

Antimicrobial Coatings Used in Food Packaging

Sousan Rasouli

Department of Nanomaterials and Nanocoatings, Institute for Color Science and Technology, P. O. Box:16765-654, Tehran-Iran.

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 10-01-2026

Accepted: 04-05-2026

Available online:08-09-2026

Print ISSN: 2251-7278

Online ISSN: 2383-2223

DOI: 10.30509/jscw.2026.167755.1277

Keywords:

Polymer coating

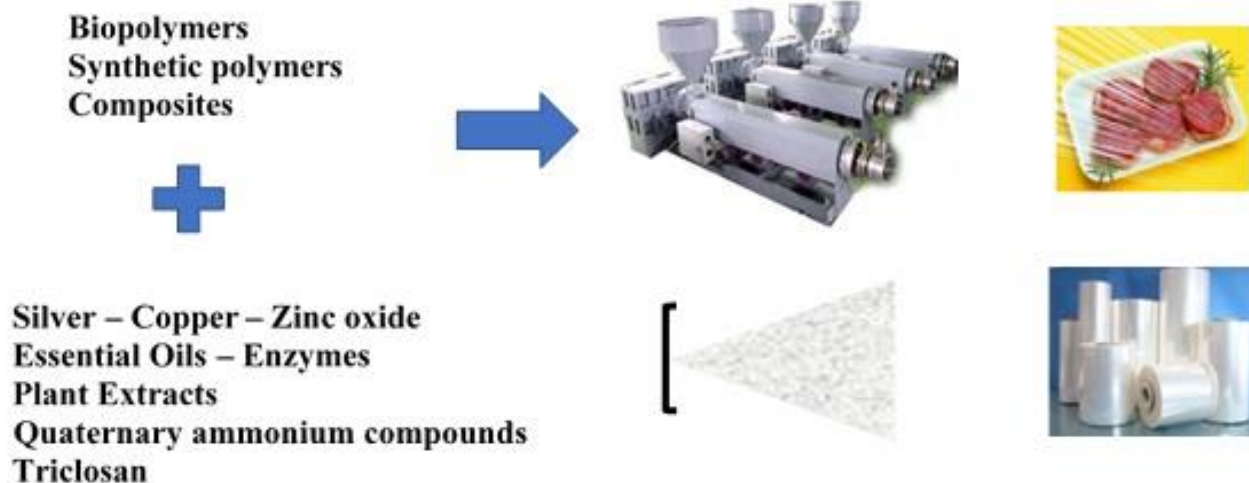
Packaging

Food industry

Antimicrobial

ABSTRACT

Food safety has always been a major concern in the food supply chain. Today, foodborne diseases and ensuring microbial safety in the food industry have become more important than ever. This article reviews recent advances in antimicrobial polymer coatings and their role in minimizing microbial contamination. In this regard, the types of coatings used in the food and packaging industries and their antimicrobial mechanisms are evaluated. It also evaluates various antimicrobial agents, including metal nanoparticles, plant-derived compounds, and synthetic chemicals, in food packaging systems. In this regard, the advantages and disadvantages of each category of antimicrobial coatings and agents are investigated.



پوشش‌های ضد میکروبی مورد استفاده در بسته‌بندی مواد غذایی

سوسن رسولی

دانشیار، گروه نانوفناوری رنگ، پژوهشکده پوشش‌های سطح و فناوریهای نوین، پژوهشگاه رنگ، تهران، ایران، صندوق پستی: ۶۵۴-۱۶۷۶۵.

چکیده

امنیت غذایی همواره یکی از نگرانی‌های اصلی در تامین زنجیره غذایی بوده و امروزه بیماری‌های ناشی از فساد مواد غذایی و تضمین ایمنی میکروبی در صنایع غذایی بیش از هر زمان دیگری اهمیت یافته است. این مقاله، پیشرفت‌های اخیر در پوشش‌های پلیمری ضد میکروبی و نقش آنها در به حداقل رساندن آلودگی میکروبی را بررسی می‌کند. در این راستا، انواع پوشش‌های مورد استفاده در صنایع غذایی و بسته‌بندی و سازوکارهای ضد میکروبی آنها ارزیابی می‌شود. همچنین، عوامل ضد میکروبی مختلف، از جمله نانوذرات فلزی، ترکیبات مشتق‌شده از گیاهان و مواد شیمیایی مصنوعی در سیستم‌های بسته‌بندی غذایی ارزیابی می‌شوند. در این راستا، مزایا و معایب هر دسته از پوشش‌ها و عوامل ضد میکروبی بررسی می‌شوند.

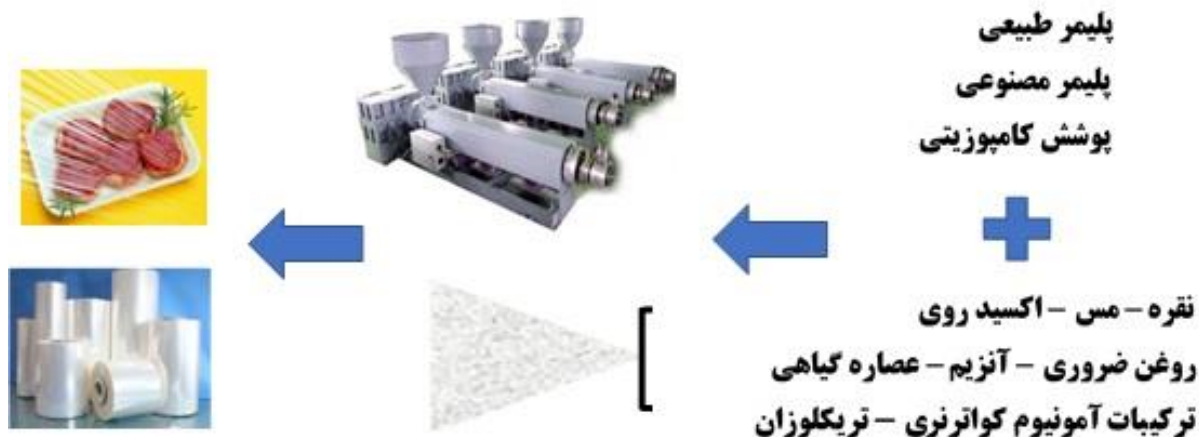
اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۰/۲۰
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۲/۱۴
در دسترس به صورت الکترونیکی: ۱۴۰۵/۰۶/۱۷
شاپا چاپی: ۲۲۵۱-۲۲۷۸
شاپا الکترونیکی: ۲۳۸۳-۲۲۲۳

DOI: 10.30509/jscw.2026.167755.1277

واژه‌های کلیدی:

پوشش پلیمری
بسته‌بندی
صنایع غذایی
ضد میکروبی



۱- مقدمه

بشر از دیرباز با مشکل نگهداری مواد غذایی روبرو بوده است، زیرا میکروارگانیسم‌های موجود در محیط به داخل مواد نفوذ کرده و با استفاده از منبع غذایی شروع به تکثیر نموده و پس از مدتی غذا فاسد و غیرقابل استفاده می‌گردد. از یک طرف بیماری‌های ناشی از فساد غذا سلامت عمومی را به خطر می‌اندازند و از طرف دیگر بار اقتصادی قابل توجهی را به جوامع تحمیل می‌کنند (۱). یکی از عوامل اصلی این چالش‌ها، آلودگی میکروبی مواد غذایی با سطوحی است که به‌طور کافی تمیز نشده‌اند. در این راستا، متداولترین عوامل بیماری‌زا شامل گونه‌های *سالمونلا*^۱، *شریشیا کلی*^۲ و *لیستریا مونوسیتوژنز*^۳ می‌باشند که نه تنها خطرات جدی برای سلامتی مصرف‌کنندگان ایجاد می‌کنند، بلکه زنجیره‌های تأمین و توزیع را مختل می‌کنند (۲). یکی از راهکارهای مقابله با چنین آلودگی‌هایی استفاده از بسته‌بندی فعال می‌باشد. بسته‌بندی فعال به هر نوعی از بسته‌بندی گفته می‌شود که با تغییر شرایط موجب افزایش عمر نگهداری مواد غذایی می‌شود (۳). یک نوآوری کاربردی و مهم در این زمینه، توسعه پوشش‌های پلیمری ضد میکروبی است که با عملیات سطحی ویژه روی مواردی مانند تسمه نقاله، فیلم‌های بسته‌بندی، تخته‌های برش و ظروف نگهداری اعمال می‌شوند (۴). این پوشش‌ها به عنوان یک لایه محافظ اضافی عمل کرده و در کنار پروتکل‌های استاندارد تمیزکردن، مستقیماً با تهدیدات میکروبی مبارزه می‌کنند.

پوشش‌های پلیمری ضد میکروبی از اختلاط عوامل ضد میکروبی مختلف، از ترکیبات طبیعی و مواد شیمیایی مصنوعی گرفته تا نانوذرات مبتنی بر فلزات، با بسترهای پلیمری ساخته می‌شوند. این مواد برای ارائه عملکرد ضد میکروبی پایدار، جلوگیری از توسعه فیلم زیستی و حفظ تمیزی سطوح حساس در تماس با مواد غذایی مهندسی شده‌اند (۵). در مقایسه با سایر رویکردهای بسته‌بندی، مانند جاذب‌های اکسیژن، جاذب‌های گاز یا سیستم‌های هوشمند حسگر فساد، پوشش‌های پلیمری ضد میکروبی بسته‌بندی فعال به عنوان رویکردی مستقیم‌تر و کارآمدتر برای کنترل میکروبی مطرح می‌باشد (۶).

نوع آلاینده میکروبی موجود در سطوح تماس با مواد غذایی به‌طور قابل توجهی بر اثربخشی پوشش‌های ضد میکروبی تأثیر می‌گذارد. میکروارگانیسم‌های مختلف، از جمله گونه‌های مختلف باکتری‌ها و قارچ‌ها، حساسیت‌های متفاوتی نسبت به عوامل ضد میکروبی نشان می‌دهند. به عنوان مثال، باکتری‌های گرم مثبت ممکن است به دلیل تفاوت در ساختار دیواره سلولی خود، در مقایسه با باکتری‌های گرم منفی، به عوامل ضد میکروبی یکسان واکنش متفاوتی نشان دهند. به طور مشابه، گونه‌های قارچی ممکن است مقاومت یا حساسیت متفاوتی

نسبت به عوامل ضد میکروبی طبیعی یا مصنوعی خاص نشان دهند (۷). علاوه بر این، نوع فیلم پلیمری هم می‌تواند اثربخشی عوامل ضد میکروبی را پیچیده کند، زیرا فیلم یک مانع محافظ ایجاد می‌کند که می‌تواند میکروارگانیسم‌ها را از عملکرد عوامل ضد میکروبی محافظت کند. به این ترتیب، شناخت ویژگی‌های خاص آلاینده‌های میکروبی موجود در یک محیط معین برای انتخاب مناسب‌ترین پوشش و عامل ضد میکروبی برای کنترل مؤثر آلودگی ضروری است. با متناسب‌کردن انتخاب پوشش با مشخصات میکروبی مورد انتظار، تولیدکنندگان می‌توانند ایمنی مواد غذایی را افزایش داده و خطر بیماری‌های ناشی از غذا را به حداقل برسانند (۸). یکی از مهم‌ترین کاربردهای پوشش‌های ضد میکروبی در پوشش‌دهی انواع کاغذهای مورد استفاده در صنایع غذایی می‌باشد که شامل کاغذ کرافت، کاغذ گلابسین، کاغذ ضد چربی، کاغذ مومی و کاغذهای پوستی گیاهی است.

در این مقاله پوشش‌های مورد استفاده در صنایع غذایی و استفاده از عوامل ضد میکروبی در آنها مورد بررسی قرار می‌گیرند.

۲- انواع پوشش‌های پلیمری ضد میکروبی در صنایع غذایی

این بخش به بررسی انواع مختلف پوشش‌های پلیمری ضد میکروبی می‌پردازد که به سه گروه اصلی تقسیم می‌شوند: پوشش‌های مبتنی بر پلیمر زیستی طبیعی، پوشش‌های پلیمری مصنوعی و پوشش‌های هیبریدی یا کامپوزیتی.

۲-۱- پوشش‌های بر پایه بایوپلیمرهای طبیعی

پوشش‌های مبتنی بر پلیمرهای زیستی طبیعی از منابع زیستی مانند گیاهان، حیوانات و میکروارگانیسم‌ها مشتق شده و به دلیل زیست‌سازگاری، زیست تخریب‌پذیری و خواص ضد میکروبی ذاتی خود توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند (۹). این پوشش‌ها به‌ویژه برای صنایع غذایی ارزشمند هستند، زیرا موادی بی‌خطر برای مصرف انسان طبقه‌بندی شده و سمیت کمی برای مصرف‌کنندگان یا محیط‌زیست دارند. این امر موجب شده است که در عین کارایی بالا به عنوان جانشین برای پوشش‌های ضد میکروبی مصنوعی نگرانی خاصی در مورد پایداری زیست‌محیطی و بقایای شیمیایی ایجاد نمی‌کنند (۱۰). از جمله پلیمرهای زیستی طبیعی مهم که به عنوان پوشش‌های ضد میکروبی در کاربردهای غذایی استفاده می‌شوند می‌توان به کیتوسان، آلژینات، ژلاتین و مشتقات سلولزی اشاره کرد. این پلیمرهای

³ *Listeria monocytogenes*

¹ *Salmonella*

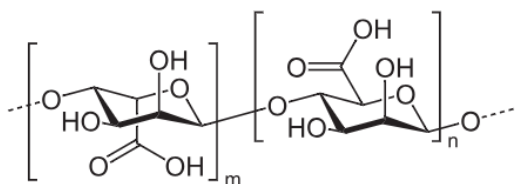
² *Escherichia coli*

با این حال، معایب آنها شامل مقاومت محدود در برابر آب و حساسیت بالقوه برای افراد حساس به مواد مشتق شده از صدف است. در مراحل آماده‌سازی آن باید به تنظیم pH دقت ویژه اعمال گردد زیرا حلالیت و اثربخشی کیتوسان وابسته به pH است و معمولاً نیاز به شرایط اسیدی دارد (۱۶).

۲-۱-۲- آلژینات

آلژینات (یا آلژینیک اسید)، یک پلی‌ساکارید مشتق شده از جلبک دریایی قهوه‌ای، یکی دیگر از پلیمرهای زیستی طبیعی پرکاربرد در پوشش‌های غذایی است (شکل ۲).

مزایای اصلی آلژینات شامل خواص عالی تشکیل فیلم، زیست‌سازگاری و توانایی جمع‌آوری هیدروژل‌ها در صورت وجود یون‌های دو ظرفیتی مانند کلسیم است (۱۷). اگرچه خود آلژینات فعالیت ضد میکروبی قوی ندارد، اما می‌تواند به عنوان یک بستر حامل موثر برای ترکیب عوامل ضد میکروبی مانند اسیدهای آلی، روغن‌های ضروری یا باکتریوسین‌ها استفاده شود. پوشش‌های آلژینات برای میوه‌ها و سبزیجات تازه برش داده شده و همچنین محصولات ماهی و مرغ استفاده شده‌اند تا رطوبت را بهبود بخشیده و رشد میکروبی را مهار کنند. توانایی آلژینات در تشکیل یک فیلم ژل مانند، آن را برای کنترل آزادسازی عوامل ضد میکروبی در طول زمان ایده‌آل کرده و یک اثر ضد میکروبی پایدار ایجاد می‌کند. به عنوان مثال، پوشش‌های آلژینات همراه با نیسین (یک باکتریوسین) نتایج امیدوارکننده‌ای در مهار مونوسیتوزن^۱ یک پاتوژن اصلی منتقل شده از غذا، نشان داده‌اند (۱۸). علاوه بر اثربخشی ضد میکروبی، پوشش‌های آلژینات با کاهش از دست دادن رطوبت و اکسایش، به حفظ بافت و تازگی غذاهای فاسدشدنی کمک می‌کنند. پوشش‌های آلژینات مزایایی مانند حفظ رطوبت، ظرفیت تشکیل ژل و آزادسازی کنترل شده مواد ضد میکروبی را ارائه می‌دهند. آن‌ها معمولاً برای میوه‌ها (مثلاً مکعب‌های خربزه)، سبزیجات (مثلاً هویج) و غذاهای دریایی (مثلاً میگو) استفاده می‌شوند (۱۹). معایب آن‌ها شامل مقاومت مکانیکی پایین و خواص ضد میکروبی ضعیف بدون افزودنی‌ها است. البته آماده‌سازی هم باید با دقت کنترل شود تا از یکنواختی اطمینان حاصل شود.



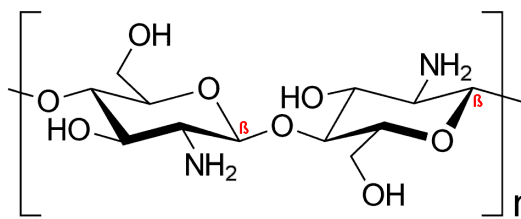
شکل ۲: ساختار آلژینات (۱۷).
Figure 2: Structure of Alginate (17).

زیستی نه تنها مانعی مؤثر در برابر آلودگی میکروبی ایجاد می‌کند، بلکه به دلیل زیست‌تخریب‌پذیری خود، از پایداری زیست‌محیطی نیز پشتیبانی می‌کند. با تطبیق این پوشش‌ها با عوامل ضد میکروبی طبیعی مختلف، بخش مواد غذایی استاندارد و همچنین ماندگاری مواد را افزایش می‌دهد و تقاضای مصرف‌کنندگان برای راه‌حل‌های ایمن‌تر و طبیعی‌تر برای نگهداری مواد غذایی را برآورده می‌کند (۱۱).

۲-۱-۱- کیتوسان

کیتوسان یا چیتوسان یا کیتوزان، پلی‌ساکاریدی مشتق شده از کیتین (که عمدتاً در اسکلت خارجی سخت پوستان و حشرات یافت می‌شود)، یکی از زیست‌پلیمرهای مورد مطالعه برای کاربردهای ضد میکروبی است. این ماده دارای ساختار منحصر به فردی با گروه‌های آمینی است که قابلیت‌های ضد میکروبی، به ویژه در برابر طیف وسیعی از باکتری‌ها، قارچ‌ها و مخمرها را فراهم می‌کند (۱۲). در شکل ۱ ساختار کیتوسان آورده شده است.

در مورد ویژگی ضد میکروبی کیتوسان چنین به نظر می‌رسد که سازوکار ضد میکروبی آن شامل برهم‌کنش‌های بین گروه‌های آمینی با بار مثبت و دیواره‌های سلولی میکروبی با بار منفی است که منجر به اختلال در دیواره سلولی و در نهایت مرگ سلول می‌شود (۱۳). همچنین، کیتوسان می‌تواند یک لایه نیمه‌تراوا تشکیل دهد که نفوذپذیری اکسیژن را مهار کرده و اکسایش و فساد را کاهش دهد، این امر در به حداقل رساندن ضایعات مواد غذایی با افزایش طول عمر مفید آن بسیار موثر است (۱۴). اثر ضد میکروبی کیتوسان را می‌توان با اصلاح آن با استفاده از سایر عوامل طبیعی، مانند روغن‌های ضروری (مانند روغن آویشن یا پونه کوهی) یا ترکیب نانوذرات (مانند نقره یا اکسید روی) تقویت کرد. این اصلاحات خواص مکانیکی پوشش را بهبود بخشیده و طیف ضد میکروبی آن را گسترش می‌دهند (۱۵). مزایای پوشش‌های کیتوسان شامل فعالیت ضد میکروبی با طیف گسترده، زیست‌تخریب‌پذیری و خواص مانع اکسیژن است. آن‌ها به‌ویژه بر روی میوه‌ها (مانند توت فرنگی، سیب)، سبزیجات (مانند کاهو) و گوشت‌ها (مانند مرغ، گوشت گاو) مؤثر هستند.



شکل ۱: ساختار کیتوسان (۱۲).
Figure 1: Structure of Chitosan (12).

¹ *L. monocytogenes*

۲-۱-۳- ژلاتین

ژلاتین، پروتئینی مشتق شده از آب کافت کلاژن در بافت‌های حیوانی، به دلیل تشکیل لایه نازک با کیفیت بالا شناخته شده است و اغلب به عنوان یک پوشش خوراکی در صنایع غذایی مورد استفاده قرار می‌گیرد (شکل ۳).

ترکیب طبیعی ژلاتین، آن را با طیف وسیعی از عوامل ضد میکروبی بسیار سازگار می‌کند و امکان ایجاد یک اثر ضد میکروبی قابل تنظیم را بر اساس الزامات خاص ایمنی مواد غذایی فراهم می‌کند (۲۰). پوشش‌های مبتنی بر ژلاتین را می‌توان با افزودن اسیدهای آلی، آنزیم‌ها یا روغن‌های ضروری برای هدف قرار دادن عوامل بیماری‌زای مختلف، از جمله باکتری‌ها و قارچ‌ها، بهبود بخشید. این پوشش‌ها اغلب برای محصولات گوشتی، غذاهای دریایی و لبنیات که به‌ویژه در برابر فساد و آلودگی آسیب‌پذیر هستند استفاده می‌شوند. خاصیت ضد میکروبی پوشش‌های ژلاتینی از عوامل موجود در بستر ژلاتین نه خود ژلاتین ناشی می‌شود. به عنوان مثال، فیلم‌های ژلاتینی حاوی اسانس دارچین یا میخک، فعالیت ضد باکتری قوی در برابر *شرشیا کلی* و *استافیلوکوکوس اورئوس* نشان داده‌اند. علاوه بر این، فیلم‌های ژلاتینی می‌توانند به عنوان مانعی در برابر رطوبت و اکسیژن عمل کنند که با کاهش اکسایش لیپیدها و رشد میکروبی به حفظ کیفیت محصول غذایی کمک می‌کند (۲۱). مزایای پوشش‌های ژلاتینی شامل توانایی عالی در تشکیل فیلم، سازگاری با مواد ضد میکروبی متنوع و خواص خوب مانع اکسیژن است. آنها برای گوشت (مانند سوسیس)، غذاهای دریایی (مانند ماهی سالمون) و لبنیات (مانند پنیر) مناسب هستند. با این حال، محدودیت‌های آنها شامل مقاومت ضعیف در برابر آب و حساسیت به رطوبت بالا است (۲۲). به علاوه، در طول آماده‌سازی دمای حرارتی باید کنترل شود تا از ژل شدن زودرس یا تخریب افزودنی‌های کاربردی جلوگیری شود.

۲-۱-۴- مشتقات سلولزی

سلولز، یک پلیمر طبیعی فراوان است که از اجزای دیواره‌های سلولی گیاهان و مشتقات آنها مانند متیل سلولز، سلولز اصلاح‌شده (هیدروکسی پروپیل متیل سلولز) به دست می‌آید.

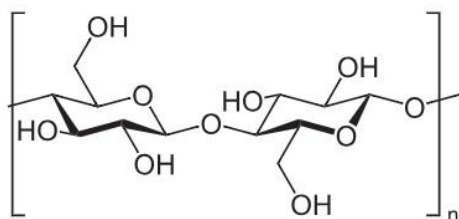
به دلیل توانایی عالی در تشکیل فیلم و زیست تخریب‌پذیری، سلولز به طور گسترده در پوشش‌های غذایی کاربرد دارد (۲۳). شکل ۴ ساختار سلولز را نشان می‌دهد:

اگرچه سلولز خالص فعالیت ضد میکروبی ذاتی از خود نشان نمی‌دهد، اما ساختار آن امکان عامل‌دار کردن آن با ترکیبات ضد میکروبی مختلف برای ایجاد پوشش‌های مؤثر را فراهم می‌کند. به عنوان مثال، فیلم‌های مبتنی بر سلولز را می‌توان با اسیدهای آلی مانند اسید سیتریک یا لاکتیک ترکیب کرد یا با روغن‌های ضروری مانند روغن رزماری یا روغن درخت چای آغشته کرد تا از رشد میکروبی روی سطوح مواد غذایی جلوگیری شود (۲۴). یکی از مزایای مشتقات سلولز مانند کربوکسی متیل سلولز، شفافیت و انعطاف‌پذیری آنهاست که آنها را برای پوشش محصولات تازه بدون تأثیر بر جذابیت دیداری آنها مناسب می‌کند. علاوه بر این، پوشش‌های سلولزی به کاهش از دست دادن رطوبت کمک می‌کنند و در نتیجه بافت و تازگی محصول را حفظ می‌کنند. یافته‌های تحقیقات نشان می‌دهد که پوشش‌های مبتنی بر سلولز که با روغن‌های ضروری مخلوط شده‌اند، می‌توانند رشد پاتوژن‌های رایج ناشی از مواد غذایی، از جمله گونه‌های *سالمونلا لیستریا* را مهار کنند (۱۱).

پوشش‌های مشتق سلولز مزایایی مانند زیست تخریب‌پذیری، شفافیت دیداری و سازگاری با انواع مواد ضد میکروبی را ارائه می‌دهند. آنها به ویژه روی میوه‌ها (مانند سیب، انبه)، سبزیجات (مانند خیار) و محصولات نانوائی مؤثر هستند (۲۵). معایب آنها شامل اثر ضد میکروبی محدود آنها در صورت اصلاح‌نشدن و حساسیت به رطوبت است (۲۶). به علاوه، آماده‌سازی آنها نیاز به پراکندگی دقیق افزودنی‌های آب‌گریز (مانند روغن‌ها) برای حفظ همگنی فیلم و اطمینان از کاربرد یکنواخت سطح دارد (۲۷).

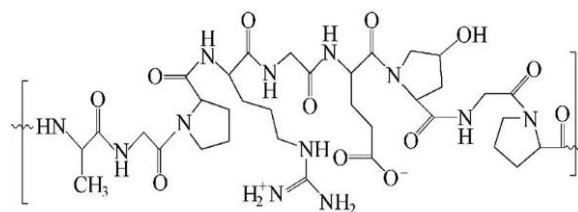
۲-۲- پوشش‌های ساخته شده از پلیمرهای مصنوعی

پوشش‌های پلیمری مصنوعی به دلیل دوام، انعطاف‌پذیری و تطبیق‌پذیری خوب به طور گسترده در صنایع غذایی مورد استفاده قرار می‌گیرند. برخلاف پوشش‌های مبتنی بر پلیمرهای زیستی طبیعی، پلیمرهای مصنوعی از منابع پتروشیمی مشتق شده و برای ارائه خواص ویژه‌ای مهندسی شده‌اند.



شکل ۴: ساختار سلولز (۲۳).

Figure 4: Structure of Cellulose (23).



شکل ۳: ساختار ژلاتین (۲۰).

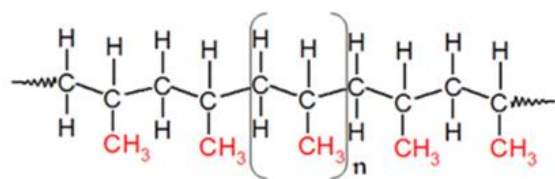
Figure 3: Structure of Gelatine (20).

این عوامل را می‌توان با روی سطح پلی اتیلن پوشش داد یا در ساختار آن جاسازی کرد (۳۱). پوشش‌های پلی اتیلن با خواص ضد میکروبی، تکثیر عوامل بیماری‌زا، مانند اشرسیا کلی، *اِل منوسیتوزئوس* و *استافیلوکوکوس اورئوس* را روی سطوح مواد غذایی را کاهش می‌دهند. به این ترتیب، بی‌اثر بودن و نفوذپذیری پایین پلی اتیلن، آن را به ماده‌ای عالی برای محافظت از مواد غذایی در برابر از دست دادن رطوبت تبدیل می‌کند، امری که برای حفظ تازگی محصولات مانند کالاهای پخته‌شده، محصولات تازه و لبنیات بسیار مهم است. با این حال، با وجود انعطاف‌پذیری و مقاومت برتر در برابر رطوبت، پلی اتیلن زیست تخریب‌پذیر نیست و نگرانی‌هایی را در مورد پایداری زیست محیطی آن در مقایسه با جایگزین‌های پلیمر زیستی ایجاد می‌کند (۳۱).

۲-۲-۲- پلی پروپیلن (PP)

پلی پروپیلن یکی دیگر از پلیمرهای مصنوعی است که به طور گسترده در بسته‌بندی مواد غذایی استفاده می‌شود. پلی پروپیلن که به دلیل شفافیت، مقاومت شیمیایی و پایداری حرارتی شناخته شده است، به ویژه برای کاربردهایی که شامل پردازش یا استریلیزه شدن در دمای بالا هستند، مانند ظروف غذای قابل استفاده در مایکروویو، مناسب است (شکل ۶).

برخلاف پلی اتیلن، پلی پروپیلن نقطه ذوب بالاتری دارد که آن را برای بسته‌بندی‌های پر کردن داغ و ظروف استریل مناسب‌تر می‌کند. PP در برابر تنش و همچنین ترک خوردگی مقاوم نیست و این امر آن را قادر می‌سازد تا برای سطوح تماس با مواد غذایی که ممکن است بارها دست‌کاری یا نوسانات دما را تجربه کنند، درجه یک باشد. پلی پروپیلن را می‌توان با عوامل ضد میکروبی اصلاح کرد تا اثربخشی آن در نگهداری مواد غذایی افزایش یابد.



شکل ۶: ساختار و کاربرد پلی اتیلن در صنایع غذایی.

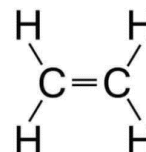
Figure 6: Structure and applications of polypropylene in food industries.

این پوشش‌ها محافظت قوی در برابر رطوبت، اکسیژن و آلودگی میکروبی ارائه می‌دهند که برای افزایش ماندگاری و ایمنی محصولات غذایی بسیار مهم است. پلیمرهای مصنوعی، مانند پلی اتیلن (PE)، پلی پروپیلن (PP) و پلی وینیل کلرید (PVC)، به دلیل پایداری، سهولت پردازش و سازگاری، از رایج‌ترین مواد مورد استفاده در بسته‌بندی مواد غذایی هستند (۲۸). این پلیمرها اغلب برای ترکیب عوامل ضد میکروبی اصلاح می‌شوند و آنها را به محلول‌های بسته‌بندی فعال تبدیل می‌کنند که به جلوگیری از رشد میکروبی روی سطوح مواد غذایی کمک می‌کنند.

۲-۲-۱- پلی اتیلن (PE)

پلی اتیلن به دلیل خواص عالی مانع رطوبت، انعطاف‌پذیری و مقاومت شیمیایی، یکی از پرکاربردترین پلیمرهای مصنوعی در بسته‌بندی مواد غذایی است. انواع مختلفی از پلی اتیلن، از جمله پلی اتیلن با چگالی کم (LDPE) و پلی اتیلن با چگالی بالا (HDPE) وجود دارد که هر کدام مزایای متمایزی را برای کاربردهای تماس با مواد غذایی ارائه می‌دهند (شکل ۵) (۲۹).

LDPE معمولاً برای کاربردهای بسته‌بندی انعطاف پذیر، مانند بسته‌بندی ها و آسترهای پلاستیکی استفاده می‌شود، در حالی که HDPE اغلب برای ظروف سفت و سخت مانند بطری‌های شیر استفاده می‌شود (۳۰). اثربخشی پلی اتیلن به عنوان یک پوشش ضد میکروبی ناشی از ظرفیت آن برای تزریق عوامل ضد میکروبی، مانند اسیدهای آلی، نانوذرات نقره می‌شود.



شکل ۵: ساختار و کاربرد فیلم پلی اتیلن در صنایع غذایی.

Figure 5: Structure and applications of polyethylene films in food. industrie

برای افزایش بیشتر قابلیت‌های محافظتی PVC، اغلب از عوامل ضد میکروبی برای ایجاد بسته‌بندی فعال استفاده می‌شود. عوامل ضد میکروبی مانند تریکلوزان، یون‌های نقره یا اسیدهای آلی را می‌توان در پوشش‌های PVC جاسازی کرد تا از رشد میکروبی روی سطوح مواد غذایی جلوگیری شود. این امر به ویژه در بسته‌بندی گوشت و ماهی تازه که بسیار مستعد آلودگی باکتری دارند، اهمیت دارد. با این حال، به دلیل نگرانی‌های بهداشتی و زیست‌محیطی مرتبط با برخی افزودنی‌ها، استفاده از PVC در بسته‌بندی مواد غذایی با بررسی دقیق‌تری روبرو است. در نتیجه، تولیدکنندگان در حال بررسی ترکیبات ضد میکروبی ایمن‌تر برای استفاده در پوشش‌های PVC هستند و اثربخشی ضد میکروبی را با ملاحظات ایمنی مصرف‌کننده متعادل می‌کنند (۳۵). در حالی که PVC خواص عالی مانع گاز را ارائه می‌دهد، زیست‌تخریب‌پذیری بسیار پایین آن و وجود افزودنی‌های بالقوه خطرناک، چالش‌های زیست‌محیطی و نظارتی قابل توجهی را ایجاد می‌کند. پوشش‌های پلیمری مصنوعی، استحکام مکانیکی عالی، عملکرد مانع و سازگاری ضد میکروبی عالی را نشان می‌دهند. با این حال، آنها به طور کلی در مقایسه با جایگزین‌های مبتنی بر پلیمر زیستی طبیعی، کمتر سازگار با محیط‌زیست هستند. این پیامدهای عملی باید در تغییر به سمت راهبردهای بسته‌بندی پایدار مواد غذایی در نظر گرفته شوند (۳۶).

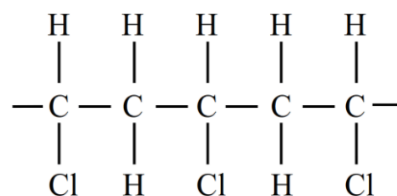
۳-۲- پوشش‌های کامپوزیتی و هیبریدی

پوشش‌های ضد میکروبی هیبریدی و ترکیبی، که پلیمرهای طبیعی و مصنوعی را ترکیب می‌کنند، به عنوان یک رویکرد امیدوارکننده و رو به رشد برای افزایش ماندگاری مواد غذایی ظهور کرده‌اند. این پوشش‌ها از بهترین خواص هر دو نوع ماده بهره می‌برند: زیست‌سازگاری و زیست‌تخریب‌پذیری پلیمرهای طبیعی، در کنار دوام، انعطاف‌پذیری و استحکام پلیمرهای مصنوعی. با ترکیب این خواص، پوشش‌های هیبریدی می‌توانند به افزایش اثربخشی ضد میکروبی، بهبود پایداری مکانیکی و افزایش ماندگاری مواد غذایی فاسد شدنی دست یابند (۳۷). هم‌افزایی بین پلیمرهای طبیعی و مصنوعی در عملکرد برتر پوشش‌های هیبریدی نقش اساسی دارد. ترکیب پلیمرهای زیستی، که ذاتاً ضد میکروبی هستند، با استحکام و خواص مانع پلیمرهای مصنوعی منجر به یک اثر دوگانه می‌شود که به طور قابل توجهی ایمنی مواد غذایی را افزایش داده و ماندگاری را افزایش می‌دهد. این اثرات هم‌افزایی به پوشش‌های هیبریدی اجازه می‌دهد تا نه تنها محافظت بهتری در برابر رشد میکروبی ارائه دهند، بلکه عملکرد مکانیکی و انعطاف‌پذیری مواد را نیز بهبود بخشند (۳۸). برای مثال، ترکیب کیتوسان-PE از خواص ضد میکروبی قوی کیتوسان بهره می‌برد و در عین حال از ویژگی‌های عالی PE در برابر رطوبت و اکسیژن نیز بهره می‌برد (۳۹). این امر باعث می‌شود که این ترکیب به ویژه در

ترکیبات مبتنی بر نقره، روغن‌های ضروری و کیتوسان با موفقیت در پلی‌پروپیلن گنجانده شده‌اند تا بسته‌بندی‌هایی ایجاد کنند که برای سرکوب رشد باکتری‌ها و همچنین قارچ‌ها طراحی شده‌اند. به عنوان مثال، مطالعات نشان داده‌اند که فیلم‌های پلی‌پروپیلن با نانوذرات نقره فعالیت ضد باکتری قوی در برابر عوامل بیماری‌زای رایج ناشی از غذا نشان می‌دهند. سرعت پایین انتقال رطوبت پلی‌پروپیلن همچنین آن را در حفظ بافت و رطوبت مواد غذایی مانند میوه‌های تازه، سبزیجات و گوشت‌ها بسیار مؤثر می‌کند. این ویژگی، همراه با پتانسیل آن برای اصلاح ضد میکروبی، پلی‌پروپیلن را به انتخابی همه‌کاره برای کاربردهای ایمنی مواد غذایی تبدیل می‌کند (۳۲). با این وجود، پایداری حرارتی بالای PP آن را برای کاربردهای گرم‌محور مطلوب‌تر می‌کند، اگرچه هنوز هم دارای نقطه ضعف تخریب محیطی ضعیف است (۳۳).

۲-۳- پلی وینیل کلرید (PVC)

پلی وینیل کلرید (PVC) پلیمری بادوام و همه‌کاره است که در کاربردهای متنوعی از جمله بسته‌بندی مواد غذایی استفاده می‌شود. PVC که به دلیل استحکام، شفافیت و انعطاف‌پذیری‌اش شناخته شده است (شکل ۷)، PVC که معمولاً در بسته‌بندی گوشت تازه، مرغ و محصولات کشاورزی، که در آن‌ها قابلیت دید و دوام مهم است، استفاده می‌شود، مانعی عالی در برابر اکسیژن و سایر گازها ایجاد می‌کند که به کاهش سرعت فرایند اکسایش در غذاهای فاسدشدنی کمک می‌کند. این امر به ویژه برای محصولات گوشتی تازه مفید است، زیرا کاهش قرار گرفتن در معرض اکسیژن به حفظ رنگ، طعم و ماندگاری محصول کمک می‌کند (۳۴).



شکل ۷: ساختار و کاربرد پلی وینیل کلراید در صنایع غذایی.

Figure 7: Structure and applications of polyvinylchloride in food industries.

می‌دهند. با ترکیب پلیمرهای طبیعی با پلیمرهای مصنوعی، پوشش‌های هیبریدی می‌توانند یک سازوکار متعادل ایجاد کنند که هم الزامات حفاظتی و هم الزامات زیست محیطی را برآورده می‌کند (۴۱). هم‌افزایی این مواد به ویژه برای کاربردهایی مانند پوشش‌های پنیر مفید است، جایی که انعطاف‌پذیری، استحکام و کنترل رطوبت برای حفظ کیفیت محصول در طول زمان بسیار مهم هستند (۴۲). در جدول ۱ چند مورد مطالعه کاربردی برای بررسی کارایی انواع پوششهای ذکر شده آورده شده است.

۳- سازوکارهای اثربخشی ضد میکروبی در پوشش‌های پلیمری
پوشش‌های ضد میکروبی پلیمری به‌طور خاص برای مهار آلودگی میکروبی و رشد روی سطوح تماس با مواد غذایی از طریق سازوکارهای عملکردی مختلف فرمول شده‌اند. درک کامل این اقدامات ضد میکروبی برای اصلاح طراحی و کاربرد آنها، در نهایت افزایش ایمنی مواد غذایی و افزایش ماندگاری ضروری است. این سازوکارها به‌طور گسترده به دو نوع مبتنی بر رهاسازی و فعال تماسی طبقه‌بندی می‌شوند. علاوه بر این، برخی از پوشش‌ها برای از بین بردن فیلم‌های زیستی مهندسی شده‌اند و در مقایسه با روش‌های مرسوم، این پوشش‌ها اغلب کنترل میکروبی برتر و طولانی‌تری را ارائه می‌دهند (۴۸).

کاربردهایی مانند بسته‌بندی محصولات تازه، که در آن‌ها حفظ رطوبت و مهار میکروبی برای افزایش ماندگاری بسیار مهم است، مؤثر باشد. پوشش‌های هیبریدی مزایای عملکردی متعددی را ارائه می‌دهند. اول، گنجاندن پلیمرهای با منشأ طبیعی مانند کیتوسان، آلژینات و مشتقات سلولز می‌تواند خواص ضد میکروبی ذاتی را به همراه داشته باشد. به عنوان مثال، کیتوسان به دلیل ویژگی‌های ضد میکروبی و ضد قارچی خود شناخته شده است که ایمنی مواد غذایی را افزایش داده و ماندگاری محصولات را هنگام ترکیب در بسترهای مصنوعی افزایش می‌دهد. همچنین، پلیمرهای طبیعی اغلب زیست‌تخریب‌پذیر و تجدیدپذیر هستند که نگرانی‌های زیست محیطی مرتبط با پلیمرهای مصنوعی را برطرف می‌کند (۴۰). ترکیب این خواص در پوشش‌های هیبریدی همچنین امکان یک راه حل قابل تنظیم‌تر را فراهم می‌کند و امکان کنترل بهتر بر فعالیت ضد میکروبی، مقاومت مکانیکی و زیست‌تخریب‌پذیری را بسته به نیازهای محصول غذایی فراهم می‌کند. این سفارشی‌سازی تضمین می‌کند که پوشش‌ها برای موارد مختلف نگهداری مواد غذایی، از میوه‌ها گرفته تا انواع گوشت، بهینه باشند. از سوی دیگر، پلیمرهای مصنوعی دوام و استحکام مکانیکی را افزایش می‌دهند که برای تحمل سختی‌های بسته‌بندی و جابجایی مواد غذایی ضروری هستند. به عنوان مثال، PVA به دلیل انعطاف‌پذیری، شفافیت و حلالیت در آب معمولاً در پوشش‌های هیبریدی استفاده می‌شود، در حالی که PE و PP مقاومت در برابر رطوبت و انتقال اکسیژن را ارائه

جدول ۱: چند مطالعه موردی از عملکرد ضد میکروبی پوششهای مصنوعی و طبیعی.

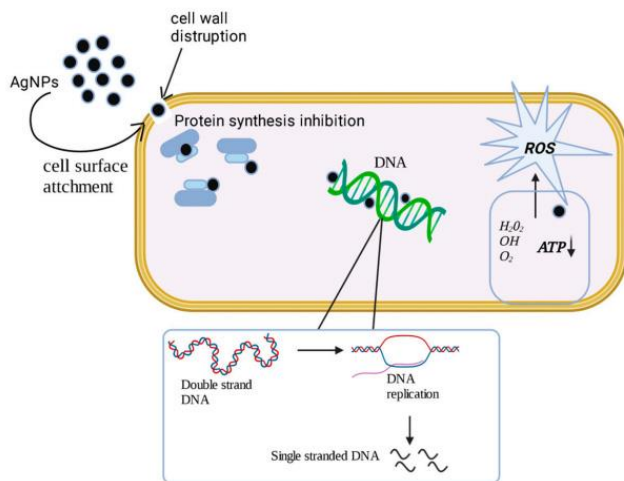
Table 1: Several case studies of the antimicrobial performance of synthetic and natural coatings.

Coating type	Synthetic polymer-based coating	Natural polymer-based coating	Food	Type of microorganism	Results
Comparison of polyethylene and chitosan	Polyethylene and silver nanoparticles	Chitosan and essential oil	Fresh apple slices	<i>Escherichia coli</i> , <i>Staphylococcus aureus</i> <i>Salmonella</i>	Both coatings reduce microbial load, but chitosan provides longer shelf life for the product (43).
Comparison of polypropylene and gelatin	Polypropylene and essential oil	Gelatin and carvacrol	Fresh strawberries	<i>Escherichia coli</i> , <i>Botrytis cinerea</i>	Gelatin coating works as well as polypropylene coating in reducing microbial load and is completely environmentally safe (44).
Comparison of polyvinyl chloride and alginate	Polyvinyl chloride and triclosan	Alginate and nisin	Turkey meat	<i>L. monocytogenes</i>	Alginate coating significantly reduces microbial load and also has the advantage of environmental safety (45).
Comparison of polyethylene and starch	Polyethylene and silver nanoparticles	Starch and nisin	Cheese	<i>L. monocytogenes</i>	Starch-based coatings have a similar performance in reducing microbial load and are also highly biodegradable (46).
Comparison of polypropylene and carboxymethyl cellulose	Polypropylene and silver ions	Carboxymethylcellulose and thyme extract	Fresh chicken breast	<i>Salmonella</i> and <i>Campylobacter</i>	Both coatings increased the shelf life of food, but carboxymethyl cellulose showed greater stability (47).

مراحل اولیه اتصال میکروبی، این سطوح می‌توانند به طور مؤثر از تشکیل فیلم زیستی جلوگیری کنند (شکل ۹).

۳-۳- مهار و تخریب فیلم زیستی

فیلم‌های زیستی ترکیبات میکروبی پیچیده و خودپایداری هستند که در سطح تشکیل شده و مقاومت بیشتری در برابر عوامل تمیزکننده مرسوم از خود نشان می‌دهند. پوشش‌های ضد میکروبی می‌توانند تشکیل اولیه فیلم‌های زیستی را مسدود کنند یا ساختارهای فیلم زیستی ایجاد شده را به طور فعال از بین ببرند (۵۴). برای جلوگیری از تشکیل و توسعه فیلم زیستی، پوشش‌ها اغلب از ویژگی‌های ضد چسبندگی استفاده می‌کنند. مواد آب‌گریز مانند پلی‌تترافلوئورو اتیلن (PTFE) انرژی سطحی را کاهش می‌دهند و از اتصال میکروبی جلوگیری می‌کنند. افزودنی‌های ضد میکروبی مانند یون‌های نقره، یا روغن‌های ضروری، ریزمحیط‌های موضعی ایجاد می‌کنند که رشد باکتری‌ها را مهار می‌کنند (۵۵). علاوه بر این، در حالی که بافت‌های سطحی مهندسی شده در مقیاس میکرو یا نانو به عنوان بازدارنده‌های فیزیکی عمل می‌کنند پوشش‌هایی که بار الکترواستاتیک سطوح باکتریایی را تکثیر می‌کنند قادر به دفع سلول‌های میکروبی از طریق تعاملات مبتنی بر بار هستند (شکل ۱۰).



شکل ۸: سازوکار عملکرد ضد میکروبی نقره در سلول. غشای میکروبی توسط نانوذرات نقره دچار آسیب شده و پس از نفوذ ذرات به داخل سلول فرایندهای کلیدی سوخت‌وساز و تولیدمثل مختل می‌شود (۴۹).

Figure 8: Mechanism of antimicrobial action of silver in cells. The microbial membrane is damaged by silver nanoparticles, and after the particles penetrate the cell, key metabolic and reproductive processes are disrupted (49).

۳-۱- مکانیسم‌های مبتنی بر رهاسازی

در سیستم‌های مبتنی بر رهاسازی، ترکیبات ضد میکروبی به تدریج از بستر پلیمری به محیط اطراف منتشر می‌شوند. این انتشار پایدار، عملکرد ضد میکروبی طولانی مدت را تضمین کرده دفعات استفاده مجدد را کاهش می‌دهد و محافظت مداوم در برابر کلونی‌شدن میکروبی را حفظ می‌کند. از جمله عوامل ضد میکروبی پرکاربرد، نقره است که به دلیل فعالیت قوی و طیف گسترده خود شناخته شده است. یون‌های نقره (Ag^+) از طریق مسیرهای متعددی عمل می‌کنند: آنها یکپارچگی غشای میکروبی را به خطر می‌اندازند، نفوذپذیری را افزایش می‌دهند و منجر به نشت محتویات سیتوپلاسمی می‌شوند که به گروه‌های تیول پروتئین متصل می‌شوند تا آنزیم‌ها را غیرفعال کنند و فرایندهای کلیدی سوخت‌وساز و تولید مثل را مختل کنند (۴۹). آنها تشکیل گونه‌های فعال اکسیژن (ROS) را تحریک می‌کنند که باعث آسیب اکسیداتیو به پروتئین‌ها، لیپیدها و اسیدهای نوکلئیک می‌شوند و در رونویسی و تکثیر DNA اختلال ایجاد می‌کنند و به سمیت ژنتیکی آنها کمک می‌کنند (شکل ۸).

موفقیت پوشش‌های مبتنی بر رهاسازی تحت تأثیر نوع پلیمر، غلظت ضد میکروبی و عوامل محیطی مانند دما و رطوبت قرار دارد. برای مثال، کامپوزیت‌های کیتوسان-پلی اتیلن اثربخشی پایداری را در برابر *اشرشیا کلی* و *استافیلوکوکوس اورئوس* نشان داده‌اند و فعالیت خود را بیش از یک ماه حفظ کرده‌اند (۵۰).

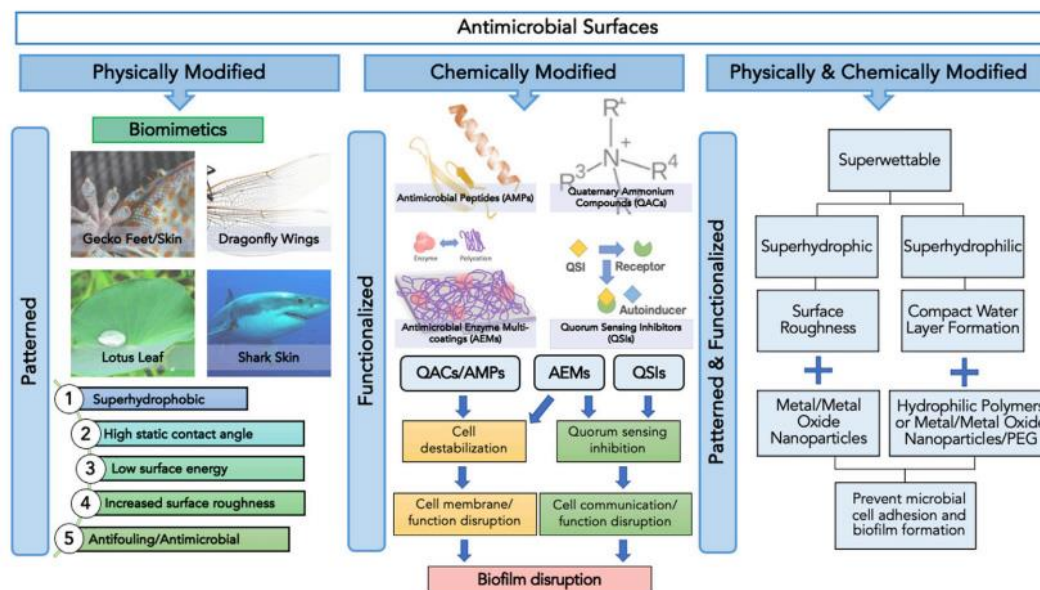
فراتر از نقره، عوامل جایگزین مانند نانوذرات اکسید روی، روغن‌های ضروری و مواد ضد میکروبی گیاهی مانند عصاره آجلیکا سیننسیس در بسترهای پلیمری ادغام شده‌اند. این فرمول‌شدن‌ها در افزایش ماندگاری محصولات فاسدشدنی، از جمله کالاهای پخته‌شده، مؤثر بوده‌اند (۵۱).

۳-۲- سازوکارهای تماسی فعال

پوشش‌های تماسی فعال به جای تکیه بر انتشار مواد ضد میکروبی، با تعامل مستقیم با میکروارگانیسم‌ها در هنگام تماس عمل می‌کنند. این تعاملات یا سلول‌های میکروبی را در سطح مهار می‌کنند یا از بین می‌برند و عملکرد سریع و موضعی را تضمین می‌کنند (۵۲).

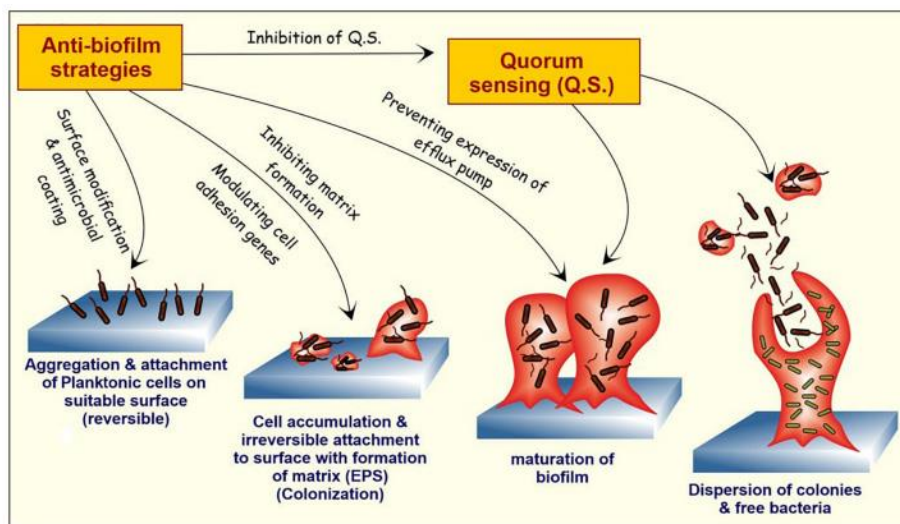
عوامل اصلی مؤثر بر فعالیت مبتنی بر تماس شامل بار الکتریکی و ریزساختار سطح است. سطوحی با بار خالص مثبت می‌توانند غشاهای میکروبی با بار منفی را بی‌ثبات کنند (۵۳)، در حالی که بافت‌های سطحی در مقیاس میکرو و نانو می‌توانند مانع چسبندگی باکتری‌ها یا پارگی فیزیکی دیواره‌های سلولی شوند. عامل‌دار کردن با بخش‌های ضد میکروبی مانند ترکیبات آمونیم چهارتایی با مختل کردن یکپارچگی غشا، قدرت بیشتری را افزایش می‌دهد. همچنین، با جلوگیری از

¹ Polytetrafluoroethylene



شکل ۹: سازوکارهای تماسی فعال ضد میکروبی (۵۳).

Figure 9: Contact-activated antimicrobial mechanisms (53).



شکل ۱۰: مراحل مهار و تخریب فیلمهای زیستی: از چپ به راست شامل چسبیدن به سطح حاوی ماد ضد میکروبی، احاطه کردن میکروب‌ها، رشد کلونی تشکیل شده و انفجار و انتشار کلونی (۵۰).

Figure 10: Steps to contain and destroy biofilms: from left to right, including adhesion to a surface containing an antimicrobial agent, encircling microbes, growth of the formed colony, and explosion and spread of the colony (55).

۴- انواع عوامل ضد میکروبی در پوشش‌های پلیمری
این بخش انواع عامل‌های ضد میکروبی در پوشش‌های پلیمری، عوامل ضد میکروبی متنوعی که برای افزایش اثربخشی پوشش‌های پلیمری برای سطوح در تماس با مواد غذایی استفاده می‌شوند، را بررسی می‌کند. این عوامل که می‌توانند به ضد میکروبی‌های پایه فلزی، طبیعی و مصنوعی طبقه‌بندی شوند، هر کدام سازوکارها و خواص

۴- انواع عوامل ضد میکروبی در پوشش‌های پلیمری

این بخش انواع عامل‌های ضد میکروبی در پوشش‌های پلیمری، عوامل ضد میکروبی متنوعی که برای افزایش اثربخشی پوشش‌های پلیمری برای سطوح در تماس با مواد غذایی استفاده می‌شوند، را بررسی می‌کند. این عوامل که می‌توانند به ضد میکروبی‌های پایه فلزی، طبیعی و مصنوعی طبقه‌بندی شوند، هر کدام سازوکارها و خواص

و تحقیقات مداوم بر درک اثرات طولانی مدت نشت نقره برای اطمینان از ایمنی مصرف‌کننده متمرکز است (۶۰).

۴-۱-۲- عوامل ضد میکروبی مبتنی بر مس

مس به دلیل اثر بخشی ضد میکروبی بالا و هزینه نسبتاً کمتر در مقایسه با نقره، به یک انتخاب محبوب برای کاربرد در پوشش‌های ضد میکروبی تبدیل شده است. همانند نقره، مس را می‌توان به شکل نانوذرات در پوشش‌های پلیمری ادغام کرد که این امر واکنش‌پذیری سطحی و اثربخشی آن را در برابر میکروارگانیسم‌ها افزایش می‌دهد. پوشش‌های مبتنی بر مس نه تنها محافظت ضد میکروبی ارائه می‌دهند، بلکه به کاهش شیوع باکتری‌های مقاوم به آنتی بیوتیک نیز کمک می‌کنند (۶۱). در عمل، یون‌های مس (Cu^{+}) با برهم‌کنش با غشای سلولی، سلول‌های میکروبی را مختل کرده و منجر به نشت محتویات سلولی می‌شوند. یون‌های مس پس از ورود به سلول، به پروتئین‌ها و اسیدهای نوکلئیک متصل می‌شوند، عملکرد آنزیم را مختل می‌کنند و از طریق تولید گونه‌های فعال اکسیژن (ROS) استرس اکسایشی ایجاد می‌کنند. این آسیب اکسایشی، DNA، پروتئین‌ها و لیپیدها را به خطر می‌اندازد و در نهایت باعث مرگ سلولی می‌شود و از این نظر عملکردی مانند نقره دارند. (۶۲). پوشش‌های مبتنی بر مس در سطوح آماده‌سازی غذا مانند پیش‌خوان‌ها و مناطق پر تماس در تأسیسات فرآوری مواد غذایی استفاده می‌شوند. توانایی آنها در مهار تشکیل فیلم زیستی، آنها را به ویژه برای جلوگیری از کلونی‌شدن میکروبی طولانی مدت ارزشمند می‌کند. آنها در برابر عوامل بیماری‌زایی مانند /شرشیا کلی، /استافیلوکوکوس/اورئوس و کامفیلوباکتر که معمولاً با بیماری‌های ناشی از غذا مرتبط هستند، اثربخشی خوبی نشان داده‌اند. اگرچه مس به طور کلی برای استفاده در کاربردهای تماس با غذا ایمن در نظر گرفته می‌شود، غلظت‌های بیش از حد ممکن است منجر به سمیت شود و نگرانی‌هایی را در مورد اثرات طولانی مدت آن در محیط‌های غذایی ایجاد کند. سازمان‌های نظارتی استفاده از پوشش‌های مسی را در غلظت‌های کنترل شده برای کاهش این خطرات توصیه می‌کنند و تحقیقات بیشتری برای درک کامل تأثیر شستشوی مس در طول زمان مورد نیاز است (۶۳).

۴-۱-۳- نانوذرات اکسید روی (ZnO)

اکسید روی یکی دیگر از عوامل پایه فلزی است که به طور گسترده برای کاربردهای ضد میکروبی در پوشش‌های پلیمری مورد مطالعه قرار گرفته است. ZnO که به دلیل فعالیت ضد میکروبی قوی و ایمنی نسبی در کاربردهای تماس با مواد غذایی شناخته شده است، اغلب به شکل نانوذرات در پلیمرها گنجانده می‌شود تا اثربخشی ضد میکروبی آن افزایش یابد. خواص ضد میکروبی اکسید روی از توانایی آن در آزادسازی

عوامل شیمیایی مصنوعی، مانند ترکیبات آمونیم چهارتایی و تریکلوزان، بسیار مؤثر هستند اما ملاحظات را در مورد سمیت و تأثیر زیست‌محیطی مطرح می‌کنند. هر دسته مزایا و محدودیت‌های متمایزی را ارائه می‌دهد و انتخاب آنها به کاربرد مورد نظر، دستورالعمل‌های نظارتی و عملکرد ضد میکروبی مطلوب پوشش بستگی دارد.

۴-۱-۱- عوامل ضد میکروبی پایه فلزی در پوشش‌های پلیمری

عوامل ضد میکروبی پایه فلزی به دلیل فعالیت قوی در برابر طیف وسیعی از میکروارگانیسم‌ها، از جمله باکتری‌ها، قارچ‌ها و ویروس‌ها، به طور گسترده در پوشش‌های پلیمری مورد استفاده قرار می‌گیرند. این فلزات، که اغلب به شکل نانوذرات ترکیب می‌شوند، به دلیل نسبت سطح به حجم بالا و سازوکارهای عمل منحصربه‌فرد، اثربخشی ضد میکروبی بیشتری را فراهم می‌کنند. رایج‌ترین فلزات مورد استفاده در این کاربردها شامل نقره، مس و اکسید روی هستند. هر یک از این عوامل ضد میکروبی از طریق مسیرهای مشخصی برای مهار رشد میکروبی عمل می‌کنند (۵۷).

۴-۱-۱-۱- عوامل ضد میکروبی مبتنی بر نقره

نقره سابقه طولانی در استفاده به عنوان یک عامل ضد میکروبی داشته و در پوشش‌های پلیمری، معمولاً به شکل نانوذرات (AgNPs) برای به حداکثر رساندن سطح و افزایش عملکرد ضد میکروبی آن استفاده می‌شود. نانوذرات نقره در درجه اول با آزاد کردن یون‌های نقره (Ag^{+}) کار می‌کنند که فرایندهای سلولی ضروری را در میکروارگانیسم‌ها مختل می‌کنند (۵۸). در عمل یون‌های نقره به سلول‌های میکروبی نفوذ کرده و در تکثیر DNA، فعالیت آنزیم‌ها و یکپارچگی غشای سلولی اختلال ایجاد می‌کنند. یون‌های نقره با اتصال به گروه‌های تیول در پروتئین‌ها، فرایندهای سوخت‌وساز ضروری را مهار می‌کنند و به طور مؤثر باعث مرگ سلولی می‌شوند. علاوه بر این ذرات نقره می‌توانند گونه‌های فعال اکسیژن (ROS) تولید کنند و سپس به آسیب اکسایشی سلول‌های میکروبی کمک کنند. پوشش‌های ضد میکروبی بر پایه نقره معمولاً روی تجهیزات فرآوری مواد غذایی، مواد بسته‌بندی و ظروف نگهداری برای کاهش آلودگی باکتری و بهبود ایمنی مواد غذایی استفاده می‌شوند. آن‌ها به ویژه در برابر عوامل بیماری‌زای منتقل شده از غذا مانند /شرشیا کلی، سالمونلا و ال منوسیتوزنوس که به تشکیل فیلم زیستی روی سطوح تماس با مواد غذایی معروف هستند، مؤثر هستند (۵۹). البته نگرانی‌هایی در مورد سمیت بالقوه نانوذرات نقره، به ویژه به هنگام تجمع آن‌ها در غذا و محیط زیست، مطرح شده است. سازمان‌های نظارتی مانند FDA و EPA دستورالعمل‌هایی را برای استفاده ایمن از نقره در کاربردهای تماس با مواد غذایی تعیین کرده‌اند

۴-۲- مواد ضد میکروبی طبیعی

مواد ضد میکروبی طبیعی به دلیل خواص سازگار با محیط زیست، سمیت کم و زیست تخریب پذیری، در پوشش‌های پلیمری محبوبیت پیدا کرده‌اند. این مواد که از عصاره‌های گیاهی، روغن‌های ضروری و آنزیم‌ها مشتق شده‌اند، اثر ضد میکروبی با طیف گسترده را در برابر میکروارگانیسم‌های بیماری‌زای مرتبط با غذا ارائه می‌دهند. مواد ضد میکروبی طبیعی هنگامی که در پوشش‌های پلیمری گنجانده می‌شوند، می‌توانند یک لایه محافظ روی سطوح تماس با مواد غذایی ایجاد کنند، خطر آلودگی را کاهش داده و ماندگاری محصولات غذایی را افزایش دهند (۶۶). مواد ضد میکروبی طبیعی به‌ویژه در برابر باکتری‌های گرم مثبت و گرم منفی، قارچ‌ها و ویروس‌ها مؤثر هستند و آنها را در محافظت از مواد غذایی متنوع می‌کنند. با این حال، آنها اغلب با چالش‌هایی مانند ماندگاری کوتاه به دلیل فرار و حساسیت به شرایط محیطی مواجه هستند که ماندگاری طولانی مدت آنها را محدود می‌کند.

۴-۲-۱- روغن‌های ضروری

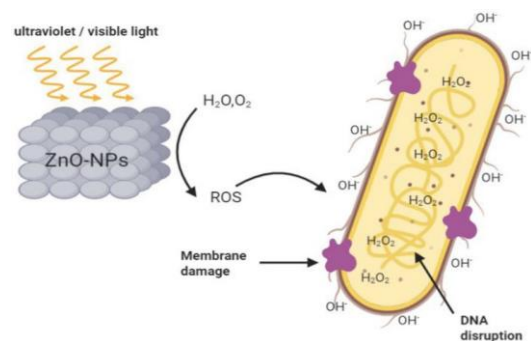
روغن‌های ضروری^۱ مواد فرار و معطری هستند که از گیاهان استخراج می‌شوند و به دلیل خواص ضد میکروبی قوی خود شناخته شده‌اند. روغن‌های ضروری تهیه‌شده از منابعی مانند پونه کوهی، آویشن، دارچین، میخک و رزماری به ویژه در برابر انواع میکروارگانیسم‌ها، از جمله باکتری‌ها، قارچ‌ها و ویروس‌ها مؤثر هستند. فعالیت ضد میکروبی آنها تا حد زیادی به اجزایی مانند تیمول، کارواکرول و اوژنول نسبت داده می‌شود که ساختارها و عملکردهای سلول‌های میکروبی را مختل می‌کنند. سازوکار عمل روغن‌های ضروری با مختل کردن غشاهای سلولی میکروبی، افزایش نفوذپذیری غشا و ایجاد نشت سلولی که منجر به مرگ سلول می‌شود، عمل می‌کنند. برخی از روغن‌های ضروری همچنین می‌توانند در فعالیت آنزیم‌ها و عملکرد پروتئین در سلول‌های میکروبی اختلال ایجاد کنند. همچنین، روغن‌های ضروری مانند پونه کوهی و آویشن دارای خواص پاداکسنده هستند و به جلوگیری از فساد مرتبط با اکسایش در مواد غذایی کمک می‌کنند (۶۷). روغن‌های ضروری به طور گسترده در اقلام بسته‌بندی مواد غذایی و پوشش‌های خوراکی برای مهار رشد پاتوژن‌های رایج ناشی از غذا، از جمله *سالمونلا*، *شرشیا کولی* و *لیستریا مونوسیتوژنز*، استفاده می‌شوند. کاربرد آنها در پوشش‌های ضد میکروبی، ماندگاری محصولات تازه، گوشت و لبنیات را افزایش می‌دهد، فساد را کاهش داده و ایمنی مواد غذایی را افزایش می‌دهند. همچنین، آنها در پوشش‌های بسته‌بندی و ظروف نگهداری مواد غذایی قابل استفاده مجدد مورد بررسی قرار می‌گیرند، جایی که محافظت ضد میکروبی مداوم را فراهم می‌کنند (۶۸).

یون‌های Zn و تولید ROS ناشی می‌شود و آن را به یک عامل مؤثر در برابر طیف وسیعی از میکروارگانیسم‌ها تبدیل می‌کند.

سازوکار عمل نانوذرات اکسید روی از طریق مسیرهای متعدد، اثر ضد میکروبی از خود نشان می‌دهند. نانوذرات ZnO می‌توانند غشاهای سلولی را مختل کرده و ROS تولید کنند که باعث استرس اکسایشی و آسیب سلولی در سلول‌های میکروبی می‌شود. به علاوه، یون‌های Zn می‌توانند در سیستم‌های آنزیمی میکروبی اختلال ایجاد کرده و مسیرهای شیمیایی زیستی ضروری را مهار کنند. ROS تولید شده توسط نانوذرات ZnO می‌تواند به ساختارهای سلولی آسیب برساند و منجر به نشت و مرگ سلولی شود. ZnO همچنین در سطوح pH بالاتر مؤثر است و کاربرد آن را در محیط‌های مختلف گسترش می‌دهد (شکل ۱۱) (۶۴).

پوشش‌های مبتنی بر ZnO معمولاً در بسته‌بندی مواد غذایی، ظروف نگهداری و سطوح در محیط‌های تولید مواد غذایی استفاده می‌شوند. نانوذرات ZnO به دلیل اثربخشی نسبت سطح به حجم بالا، در برابر باکتری‌های گرم مثبت و گرم منفی، از جمله *شرشیا کولی*، *استافیلوکوکوس اورئوس* و *باسیلوس استابیلوس* مؤثر هستند.

ZnO به ویژه به دلیل سمیت نسبتاً کم خود ارزشمند است و آن را برای کاربردهایی که نیاز به تماس مستقیم با غذا دارند، مناسب می‌سازد. اکسید روی به طور کلی برای استفاده در کاربردهای غذایی ایمن در نظر گرفته می‌شود، اما نگرانی‌هایی در مورد شکل نانوذرات آن و پتانسیل تجمع در محصولات غذایی وجود دارد. درحالی‌که اکسید روی مزایایی مانند سمیت کم، اثربخشی در برابر طیف وسیعی از میکروارگانیسم‌ها و ایمنی برای تماس با غذا را ارائه می‌دهد، اثربخشی آن می‌تواند تحت شرایط محیطی خاص کاهش یابد و احتمال نشت آن وجود دارد که ممکن است بر عملکرد ضد میکروبی طولانی مدت آن تأثیر بگذارد (۶۵).



شکل ۱۱: سازوکار عمل ضد میکروبی نانوذرات اکسید روی تخریب و مختل کردن غشا سلولی توسط ROS و H₂O₂ (۶۴).

Figure 11: Mechanism of antimicrobial action of zinc oxide nanoparticles: Destruction and disruption of cell membranes by ROS and H₂O₂ (64).

¹ Essential oils

۴-۲-۲- آنزیم‌ها

آنزیم‌ها مولکول‌های زیستی هستند که واکنش‌های خاص را کاتالیز می‌کنند و برخی از آنزیم‌ها فعالیت ضد میکروبی از خود نشان می‌دهند. لیزوزیم، لاکتوفرین و نیسین از جمله آنزیم‌هایی هستند که معمولاً در پوشش‌های ضد میکروبی استفاده می‌شوند. این آنزیم‌ها به ویژه در برابر باکتری‌های گرم مثبت مؤثر هستند و به دلیل منشأ طبیعی، ایمنی و اختصاصی بودنشان ارزشمند هستند (۶۹). سازوکار عمل آنزیم‌ها با هدف قرار دادن ساختارهای ضروری سلول میکروبی کار می‌کنند. به عنوان مثال، لیزوزیم، لایه پپتیدوگلیکان را در دیواره‌های سلولی باکتری تجزیه می‌کند و باعث لیز شدن، به‌ویژه در باکتری‌های گرم مثبت، می‌شود. لاکتوفرین، پروتئینی که در شیر یافت می‌شود، به آهن، یک ماده مغذی ضروری برای رشد باکتری‌ها، متصل می‌شود و در نتیجه تکثیر باکتری‌ها را مهار می‌کند. نیسین، یک پپتید ضد میکروبی تولیدشده توسط لاکتوکوکوس لاکتیس، غشاهای سلولی را مختل می‌کند و منجر به نشت یون و مرگ سلولی می‌شود. پوشش‌های مبتنی بر آنزیم معمولاً در بسته‌بندی محصولات تازه و لبنیات برای مهار باکتری‌های عامل فساد استفاده می‌شوند. لیزوزیم و لاکتوفرین در پوشش‌های گوشت و پنیر به کار رفته‌اند، که در آن‌ها ماندگاری را افزایش داده و کیفیت محصول را حفظ می‌کنند. پوشش‌های مبتنی بر آنزیم همچنین در فناوری‌های بسته‌بندی فعال مورد بررسی قرار گرفته‌اند و در پاسخ به عوامل محیطی مانند رطوبت، رهایش کنترل‌شده‌ای از عوامل ضد میکروبی را فراهم می‌کنند (۷۰).

۴-۲-۳- عصاره‌های گیاهی

عصاره‌های گیاهی از منابعی مانند سیر، چای سبز و کرنبری حاوی ترکیبات زیست فعال با خواص ضد میکروبی هستند. این عصاره‌ها سرشار از ترکیبات فنلی، فلاونوئیدها و تانن‌ها هستند که به مهار تکثیر میکروبی و همچنین افزایش طول عمر مواد غذایی کمک می‌کنند. عصاره‌های گیاهی جایگزین طبیعی و زیست تخریب‌پذیر برای عوامل ضد میکروبی مصنوعی ارائه می‌دهند و برای استفاده در کاربردهای غذایی ایمن در نظر گرفته می‌شوند (۷۱). سازوکار عمل عصاره‌های گیاهی از طریق ترکیبی از مسیرها می‌باشد که دیواره‌های سلولی میکروبی را پاره می‌کنند، سنتز اسید نوکلئیک را متوقف می‌کنند و فرایندهای سوخت‌وساز را مختل می‌کنند. به عنوان مثال، عصاره سیر حاوی آلیسین است که می‌تواند با مسدود کردن فعالیت آنزیم، پاتوژن‌های باکتریایی و قارچی را مهار کند. عصاره چای سبز سرشار از کاتچین‌ها است که به آسیب‌رساندن به غشاهای سلولی میکروبی و کاهش چسبندگی به سطوح شناخته شده‌اند. عصاره کرنبری حاوی پروآنتوسیانیدین‌هایی است که می‌توانند از چسبندگی باکتری‌ها، به ویژه برای عوامل بیماری‌زایی مانند *شرشیا کلی* که فیلم زیستی

تشکیل می‌دهند، جلوگیری کنند. پوشش‌های مبتنی بر عصاره گیاهی به طور گسترده در بسته‌بندی میوه‌ها، سبزیجات و محصولات فاسدشدنی مانند غذاهای دریایی استفاده می‌شوند. به عنوان مثال، نشان داده شده است که عصاره‌های سیر و چای سبز، فساد و باکتری‌های بیماری‌زا را در محصولات تازه کاهش می‌دهند، در حالی که عصاره کرنبری در برابر *شرشیا کلی* در گوشت‌های تازه مؤثر بوده است. عصاره‌های گیاهی همچنین می‌توانند با سایر مواد ضد میکروبی طبیعی در پوشش‌ها ترکیب شوند تا اثرات هم‌افزایی ایجاد کرده و ماندگاری محصول را افزایش دهند (۷۲).

۴-۳- عوامل شیمیایی مصنوعی

عوامل شیمیایی مصنوعی، مانند ترکیبات آمونیوم کواترنری (QACs) و تریکلوزان، معمولاً به دلیل فعالیت قوی و طیف گسترده خود در برابر طیف وسیعی از باکتری‌ها، قارچ‌ها و ویروس‌ها، در پوشش‌های پلیمری ضد میکروبی گنجانده می‌شوند. این عوامل کنترل میکروبی مؤثری را فراهم کرده و با جلوگیری از آلودگی سطوح تماس با مواد غذایی، ایمنی مواد غذایی را افزایش می‌دهند. جذابیت عوامل ضد میکروبی مصنوعی در پایداری، فعالیت طولانی مدت و اثربخشی آنها در غلظت‌های پایین نهفته است. با این حال، مسائل مربوط به تأثیر زیست‌محیطی، پتانسیل مقاومت میکروبی و محدودیت‌های نظارتی، ارزیابی دقیق استفاده از آنها را ضروری کرده است (۷۰). علاوه بر این، نگرانی‌ها در مورد خطرات بالقوه سلامتی و ممنوعیت‌های نظارتی، مانند محدودیت تریکلوزان در برخی کشورها، نگرانی‌های بیشتری را در مورد کاربرد گسترده آنها در محصولات مرتبط با مواد غذایی ایجاد کرده است. مزیت اصلی عوامل مصنوعی مانند QAC و تریکلوزان، فعالیت ضد میکروبی قوی آنهاست که می‌تواند در مدت زمان طولانی حفظ شود. به طور مشابه، آنها در غلظت‌های پایین مؤثر هستند و هزینه کلی کاربرد را در محیط‌های در مقیاس بزرگ کاهش می‌دهند. با این حال، محدودیت‌های این عوامل شامل سمیت بالقوه، پایداری محیطی و خطر توسعه مقاومت است (۷۴).

۴-۳-۱- ترکیبات آمونیوم کواترنری (QACs)

QACها عامل سطح‌فعال‌هایی با اتم نیتروژن با بار مثبت هستند که آنها را در مختل کردن غشاهای سلولی میکروبی با بار منفی بسیار مؤثر می‌کند. این دسته از ترکیبات شامل عوامل پرکاربردی مانند بنزالکونیوم کلرید و ستیل پیریدینیوم کلرید هستند که هر دو به دلیل خواص ضد میکروبی قوی خود شناخته شده‌اند. QACها با اتصال به غشاهای سلولی، ایجاد آسیب ساختاری و نشت محتویات سلولی و در نهایت منجر به مرگ سلول می‌شوند. آنها در برابر انواع پاتوژن‌ها، از جمله *استافیلوکوکوس اورئوس*، *شرشیا کلی* و حتی برخی ویروس‌ها مؤثر هستند (۷۵). در پوشش‌های پلیمری، QACها اغلب برای ایجاد

برخی کشورها شده است. در نتیجه، اگرچه تریکلوزان در برخی از کاربردهای پلیمری در تماس با مواد غذایی مؤثر است، اما محبوبیت آن کاهش یافته و اغلب جایگزین‌ها به ویژه برای راه‌حل‌های ضد میکروبی پایدار و ایمن‌تر از نظر زیست‌محیطی ترجیح داده می‌شوند (۷۸).

۵- نتیجه‌گیری

این مقاله، پیشرفت‌های اخیر در پوشش‌های پلیمری ضد میکروبی برای سطوح تماس با مواد غذایی و نقش فزاینده آنها در به حداقل رساندن آلودگی میکروبی را بررسی کرده است. در این راستا، انواع پوشش‌های اصلی شامل پلیمرهای زیستی طبیعی (مانند کیتوسان، آلژینات)، پلیمرهای مصنوعی (مانند پلی‌اتیلن، پلی‌پروپیلن) و کامپوزیت‌ها می‌شود و سازوکارهای ضد میکروبی آنها، مانند آزادسازی کنترل شده و اقدامات از بین‌برنده تماس، ارزیابی شده است. این بررسی همچنین عوامل ضد میکروبی مختلف، از جمله نانوذرات فلزی، ترکیبات مشتق‌شده از گیاهان و مواد شیمیایی مصنوعی را از نظر اثربخشی آنها در سیستم‌های غذایی متنوع ارزیابی کرده است. مطالعات موردی و داده‌های حاصل شده نشان می‌دهند که پوشش‌های طبیعی تقویت‌شده با عوامل زیست‌فعال، تاثیر مهار کننده قوی در برابر عوامل بیماری‌زایی مانند/شریشیا کلی، لیستریا مونوسیتوژنز و گونه‌های سالمونلا، به‌ویژه در شرایط بهینه، نشان می‌دهند. عوامل محیطی مانند دما، رطوبت و ضخامت پوشش به طور قابل توجهی بر عملکرد ضد میکروبی تأثیر می‌گذارند. علیرغم پیشرفت‌های قابل توجه، چالش‌هایی در مورد هزینه، زیست‌تخریب‌پذیری و تأییدیه‌های قانونی همچنان وجود دارد.

تعارض منافع

هیچ گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

سطوح فعال تماسی استفاده می‌شوند که به طور مؤثر میکروب‌ها را در تماس مستقیم بدون آزاد کردن عوامل ضد میکروبی در محیط، از بین می‌برند یا غیرفعال می‌کنند. این امر پوشش‌های مبتنی بر QAC را برای کاربردهایی که عملکرد ضد میکروبی طولانی مدت ضروری است، مانند مراکز فرآوری مواد غذایی و مناطق پر تماس در محیط‌های خدمات غذایی، مناسب می‌کند. علیرغم اثربخشی آنها، نگرانی‌ها در مورد مقاومت میکروبی در برابر QACها منجر به بررسی‌های نظارتی شده و تحقیقات در مورد داروهای ضد میکروبی جایگزین و راه‌هایی برای به حداقل رساندن توسعه مقاومت را برانگیخته است (۷۶).

۴-۳-۲- تریکلوزان

تریکلوزان یک عامل ضد میکروبی مصنوعی با طیف گسترده است که به طور گسترده در محصولات مصرفی، از جمله پوشش‌های پلیمری برای سطوح تماس با مواد غذایی، مورد استفاده قرار گرفته است. سازوکار عمل آن شامل مهار آنزیم ردوکتاز پروتئین حامل انوئیل-آسیل است که در سنتز زیستی اسیدهای چرب در سلول‌های باکتری ضروری است. این اختلال رشد میکروبی را متوقف می‌کند و باعث می‌شود تریکلوزان فعالیت ضد میکروبی طیف گسترده‌ای را علیه باکتری‌ها و قارچ‌ها نشان دهد. برخلاف QACها که به اختلال در غشای سلولی متکی هستند، مهار آنزیمی تریکلوزان به آن اجازه می‌دهد تا در غلظت‌های پایین عمل کند و اغلب دوام ضد میکروبی آن را افزایش می‌دهد (۷۷). با این حال، استفاده از تریکلوزان در پوشش‌های ضد میکروبی به دلیل پایداری زیست‌محیطی و خطرات بالقوه سلامتی مرتبط با تجمع زیستی، مورد بررسی دقیق قرار گرفته است. نگرانی‌های بهداشتی در مورد خواص بالقوه مختل کننده غدد درون ریز آن مطرح شده است و چندین نهاد نظارتی محدودیت‌هایی را برای استفاده از آن، به ویژه در محصولات مصرفی، اعمال کرده‌اند. علاوه بر این، ظهور باکتری‌های مقاوم به تریکلوزان نگرانی‌هایی را در جوامع علمی و نظارتی ایجاد کرده و منجر به محدودیت‌هایی در استفاده از آن در

۶- مراجع

1. Tibebu A, Tamrat H, Bahiru A. Review: impact of food safety on global trade. *Vet Med Sci*. 2024;10(5):1585. <https://doi.org/10.1002/vms3.1585>.
2. Thomas GA, Paradell Gil T, Muller CT, et al. From field to plate: how do bacterial enteric pathogens interact with ready-to-eat fruit and vegetables, causing disease outbreaks? *Food Microbiol*. 2024;117:104389. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2023.104389>.
3. Kumari S, Debbarma R, Nasrin N, et al. Recent advances in packaging materials for food products. *Food Bioeng*. 2024;3:236–49. <https://doi.org/10.1002/fbe2.12096>.
4. Sukhareva K, Chernetsov V, Burmistrov I. A review of antimicrobial polymer coatings on steel for the food processing industry. *Polymers (Basel)*. 2024;16:809. <https://doi.org/10.3390/polym16060809>.
5. Dawan J, Zhang S, Ahn J. Recent advances in biofilm control technologies for the food industry. *Antibiotics*. 2025;14:254. <https://doi.org/10.3390/antibiotics14030254>.
6. Karnwal A, Kumar G, Singh R, et al. Natural biopolymers in edible coatings: applications in food preservation. *Food Chem X*. 2025;25:102171. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2025.102171>.
7. Mafe AN, Busselberg D. Microbiome integrity enhances the efficacy and safety of anticancer drug. *Biomedicines*. 2025;13:422. <https://doi.org/10.3390/biome13020422>.

8. Ali A, Zahra A, Kamthan M, et al. Microbial biofilms: applications, clinical consequences, and alternative therapies. *Microorganisms*. 2023;11:1934. <https://doi.org/10.3390/microorganisms11081934>.
9. Edo GI, Ndudi W, Ali ABM, et al. Biopolymers: an inclusive review. *Hybrid Adv*. 2025;9: 100418. <https://doi.org/10.1016/j.hybadv.2025.100418>.
10. Munoz-Bonilla A, Echeverria C, Sonseca A, et al. Bio-based polymers with antimicrobial properties towards sustainable development. *Materials (Basel)*. 2019;12:641. <https://doi.org/10.3390/ma12040641>.
11. Vanaraj R, Suresh Kumar SM, Mayakrishnan G, et al. A current trend in efficient biopolymer coatings for edible fruits to enhance shelf life. *Polymers (Basel)*. 2024;16:2639. <https://doi.org/10.3390/polym16182639>.
12. Das A, Ghosh S, Pramanik N. Chitosan biopolymer and its composites: processing, properties and applications-a comprehensive review. *Hybrid Adv*. 2024;6:100265. <https://doi.org/10.1016/j.hybadv.2024.100265>.
13. Huq T, Khan A, Brown D, et al. Sources, production and commercial applications of fungal chitosan: a review. *J Bioresour Bioprod*. 2022;7:85–98. <https://doi.org/10.1016/j.jobab.2022.01.002>.
14. Ul-Islam M, Alabbosh KF, Manan S, et al. Chitosan-based nanostructured biomaterials: synthesis, properties, and biomedical applications. *Adv Ind Eng Polym Res*. 2024;7:79–99. <https://doi.org/10.1016/j.aiepr.2023.07.002>.
15. Florez M, Guerra-Rodriguez E, Cazon P, Vazquez M. Chitosan for food packaging: recent advances in active and intelligent films. *Food Hydrocoll*. 2022;124: 107328. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.107328>.
16. Basem A, Jasim DJ, Majdi HS, et al. Adsorption of heavy metals from wastewater by chitosan: a review. *Results Eng*. 2024;23: 102404. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102404>.
17. Bi D, Yang X, Yao L, et al. Potential food and nutraceutical applications of alginate: a review. *Mar Drugs*. 2022;20:564. <https://doi.org/10.3390/md20090564>.
18. Silva SPM, Teixeira JA, Silva CCG. Recent advances in the use of edible films and coatings with probiotic and bacteriocin-producing lactic acid bacteria. *Food Biosci*. 2023;56: 103196. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2023.103196>.
19. Senturk Parreidt T, Muller K, Schmid M. Alginate-based edible films and coatings for food packaging applications. *Foods*. 2018;7:170. <https://doi.org/10.3390/foods7100170>.
20. Eranda DHU, Chaijan M, Panpipat W, et al. Gelatin-chitosan interactions in edible films and coatings doped with plant extracts for bio preservation of fresh tuna fish products: a review. *Int J Biol Macromol*. 2024;280: 135661. <https://doi.org/10.1016/j.ijbio mac.2024.135661>.
21. Punia Bangar S, Chaudhary V, Thakur N, et al. Natural antimicrobials as additives for edible food packaging applications: a review. *Foods*. 2021;10:2282. <https://doi.org/10.3390/foods10102282>.
22. Ahammed S, Liu F, Khin MN, et al. Improvement of the water resistance and ductility of gelatin film by zein. *Food Hydrocoll*. 2020;105:105804. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.105804>.
23. Liu Y, Ahmed S, Sameen DE, et al. A review of cellulose and its derivatives in biopolymer-based for food packaging application. *Trends Food Sci Technol*. 2021;112:532–46. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.04.016>.
24. Tomić A, Šovljanski O, Erceg T. Insight on incorporation of essential oils as antimicrobial substances in biopolymer-based active packaging. *Antibiotics*. 2023;12:1473. <https://doi.org/10.3390/antibiotics12091473>.
25. Janowicz M, Galus S, Ciurzyńska A, Nowacka M. The potential of edible films, sheets, and coatings based on fruits and vegetables in the context of sustainable food packaging development. *Polymers (Basel)*. 2023;15:4231. <https://doi.org/10.3390/polym15214231>.
26. Ramirez S, Zuniga F, Amenabar A, et al. Copper-modified cellulose paper: a comparative study of how antimicrobial activity is affected by particle size and testing standards. *Int J Mol Sci*. 2025;26:480. <https://doi.org/10.3390/ijms26020480>.
27. Etale A, Onyianta AJ, Turner SR, Eichhorn SJ. Cellulose: a review of water interactions, applications in composites, and water treatment. *Chem Rev*. 2023;123:2016–48. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.2c00477>.
28. Yang Q, Zhao J, Muhammad A, et al. Biopolymer coating for particle surface engineering and their biomedical applications. *Mater Today Bio*. 2022;16:100407. <https://doi.org/10.1016/j.mtbio.2022.100407>.
29. Shaikh S, Yaqoob M, Aggarwal P. An overview of biodegradable packaging in food industry. *Curr Res Food Sci*. 2021;4:503–20. <https://doi.org/10.1016/j.crfs.2021.07.005>.
30. Alkarri S, Bin Saad H, Soliman M. On antimicrobial polymers: development, mechanism of action, international testing procedures, and applications. *Polymers (Basel)*. 2024;16:771. <https://doi.org/10.3390/polym16060771>.
31. Moshood TD, Nawanir G, Mahmud F, et al. Sustainability of biodegradable plastics: new problem or solution to solve the global plastic pollution. *Curr Res Green Sustain Chem*. 2022 ;5: 100273. <https://doi.org/10.1016/j.crgsc.2022.100273>.
32. Diez-Pascual AM. Antimicrobial polymer-based materials for food packaging applications. *Polymers (Basel)*. 2020;12:731. <https://doi.org/10.3390/polym12040731>.
33. Pinaeva LG, Noskov AS. Biodegradable biopolymers: real impact to environment pollution. *Sci Total Environ*. 2024;947:174445. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.174445>.
34. Lewandowski K, Skorzewska K. A brief review of poly(Vinyl Chloride) (PVC) recycling. *Polymers (Basel)*. 2022;14:3035. <https://doi.org/10.3390/polym14153035>.
35. Motelica L, Ficaí D, Ficaí A, et al. Biodegradable antimicrobial food packaging: trends and perspectives. *Foods*. 2020;9:1438. <https://doi.org/10.3390/foods9101438>.
36. Mujtaba M, Lipponen J, Ojanen M. Trends and challenges in the development of bio-based barrier coating materials for paper/cardboard food packaging: a review. *Sci Total Environ*. 2022;851: 158328. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158328>.
37. Tsung TH, Tsai YC, Lee HP. Biodegradable polymer-based drug-delivery systems for ocular diseases. *Int J Mol Sci*. 2023;24:12976. <https://doi.org/10.3390/ijms241612976>.
38. Satchanska G, Davidova S, Petrov PD. Natural and synthetic polymers for biomedical and environmental applications. *Polymers (Basel)*. 2024;16:1159. <https://doi.org/10.3390/polym16081159>.

39. Mawazi SM, Kumar M, Ahmad N. Recent applications of chitosan and its derivatives in antibacterial, anticancer, wound healing, and tissue engineering fields. *Polymers (Basel)*. 2024;16:1351. <https://doi.org/10.3390/polym16101351>.
40. Wang J, Yuan Y, Liu Y, X. Li, Sh. Wu. Application of chitosan in fruit preservation: a review. *Food Chem X*. 2024;23: 101589. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2024.101589>.
41. Shah YA, Bhatia S, Al-Harrasi A, Afzaz M. Mechanical properties of protein-based food packaging materials. *Polymers (Basel)*. 2023;15:1724. <https://doi.org/10.3390/polym15071724>.
42. Oliveira I, Pinto T, Afonso S, Karas M. Sustainability in bio-based edible films, coatings, and packaging for small fruits. *Appl Sci*. 2025;15:1462. <https://doi.org/10.3390/app15031462>.
43. Mafe AN, Edo GI, Akpogheli PO. Comparative analysis of the environmental impact of biopolymer-based and conventional plastic packaging in food engineering applications. *Al-Mustaqbal J Sustain Eng Sci*. 2024;2: 104-142. <https://doi.org/10.62723/2959-5932.1017>.
44. Ming Dong, Emiliano Bilotti, Han Zhang, imitrios G. Papageoriou, Sustainable Gelatin-Based Nanocomposite Packaging Films with Enhanced Physical Properties and Inherent Recyclability, *Adv. Sustainable Syst*. 2025, 9, 2400728, <https://doi.org/10.1002/adsu.202400728>.
45. Alirezalu K, Yaghoubi M, Poorsharif L, Aminia Sh. Antimicrobial polyamide-alginate casing incorporated with nisin and ϵ -polylysine nanoparticles combined with plant extract for inactivation of selected bacteria in nitrite-free frankfurter-type sausage. *Foods*. 2021;10:1003. <https://doi.org/10.3390/foods10051003>.
46. Meira SMM, Zehetmeyer G, Scheibel JM, Werner JO, Brandelli A. Starch-halloysite nanocomposites containing nisin: Characterization and inhibition of *Listeria monocytogenes* in soft cheeses. *LWT* 2016, 68, 226-234. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2015.12>.
47. Wagle BR, Donoghue AM, Shrestha S, Upadhyaya I. Carvacrol attenuates *Campylobacter jejuni* colonization factors and proteome critical for persistence in the chicken gut. *Poult Sci*. 2020;99:4566-77. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2020.06.020>.
48. Roy R, Tiwari M, Donelli G, Tiwari V. Strategies for combating bacterial biofilms: a focus on anti-biofilm agents and their mechanisms of action. *Virulence*. 2018;9:522-54. <https://doi.org/10.1080/21505594.2017.1313372>.
49. More PR, Pandit S, De Fillipis A, Franci G. Silver nanoparticles: bactericidal and mechanistic approach against drug resistant pathogens. *Microorganisms*. 2023;11:369. <https://doi.org/10.3390/microorganisms11020369>.
50. Bryaskova R, Philipova N, Bakov V, Georgiev N. Innovative antibacterial polymer coatings. *Appl Sci*. 2025;15:1780. <https://doi.org/10.3390/app15041780>.
51. Wang J, Zhao F, Huang J, Li Q. Yang Q. Application of essential oils as slow-release antimicrobial agents in food preservation: preparation strategies, release mechanisms and application cases. *Crit Rev Food Sci Nutr*. 2024;64:6272-97. <https://doi.org/10.1080/10408398.2023.2167066>.
52. Jose A, Gizdavic-Nikolaidis M, Swift S. Antimicrobial coatings: reviewing options for healthcare applications. *Appl Microbiol*. 2023;3:145-74. <https://doi.org/10.3390/applmicrobiol3010012>.
53. Kaur KD, Habimana O. Death at the interface: nanotechnology's challenging frontier against microbial surface colonization. *Front Chem*. 2022. <https://doi.org/10.3389/fchem.2022.1003234>.
54. Sharma S, Mohler J, Mahajan SD, Schwartz SA, Bruggemann L, Aalinkel R. Microbial biofilm: a review on formation, infection, antibiotic resistance, control measures, and innovative treatment. *Microorganisms*. 2023;11:1614. <https://doi.org/10.3390/microorganisms11061614>.
55. Mishra R, Panda AK, De Mandal S, Shakeel M, Bisht S.S, Khan J. Natural anti-biofilm agents: strategies to control biofilm-forming pathogens. *Front Microbiol*. 2020, 29:11:566325 <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.566325>.
56. Negut I, Bitu B, Groza A. Polymeric coatings and antimicrobial peptides as efficient systems for treating implantable medical devices associated-infections. *Polymers (Basel)*. 2022;14:1611. <https://doi.org/10.3390/polym14081611>.
57. Yilmaz GE, Gokturk I, Ovezova M, Yilmaz F, Kilic S, Denizli A, Dali B. Antimicrobial nanomaterials: a review. *Hygiene*. 2023;3:269-90. <https://doi.org/10.3390/hygiene3030020>.
58. Bruna T, Maldonado-Bravo F, Jara P, Caro N. Silver nanoparticles and their antibacterial applications. *Int J Mol Sci*. 2021;22:7202. <https://doi.org/10.3390/ijms22137202>.
59. Zorraquin-Pena I, Cueva C, Bartolome B, Moreno-Arribas MV. Silver nanoparticles against foodborne bacteria. Effects at intestinal level and health limitations. *Microorganisms*. 2020;8:132. <https://doi.org/10.3390/microorganisms8010132>.
60. Jangid H, Joshi HC, Dutta J, Ahmad A, Alshammari M.B, Hossain K, Pant G, Kumar G. Advancing food safety with biogenic silver nanoparticles: addressing antimicrobial resistance, sustainability, and commercial viability. *Food Chem X*. 2025;26: 102298. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2025.102298>.
61. De Videira V, CG, Harada BN, Vital V, De Silva R.A.G. Structural and antibacterial evaluation of copper, silver, and bimetallic silver/copper nanoalloys synthesized in chitosan biopolymer. *Next Mater*. 2024;3:100071. <https://doi.org/10.1016/j.nxmater.2023.100071>.
62. Gao L, Zhang A. Copper-instigated modulatory cell mortality mechanisms and progress in oncological treatment investigations. *Front Immunol*. 2023. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2023.1236063>.
63. Zahir A, Ge Z, Khan IA. Public health risks associated with food process contaminants—a review. *J Food Prot*. 2025;88: 100426. <https://doi.org/10.1016/j.jfp.2024.100426>.
64. Mendes CR, Dilarri G, Forsan CF, Spata V, Lopes P, Moraes P, Montagonlli R, Ferreira H, Bidoia E. Antibacterial action and target mechanisms of zinc oxide nanoparticles against bacterial pathogens. *Sci Rep*. 2022;12:2658. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-06657-y>.
65. Reda AT, Park JY, Park YT. Zinc oxide-based nanomaterials for microbiostatic activities: a review. *J Funct Biomater*. 2024;15:103. <https://doi.org/10.3390/jfb15040103>.
66. Mafe AN, Edo GI, Akpogheli PO, Yousif M. Pepper soup: a cultural and culinary exploration of a traditional Nigerian dish, with a focus on health benefits and antimicrobial activity. *Int J Gastron Food Sci*. 2024;38:101036. <https://doi.org/10.1016/j.ijgfs.2024.101036>.

67. Li C, Zhang C, Chen X, Cui H, Lin L. The interference mechanism of basil essential oil on the cell membrane barrier and respiratory metabolism of *Listeria monocytogenes*. *Front Microbiol.* 2022, 1:13:855905. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.855905>.
68. Emiroğlu ZK, Yemiş GP, Coşkun BK, Candoğan K. Antimicrobial activity of soy edible films incorporated with thyme and oregano essential oils on fresh ground beef patties. *MeatSci.* 2010;86(2):283-3. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2010.04.016>.
69. Nawaz N, Wen S, Wang F, Nawaz Sh, Raza J, Iftikhar M, Usman M. Lysozyme and its application as antibacterial agent in food industry. *Molecules.* 2022;27:6305. <https://doi.org/10.3390/molecules27196305>.
70. Ragland SA, Criss AK. From bacterial killing to immune modulation: Recent insights into the functions of lysozyme. *PLoS Pathog.* 2017;13:e1006512. <https://doi.org/10.1371/journal.ppat.1006512>.
71. Beya MM, Netzel ME, Sultanbawa Y, Smyth H, Louwrens C.H. Plant-based phenolic molecules as natural preservatives in comminuted meats: a review. *Antioxidants.* 2021;10:263. <https://doi.org/10.3390/antiox10020263>.
72. Sar T, Kiraz P, Braho V, Harirchi Sh, Yesilcimen Akbas M. Novel perspectives on food-based natural antimicrobials: a review of recent findings published since 2020. *microorganisms* 2023,11,2234. <https://doi.org/10.3390/microorganisms11092234>.
73. Jiao Y, Niu L, Ma S, Li J, Tay F.R, Chen JH. Quaternary ammonium-based biomedical materials: State-of-the-art, toxicological aspects and antimicrobial resistance. *Prog Polym Sci.* 2017;71:53–90. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2017.03.001>.
74. Arya S, Dwivedi AK, Alvarado L, Kupesic-Plavsic S. Exposure of U.S. population to endocrine disruptive chemicals (Parabens, Benzophenone-3, Bisphenol-A and Triclosan) and their associations with female infertility. *Environ Pollut.* 265:2020, 114763. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114763>
75. Nadagouda MN, Vijayarathay P, Sin A, Nam H, Khan S, Parambath B.M, Mohamed A, Han Ch. Antimicrobial activity of quaternary ammonium salts: structure-activity relationship. *Med Chem Res.* 2022;31:1663–78. <https://doi.org/10.1007/s00044-022-02924-9>.
76. Yixian Liu, William Z. Xu, Paul A. Charpentier. Synthesis of VO₂/Poly(MMA-co-dMEMUABr) antimicrobial/thermochromic dual-functional coatings. *Prog Org Coat.* 2020; 142: 105589. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2020.105589>.
77. Sinicropi MS, Iacopetta D, Ceramella J, Catalano A, Mariconda A, Pellegrino M, Saturnino C, Longo P, Aquaros S. Triclosan: a small molecule with controversial roles. *Antibiotics.* 2022;11:735. <https://doi.org/10.3390/antibiotics11060735>.
78. Contardo-Jara V, Meinecke S, Feibicke M, Berghahn R, Schmidt R, Mohr R. Fate, bioaccumulation and toxic effects of triclosan on a freshwater community – A mesocosm study. *Env Adv.* 2021;5:100100. <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2021.100100>.

How to cite this article:

Rasouli S. Antimicrobial Coatings Used in Food Packaging. *J Stud Color World.* 2025;16(2):203-219. <https://doi.org/10.30509/jscw.2026.167755.1277> [In Persian].