Mirtalebi, S. S., Sani, M. A., Mansouri, E., Eghbaljoo, H., Jalil, A. T., Thanoon, R. D., Khodaei, S. M., and Mohammadi, F. (2023). Cold plasma technology: Applications in improving edible films and food packaging. *Food Packaging and Shelf Life*, *37*, 101087.

Sani, I. K., Marand, S. A., Alizadeh, M., Amiri, S., and Asdagh, A. (2021). Thermal, mechanical, microstructural and inhibitory characteristics of sodium caseinate based bioactive films reinforced by ZnONPs/encapsulated Melissa officinalis essential oil. *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials*, *31*, 261-271.

Sani, I. K., Masoudpour-Behabadi, M., Sani, M. A., Motalebinejad, H., Juma, A. S., Asdagh, A., Eghbaljoo, H., Khodaei, S. M., Rhim, J.-W., and Mohammadi, F. (2023). Value-added utilization of fruit and vegetable processing by-products for the manufacture of biodegradable food packaging films. *Food Chemistry*, *405*, 134964.

Sani, I. K., Pirsa, S., and Tağı, Ş. (2019). Preparation of chitosan/zinc oxide/Melissa officinalis essential oil nano-composite film and evaluation of physical, mechanical and antimicrobial properties by response surface method. *Polymer Testing*, *79*, 106004.

Sendão, R. M., Esteves da Silva, J. C., and Pinto da Silva, L. (2023). Applications of fluorescent carbon dots as photocatalysts: A Review. *Catalysts*, *13*(1), 179.

Soleimani-Rambod, A., Zomorodi, S., Naghizadeh Raeisi, S., Khosrowshahi Asl, A., and Shahidi, S.-A. (2018). The effect of xanthan gum and flaxseed mucilage as edible coatings in cheddar cheese during ripening. *Coatings*, *8*(2), 80.

Sun, X., Zhang, H., Wang, J., Dong, M., Jia, P., Bu, T., Wang, Q., and Wang, L. (2021). Sodium alginate-based nanocomposite films with strong antioxidant and antibacterial properties enhanced by polyphenol-rich kiwi peel extracts bio-reduced silver nanoparticles. *Food Packaging and Shelf Life*, *29*, 100741.

Tavassoli-Kafrani, E., Shekarchizadeh, H., and Masoudpour-Behabadi, M. (2016). Development of edible films and coatings from alginates and carrageenans. *Carbohydrate Polymers*, *137*, 360-374.

Tian, S., Feng, Y., Zheng, Z., and He, Z. (2023). TiO_2-Based photocatalytic coatings on glass substrates for environmental applications. *Coatings*, *13*(8), 1472.

Wang, L., Liu, X., Qi, P., Sun, J., Jiang, S., Li, H., Gu, X., and Zhang, S. (2022). Enhancing the thermostability, UV shielding and antimicrobial activity of transparent chitosan film by carbon quantum dots containing N/P. *Carbohydrate Polymers*, *278*, 118957.

u, C., Anusuyadevi, P. R., Aymonier, C., Luque, R., and Marre, S. (2019). Nanostructured materials for photocatalysis. *Chemical Society Reviews*, *48*(14), 3868-3902.

Yao, X., Hu, H., Qin, Y., and Liu, J. (2020). Development of antioxidant, antimicrobial and ammonia-sensitive films based on quaternary ammonium chitosan, polyvinyl alcohol and betalains-rich cactus pears (Opuntia ficus-indica) extract. *Food Hydrocolloids*, *106*, 105896.

Yong, H., and Liu, J. (2020). Recent advances in the preparation, physical and functional properties, and applications of anthocyanins-based active and intelligent packaging films. *Food Packaging and Shelf Life*, *26*, 100550.

Yu, D., Basumatary, I. B., Liu, Y., Zhang, X., Kumar, S., Ye, F., and Dutta, J. (2024). Chitosan-photocatalyst nanocomposite on polyethylene films as antimicrobial coating for food packaging. *Progress in Organic Coatings*, *186*, 108069.

Yu, X., Zhong, T., Zhang, Y., Zhao, X., Xiao, Y., Wang, L., Liu, X., and Zhang, X. (2021). Design, preparation, and application of magnetic nanoparticles for food safety analysis: a review of recent advances. *Journal of Agricultural and food Chemistry*, *70*(1), 46-62.

Zhai, X., Shi, J., Zou, X., Wang, S., Jiang, C., Zhang, J., Huang, X., Zhang, W., and Holmes, M. (2017). Novel colorimetric films based on starch/polyvinyl alcohol incorporated with roselle anthocyanins for fish freshness monitoring. *Food Hydrocolloids*, *69*, 308-317.

Zhang, K., Huang, T.-S., Yan, H., Hu, X., and Ren, T. (2020). Novel pH-sensitive films based on starch/polyvinyl alcohol and food anthocyanins as a visual indicator of shrimp deterioration. *International Journal of Biological Macromolecules*, *145*, 768-776.

Zhang, N., Guo, Y., Guo, Y., Dai, Q., Wang, L., Dai, S., and Zhan, W. (2023). Synchronously constructing the optimal redox-acidity of sulfate and RuOx Co-modified CeO2 for catalytic combustion of chlorinated VOCs. *Chemical Engineering Journal*, *454*, 140391.

Zhang, P., and Lou, X. W. (2019). Design of heterostructured hollow photocatalysts for solar-to-chemical energy conversion. *Advanced Materials*, *31*(29), 1900281.

Zhang, Z., Zhang, H., Tian, D., Phan, A., Seididamyeh, M., Alanazi, M., Xu, Z. P., Sultanbawa, Y., and Zhang, R. (2024). Luminescent sensors for residual antibiotics detection in food: Recent advances and perspectives. *Coordination Chemistry Reviews*, *498*, 215455.

Zhao, Q., Song, W., Zhao, B., and Yang, B. (2020). Spectroscopic studies of the optical properties of carbon dots: recent advances and future prospects. *Materials Chemistry Frontiers*, *4*(2), 472-488.

Ziental, D., Czarczynska-Goslinska, B., Mlynarczyk, D. T., Glowacka-Sobotta, A., Stanisz, B., Goslinski, T., and Sobotta, L. (2020). Titanium dioxide nanoparticles: prospects and applications in medicine. *Nanomaterials*, *10*(2), 387.

Zomorodi, S., and Aberun, N. (2015). Increase the survival of *Lactobacillus acidophilus* and improved quality properties of senbiotic yogurt using apple and wheat fibers. *Journal of food Science and Technology (Iran)*, *12*(48), 203-214.

Food Engineering Research/Vol.26/No.78/ Spring& Summer 2025/P: 73-92

Journal Home page: https://fooder.areeo.ac.ir/

Original Research

A review study on fluorescence and photocatalytic properties and magnetic absorbent nanoparticles in edible films for food packaging

Iraj Karimi Sani*, Nadereh Tabrizi, Bahram Hassani, Anis Talebi, Shahin Zomorodi, Farid Amirshaghaghi

Corresponding Author: Agricultural Engineering Research Department, West Azerbaijan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Urmia, Iran
Email: eng.irajkarimi@gmail.com
Received:25 September 2024 **Accepted**: 19 April 2025
http://doi: 10.22092/FOODER.2025.367139.1405

Abstract

In food research, packaging is very important because it protects and preserves food. The use of traditional petroleum polymers as the main packaging has been common, but consumers are also concerned about the environmental and health impacts of these polymers today. Therefore, there is a need for alternatives with biodegradable and renewable properties. Edible films using natural macromolecules have been proposed as alternatives to synthetic polymers. On the other hand, magnetic nanoparticles have been considered due to their superparamagnetic properties, large surface area, biocompatibility, non-toxicity, and reusability. Also, photocatalyst compounds can transform solar energy for use in oxidation activities in various industries such as water and air purification, hydrogen production; so that the production of edible films with photocatalytic and fluorescent properties can have advantages such as increasing antioxidant capacity, increasing antimicrobial properties, and improving the shelf life of the food product. Finally, the use of nanotechnology in these edible films enhances physical and chemical properties, improves food shelf life, and increases packaging efficiency; therefore, this research investigates these edible films containing magnetic nanoparticles with fluorescent and photocatalytic properties for food packaging.

Keywords: fluorescence, photocatalyst, magnetic nanoparticles, edible film, packaging

© 2023,The Author(s). Published by Agricultural Engineering Research Institute. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/