Review Article

Polymerization
Quarterly, 2026
Volume 16, Number 1
Pages 13-22
ISSN: 2252-0449

Properties and Applications of Carboxymethyl Cellulose (CMC)-Based Biofilms in Food Packaging Technology

Mohammadali Pourmohammadi Mahunaki[1*] and Tayebeh Momeni[2]

1. Department of Polymer Engineering, Faculty of Engineering;
2. Department of Chemistry, Faculty of Basic Sciences;
Qom University of Technology, Qom, Iran

Received: 9 July 2025, Accepted: 4 January 2026

Abstract

In recent years, increasing environmental concerns and the desire to use biodegradable materials in the food packaging industry have led to increasing attention to edible films and coatings. Carboxymethyl cellulose (CMC) is one of the widely used polymers in this field, which has attracted the attention of researchers due to its properties such as high transparency, biocompatibility and good film-forming ability. However, properties such as brittleness, high water vapor permeability, and high water solubility limit the application of carboxymethyl cellulose in pure form. The aim of this article is to comprehensively review the functional properties of edible films based on CMC and their improvement strategies. Therefore, first, characteristics such as mechanical properties of CMC films were investigated and the effects of factors such as the use of plasticizers, blending with other polymers, incorporation of inorganic nanoparticles, and chemical modifications were investigated. Finally, practical applications of CMC films in packaging of various food products including fruits, vegetables, meat and dairy products were reported. The findings suggest that by using reinforcing compounds and structural modifications, the functional properties of CMC-based films can be improved, making them promising candidates for bio-sustainable packaging. However, optimization of formulations, examination of performance under real storage conditions and evaluation of consumption safety are important issues that should be addressed in future research.

Key Words

carboxymethyl cellulose (CMC), edible film, biodegradable packaging, mechanical properties, polymer

(*) To whom correspondence should be addressed.
E-mail: pourmohammadi@qut.ac.ir

مقاله مروری

بسپارش
فصلنامه علمی
سال شانزدهم، شماره ۱،
صفحه ۲۲-۱۳، ۱۴۰۵
ISSN: 2252-0449

خواص و کاربرد زیست‌فیلم‌های برپایهٔ کربوکسی‌متیل سلولوز (CMC) در فناوری بسته‌بندی مواد غذایی

محمدعلی پورمحمدی ماهونکی[1*] و طیبه مؤمنی[2]

قم، دانشگاه صنعتی قم؛

۱- دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی پلیمر و ۲- دانشکده علوم پایه، گروه شیمی

دریافت: ۱۴۰۴/۴/۱۸، پذیرش: ۱۴۰۴/۱۰/۱۴

چکیده

در سال‌های اخیر، افزایش نگرانی‌های زیست‌محیطی و تمایل به استفاده از مواد زیست‌تخریب‌پذیر در صنعت بسته‌بندی مواد غذایی، موجب توجه روزافزون به فیلم‌ها و پوشش‌های خوراکی شده است. کربوکسی‌متیل سلولوز (CMC) از پلیمرهای پرکاربرد در این زمینه است که به‌دلیل ویژگی‌هایی نظیر شفافیت زیاد، زیست‌سازگاری و قابلیت فیلم‌سازی مناسب، مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. بااین‌حال، خواصی نظیر شکنندگی، نفوذپذیری زیاد بخار آب و حل‌پذیری زیاد در آب، کاربرد کربوکسی‌متیل سلولوز را به‌طور خالص محدود می‌سازد. هدف این مقاله، بررسی جامع خواص کارکردی فیلم‌های خوراکی برپایه CMC و راهکارهای بهبود آن‌هاست. ازاین‌رو، ابتدا ویژگی‌هایی نظیر خواص مکانیکی فیلم‌های CMC بررسی شده و اثر عواملی مانند استفاده از نرم‌کننده‌ها، آمیخته‌سازی با سایر پلیمرها، نانوذرات معدنی و اصلاحات شیمیایی بررسی شده است. درنهایت، کاربردهای عملی فیلم‌های CMC در بسته‌بندی محصولات غذایی مختلف از جمله میوه‌ها، سبزیجات، گوشت و فراورده‌های لبنی گزارش شده است. یافته‌ها نشان می‌دهد، با استفاده از ترکیبات تقویت‌کننده و اصلاحات ساختاری، می‌توان خواص کارکردی فیلم‌های برپایه CMC را بهبود بخشید و آن‌ها را به گزینه مناسبی برای بسته‌بندی زیست‌پایدار تبدیل کرد. بااین‌حال، بهینه‌سازی فرمول‌بندی‌ها، بررسی عملکرد در شرایط واقعی نگهداری و ارزیابی ایمنی مصرف از موضوعات مهمی است که در پژوهش‌های آینده باید به آن‌ها توجه شود.



محمدعلی پورمحمدی ماهونکی



طیبه مومنی

واژگان کلیدی

کربوکسی‌متیل سلولوز (CMC)،
فیلم خوراکی،
بسته‌بندی زیست‌تخریب‌پذیر،
خواص مکانیکی،
پلیمر

* مسئول مکاتبات، پیام‌نگار:
pourmohammadi@qut.ac.ir

مقدمه

افزایش روزافزون جمعیت جهان و تقاضای فزاینده مصرف‌کنندگان برای محصولات غذایی راحت و آماده مصرف، وابستگی به بسته‌بندی مواد غذایی را به‌طور درخور توجهی تشدید کرده است. بااین‌حال، مواد بسته‌بندی رایج که عمدتاً از پلاستیک‌های برپایه نفت ساخته شده‌اند، به‌دلیل ماهیت زیست‌تخریب‌ناپذیر و بحران آلودگی پلاستیک مرتبط با آن، تهدید جدی برای محیط‌زیست محسوب می‌شوند. این موضوع نیاز مبرم به جایگزین‌های پایدار در صنعت بسته‌بندی مواد غذایی را به‌وجود آورده است [۱].

سلولز، نوعی پلی‌ساکارید طبیعی است که به‌عنوان عنصر کلیدی در دیواره یاخته‌های گیاهان، نقش اساسی در استحکام و ثبات آن‌ها ایفا می‌کند. فراوانی و ویژگی‌های منحصربه‌فرد سلولز، آن را به ماده ارزشمندی در صنایع مختلف، به‌ویژه در حوزه بسته‌بندی مواد غذایی، تبدیل کرده است. سلولز از منابع طبیعی متنوع استخراج‌پذیر بوده که شامل دو دسته اصلی است. دسته اول، منابع لیگنوسلولوزی بوده که شامل چوب، ضایعات جنگلی، الیاف گیاهی مانند کتان و کنف و نیز بقایای کشاورزی مانند سبوس غلات و کاه است. چوب به‌عنوان رایج‌ترین منبع سلولز، در تولید مقادیر انبوه خمیر کاغذ و الیاف سلولوزی برای بسته‌بندی و سایر کاربردها به‌کار می‌رود. دسته دوم، منابع غیرلیگنوسلولوزی است که شامل پنبه، باکتری‌های سلولوزساز و برخی از جلبک‌ها می‌شود. پنبه، به‌عنوان یک لیف طبیعی با خلوص زیاد در تولید منسوجات و مواد جاذب کاربرد دارد. باکتری‌های سلولوزساز نیز می‌توانند سلولوز را به‌طور مستقیم از مواد مغذی سنتز کنند و در تولید نانوالیاف سلولوزی و زیست‌پلاستیک‌ها استفاده می‌شوند. ازآنجاکه سلولوز از منابع مختلف دسترس‌پذیر به‌دست می‌آید و زیست‌تخریب‌پذیر، سازگار با محیط‌زیست و ارزان‌قیمت است، اغلب در تولید بسته‌بندی استفاده می‌شود (شکل ۱) [۲].

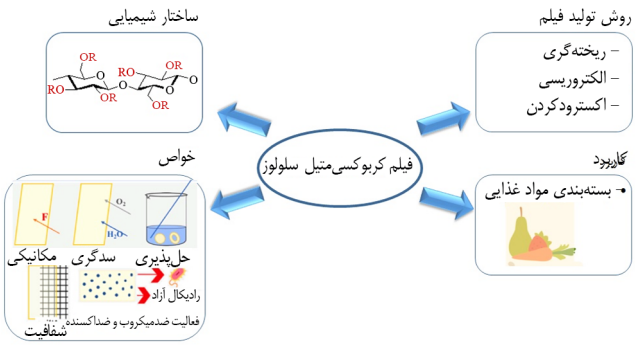
سلولز نوعی پلی‌ساکارید خطی است که از واحدهای گلوکوز با پیوندهای ۱و۴-β-گلیکوزیدی تشکیل شده است. وجود ۳ گروه هیدروکسیل در هر واحد انیدروگلوکوز به سلولز این قابلیت را می‌دهد تا با بسیاری از واکنش‌دهنده‌ها برهم‌کنش داشته باشد که به تشکیل بسیاری از مشتقات سلولز منجر می‌شود. ازآنجاکه سلولز به‌طور کلی ایمن شناخته شده است، خواص آن مانند حل‌پذیری، میل ترکیبی با آب، تبلور و قابلیت تشکیل فیلم را می‌توان با استفاده از مسیرهای مختلف اصلاح کرد. به‌عنوان مثال، سلولز استات نوعی مشتق رایج سلولز است که گروه‌های هیدروکسیل آن به‌طور جزئی یا کامل با گروه‌های استیل جایگزین می‌شوند. درحالی‌که کربوکسی متیل سلولوز، متیل سلولوز (MC) و هیدروکسی‌پروپیل متیل‌سلولوز (HPMC) مشتقات سلولوز اتردارشده هستند که به‌ترتیب با جایگزینی هیدروکسیل‌ها با گروه‌های کربوکسی متیل، متیل و هیدروکسی پروپیل متیل ساخته می‌شوند [۳].

CMC به‌دلیل خاصیت غلیظ‌کننده، ژل‌کننده، تثبیت‌کننده، امولسیون‌کننده و حجیم‌کننده، یکی از رایج‌ترین مشتقات اتر سلولوز است که در کاربردهای غذایی استفاده می‌شود. CMC حاوی گروه کربوکسی‌متیل سدیم (CH_2COONa) است که به مولکول سلولوز اضافه شده و باعث حل‌پذیری در آب می‌شود. دلایل اصلی استفاده رایج از CMC، گران‌روی، خاصیت لخته‌سازی، شفافیت، غیرسمی بودن و قیمت کم آن است [۴]. همچنین به‌دلیل وزن مولکولی زیاد و ساختار پلیمری این ماده، ساخت فیلم‌های زیست‌تخریب‌پذیر عالی با آن امکان‌پذیر است. فیلم‌های CMC در مقایسه با فیلم‌های نشاسته، استحکام کششی (TS) بیشتر و ازدیاد طول تا پارگی (EB) کمتری دارند. در مقایسه با فیلم‌های کیتوسان و آلژینات سدیم مشاهده می‌شود، فیلم‌های CMC استحکام کششی کمتری دارند. برای اصلاح ویژگی‌های فیلم‌های CMC مانند افزایش مقاومت دربرابر آب، بهبود خواص مکانیکی و ضدمیکروبی می‌توان از سایر زیست‌پلیمرها (نشاسته، کیتوسان، کلاژن و غیره) یا نانومواد استفاده کرد [۵].

در ادامه به مطالعات اخیر درباره فیلم‌های CMC و اهمیت CMC در کاربردهای بسته‌بندی زیست‌تخریب‌پذیر پرداخته می‌شود. همچنین، روش‌های تهیه و خواص کارکردی مانند خواص فیزیکی، سدی و ضدمیکروبی فیلم‌های CMC را ارائه می‌دهد که حاوی انواع نانومواد، مواد فعال یا افزودنی‌های طبیعی به‌صورت تنها و آمیخته و کاربردهای صنایع غذایی هستند.

خواص فیلم‌های کامپوزیتی برپایه CMC

بسیاری از پژوهشگران خواص فیلم‌های تهیه‌شده از CMC را در



شکل ۱- ویژگی‌ها، روش‌های تولید و کاربرد فیلم‌های خوراکی برپایه کربوکسی‌متیل سلولز در بسته‌بندی مواد غذایی [؟؟؟؟].

منابع علمی بررسی کرده‌اند. به‌طورکلی، این فیلم‌ها از استحکام مکانیکی متوسط، مقاومت بسیار خوب دربرابر روغن و شفافیت مناسبی برخوردارند. بااین‌حال، معایبی نظیر شکنندگی و تمایل زیاد به جذب رطوبت، کاربرد آن‌ها را در بسته‌بندی مواد غذایی محدود کرده است. ازاین‌رو، به‌منظور بهبود ویژگی‌های فیلم‌زایی CMC، راهکارهای متعددی ازجمله عمل‌آوری‌های فیزیکی و شیمیایی، استفاده از نانوپرکننده‌ها و آمیخته‌سازی با سایر پلیمرها استفاده شده است. در این بخش، خواص مختلف فیلم‌های برپایه CMC شامل ویژگی‌های فیزیکی مانند خواص مکانیکی، رنگ، شفافیت و گذردهی نور، ویژگی‌های گرمایی و نیز فعالیت‌های ضدمیکروبی و ضداکسندگی آن‌ها بررسی می‌شود.

خواص مکانیکی فیلم‌های خوراکی نقش حیاتی در دوام و یک‌پارچگی آن‌ها ایفا می‌کنند. فیلم‌های با خواص مکانیکی مناسب می‌توانند لایه پیوسته و محافظ روی سطح غذای روکش‌شده ایجاد کرده و از آن دربرابر عوامل خارجی مانند نفوذ رطوبت، اکسیژن و ریزاندامگان محافظت کنند [۶]. رایج‌ترین خواص مکانیکی اندازه‌گیری‌شده استحکام کششی، ازدیاد طول تا پارگی و مدول کشسانی (مدول یانگ، EM) هستند. فیلم‌های تهیه‌شده از CMC به تنهایی، استحکام کششی ضعیف و تردی زیادی دارند که محدودیت‌هایی را برای کاربرد آن‌ها در بسته‌بندی مواد غذایی ایجاد می‌کند [۷]. برای مقایسه، فیلم‌های نشاسته‌ای هرچند شکننده هستند، اما استحکام بیشتری (۲۰ MPa تا ۳۰ MPa) نشان می‌دهند. فیلم‌های ژلاتین به‌دلیل ساختار پروتئینی، ازدیاد طول بیشتری دارند (تا ٪۱۵۰)، اما در محیط‌های مرطوب مقاومت خود را ازدست می‌دهند. فیلم‌های پلی‌وینیل الکل (PVA) به‌عنوان پلیمر سنتزی زیست‌سازگار، استحکام کششی بیش از ۴۰ MPa دارند. آلژینات‌ها استحکام متوسط (۱۵ MPa تا ۲۵ MPa) و انعطاف‌پذیری مناسب ارائه می‌دهند، درحالی‌که فیلم‌های کیتوسان نیز استحکام مکانیکی بیشتر (۳۰ MPa تا ۵۰ MPa) همراه با خاصیت ضدمیکروبی ذاتی دارند. در مقایسه با این پلیمرها، نقطه قوت CMC، نه در استحکام مکانیکی، بلکه در شفافیت زیاد، مقاومت بسیار خوب دربرابر روغن، زیست‌تخریب‌پذیری و اصلاح‌پذیری (ازطریق نانوذرات، نرم‌کننده‌ها و آمیخته‌سازی با سایر پلیمرها) است. این مزیت‌ها استفاده از آن را در سامانه‌های بسته‌بندی فعال و هوشمند توجیه می‌کند. اثر مواد مختلف مانند افزودن نرم‌کننده‌ها، آمیخته‌سازی با سایر پلیمرها و گنجاندن نانوذرات بر خواص مکانیکی فیلم‌های برپایه CMC در منابع علمی بررسی شده است.

نرم‌کننده‌ها ترکیبات با وزن مولکولی کم و غیرفرارند که قابلیت نفوذ به فضاهای بین زنجیرهای پلیمری را دارند. درنتیجه برهم‌کنش‌های بین‌مولکولی را کاهش داده و تحرک زنجیر را افزایش می‌دهند. این ترکیبات به‌منظور اصلاح خواص مکانیکی، به‌ویژه افزایش انعطاف‌پذیری فیلم‌ها، به ماتریس فیلم افزوده می‌شوند. همان‌طور که انتظار می‌رود، افزودن نرم‌کننده به فیلم‌های برپایه CMC معمولاً باعث کاهش استحکام کششی و مدول کشسانی و در مقابل افزایش ازدیاد طول تا پارگی می‌شود [۸].

در سال‌های اخیر، توجه بسیاری به آمیخته‌سازی زیست‌پلیمرها با عوامل پرکننده در مقیاس نانو معطوف شده است. این نانوپرکننده‌ها را می‌توان براساس منشأ و شکل آن‌ها طبقه‌بندی کرد. نانوپرکننده‌های پایه‌آلی و معدنی به‌طور گسترده دردسترس هستند. افزودن این مواد به ماتریس‌های زیست‌پلیمری با توجه به نسبت سطح به حجم و سطح ویژه زیاد آن‌ها، می‌تواند خواص مکانیکی، سدی و گرمایی فیلم‌ها را به‌طور درخور توجهی بهبود بخشد [۹]. مطالعات نشان می‌دهد، فیلم‌های برپایه CMC تقویت‌شده با نانوپرکننده‌ها، صرف‌نظر از نوع آلی یا معدنی آن‌ها، معمولاً دارای استحکام کششی و مدول یانگ بیشتری هستند. اما درعین‌حال، ازدیاد طول تا پارگی این فیلم‌ها کاهش می‌یابد که این تغییرات به غلظت پرکننده بستگی دارد [۱۰]. به‌عنوان مثال، این آثار با افزودن نانوذرات کیتوسان یا نانوسلولوز در غلظت‌های مختلف (۰/۱، ۰/۵ و ٪۱) به ماتریس CMC مشاهده شده است [۱۱]. در همین راستا، استفاده از عصاره پلی‌ساکاریدی تفاله قهوه مصرف‌شده نیز آثار مشابهی را نشان داده است.

نانوذرات فلزی نظیر CuO، ZnO و Ag نیز در بهبود خواص مکانیکی و ایجاد خاصیت ضدمیکروبی مؤثر بوده‌اند. برای نمونه، افزودن نانوذرات ZnO با غلظت ۰/۵ و ٪۱ به فیلم CMC موجب افزایش استحکام کششی از ۱۸۳/۲ MPa به ۲۰۳/۳ MPa و ۲۳۵/۹۴ MPa و نیز افزایش ازدیاد طول از ٪۱۳ به ٪۶۲/۵ و ٪۸۳/۷ شده است [۱۲]. این نتایج نشانگر نقش مثبت ZnO زیستی در تقویت سختی و انعطاف‌پذیری فیلم‌هاست. همچنین، آمیخته‌سازی CuO، ZnO و Ag (به‌طور منفرد یا آمیخته در غلظت ٪۲ وزنی) باعث بهبود خواص کششی در مقایسه با فیلم‌های CMC خالص شده‌اند [۱۳]. افزون‌براین، استفاده از نانوذرات ترکیبی TiO_2–Ag (در اندازه ۵۰ nm تا ۱۰۰ nm) در فیلم‌های برپایه CMC مخلوط با ژلاتین نیز بررسی شده است. نتایج این پژوهش‌ها نشان داد، در غلظت‌های کم نانوذرات TiO_2-Ag، استحکام کششی فیلم‌ها افزایش یافته و ازدیاد طول کاهش می‌یابد که نشان‌دهنده ساختار فشرده‌تر و سخت‌تر فیلم است. بااین‌حال در غلظت‌های بیشتر، روند معکوس شده و کاهش استحکام همراه با افزایش ازدیاد

طول مشاهده شده است که نشان از انعطاف‌پذیری بیشتر فیلم دارد. به بیان دیگر، افزودن TiO_2-Ag می‌تواند در سطوح بهینه، به‌طور معناداری موجب بهبود سختی و پایداری مکانیکی فیلم‌های خوراکی شود، درحالی‌که حفظ انعطاف‌پذیری در غلظت‌های بیشتر نیز امکان‌پذیر است [۱۴].

در مطالعه دیگری، افزودن نانوذرات زئولیت دوپه‌شده با Ag و Au به فیلم‌های CMC/PVA به افزایش هم‌زمان TS و EB با توجه به غلظت نانوذره منجر شده است [۱۵]. همچنین گزارش شده است، افزودن نانوهیدروژل‌های حامل کورکومین کپسول‌دارشده به فیلم CMC موجب کاهش TS از ۱۶/۴۶ MPa به ۹/۸۷ MPa شده، درحالی‌که وجود این نانوهیدروژل‌ها اثر معناداری بر EB نداشته است. همچنین، فیلم‌های CMC حاوی ویتامین E نانوکپسول‌دارشده نسبت به فیلم خالص، TS و EM کمتر، اما EB بیشتری نشان دادند که بهبود انعطاف‌پذیری را نمایان می‌سازد. افزون‌براین، Zhang و همکاران با افزودن مشتق دوقطبی کیتوسان (۲-N-هیدروکسی‌پروپیل-۳-تری‌متیل‌آمونیوم-O-کربوکسی‌متیل کیتوسان) به فیلم‌های CMC، افزایش معناداری در هر سه پارامتر مکانیکی EM، TS و EB مشاهده کردند [۱۶].

مطالعه دیگری نشان داد، افزودن نانوبلورهای سلولوز اکسیدشده (TOCNC) به فیلم CMC (با نسبت ۱:۱) باعث افزایش استحکام کششی از حدود ۷۴/۰ MPa به حدود ۱۴۵/۸ MPa شد، درحالی‌که ازدیاد طول تقریباً ثابت (حدود ۳/۶٪) باقی ماند. این مسئله نشان می‌دهد، برهم‌کنش‌های هیدروژنی قوی TOCNC و CMC عامل اصلی این بهبودها هستند. همچنین، افزودن نانولوله‌های کربنی چنددیواره (MWCNT) تا ۲٪ وزنی به فیلم‌های CMC باعث افزایش چشمگیر TS و EM شد. درعین‌حال، کاهش انعطاف‌پذیری (کاهش EB) را نیز درپی داشت [۱۷].

به‌طورکلی پژوهش‌ها نشان می‌دهند، نانوذرات مختلف اغلب باعث افزایش استحکام کششی و مدول یانگ فیلم‌های CMC و کاهش یا تغییر الگوی ازدیاد طول تا پارگی می‌شوند. میزان اثر دقیق وابسته به نوع، اندازه و غلظت نانوذرات است. به‌عنوان مثال، افزودن نانوکلوئید سیلیکای نامنظم (ممکن است بهبود نفوذپذیری) یا نانوذرات آلی مانند نانولوله‌های کربنی مقاومت مکانیکی را به‌طور کلی تقویت کند. درحالی‌که افزودن نانوذرات زیستی فلزی (مثل ZnO زیست‌سنتزی) نیز به افزایش انعطاف‌پذیری فیلم کمک می‌کند (جدول ۱).

کاربرد فیلم‌های خوراکی برپایه CMC در بسته‌بندی مواد غذایی

در سال‌های اخیر، افزایش تمایل مصرف‌کنندگان به استفاده از محصولات غذایی طبیعی، موجب گسترش کاربرد فیلم‌ها و پوشش‌های خوراکی در نگهداری مواد غذایی شده است. این مواد به‌عنوان بسته‌بندی‌های زیست‌تخریب‌پذیر و سازگار با محیط‌زیست، جایگزین پایداری برای پلیمرهای سنتزی محسوب می‌شوند.

فیلم‌ها و پوشش‌های خوراکی برپایه کربوکسی‌متیل سلولوز در صنایع غذایی توجه ویژه‌ای یافته‌اند. استفاده از آن‌ها در پوشش‌دهی میوه‌های تازه، سبزیجات و فراورده‌های گوشتی، که نسبت به

جدول ۱- اثر انواع اصلاحات بر خواص مکانیکی فیلم‌های CMC.

نوع افزودنی-اصلاح	تغییرات استحکام کششی (TS)	تغییرات ازدیاد طول (EB)	تغییرات مدول یانگ (EM)	مرجع
CMC خالص	ضعیف	ترد	متوسط	۷
نرم‌کننده (گلیسرول و سایر)	کاهش	افزایش	کاهش	۸
نانوذرات کیتوسان- نانوسلولوز	افزایش	کاهش	افزایش	۱۱
عصاره پلی‌ساکاریدی تفاله قهوه	افزایش	کاهش	افزایش	۱۱
نانوذرات ZnO (۱٪- ۰/۵)	افزایش چشمگیر	افزایش	-	۱۲
نانوذرات ZnO، CuO و Ag (۲٪)	بهبود نسبت به CMC خالص	بسته به غلظت	بهبود	۱۳
نانوذرات TiO_2-Ag	افزایش در غلظت کم و کاهش در غلظت زیاد	کاهش در غلظت کم و افزایش در غلظت زیاد	افزایش در غلظت کم	۱۴
نانوذرات زئولیت دوپه‌شده با Ag و Au	افزایش	افزایش	-	۱۵
مشتق کیتوسان دوقطبی (HTCC-CMC)	افزایش	افزایش	افزایش	۱۶
نانولوله‌های کربنی چنددیواره	افزایش	کاهش	افزایش	۱۷

رطوبت و اکسیژن حساس‌اند، می‌تواند با کاهش فساد میکروبی و اکسایشی به حفظ ویژگی‌های تغذیه‌ای و حسی محصول و درنهایت افزایش ماندگاری کمک کند. برای تهیهٔ این فیلم‌ها، روش‌های متنوعی به‌کار گرفته می‌شود که انتخاب آن‌ها به مقیاس تولید و نوع کاربرد وابسته است. در مقیاس آزمایشگاهی، روش ریخته‌گری-خشک کردن متداول‌ترین گزینه است. در این روش، محلول آبی CMC همراه با نرم‌کننده و افزودنی‌های مدنظر آماده شده و پس از ریختن روی سطح صاف با کنترل شرایط دما و رطوبت خشک می‌شود تا فیلم یکنواختی تشکیل شود. در مقیاس نیمه‌صنعتی و صنعتی، اکسترودکردن گرمایی-گرمانرم و پاشش یا پوشش‌دهی ترجیح داده می‌شوند، زیرا امکان تولید مداوم و کنترل ضخامت فیلم را فراهم می‌سازند. همچنین، روش‌های نوینی مانند الکتروریسی برای ساخت نانوالیاف پلیمری و لایه‌به‌لایه در تولید ساختارهای چندلایه با خواص تطبیقی در مطالعات پژوهشی مورد توجه قرار گرفته‌اند. برای پوشش‌دهی مستقیم محصولات غذایی نیز از فنون ساده‌تر مانند غوطه‌وری، پاشش و برس‌زنی استفاده می‌شود که بسته به نوع محصول و یکنواختی مدنظر انتخاب می‌شوند.

نکته مهم درباره این فیلم‌ها، خوراکی بودن آن‌هاست. فیلم‌های CMC در صورتی خوراکی محسوب می‌شوند که از CMC نوع غذایی و افزودنی‌های مجاز مانند نرم‌کننده‌های خوراکی، عوامل ضدمیکروب یا ضداکسنده طبیعی و امولسیون‌کنندها تهیه شده باشند. دراین‌حالت، فیلم‌ها می‌توانند به‌عنوان پوشش خوراکی استفاده شده و حتی همراه با محصول غذایی مصرف شوند. درمقابل، به‌کارگیری ترکیبات غیرخوراکی یا غیربهداشتی، مانند برخی نانومواد یا اجزای حاوی فلزات سنگین، موجب می‌شود که فیلم به‌عنوان بسته‌بندی غیرخوراکی طبقه‌بندی شود و صرفاً برای محافظت خارجی کاربرد داشته باشد. ازسوی‌دیگر، افزودن ترکیبات فعال مانند اسانس‌های طبیعی، ضمن افزایش عملکرد ضدمیکروبی یا ضداکسندگی، ممکن است باعث تغییر طعم و بوی محصول شود. بنابراین در کاربردهای خوراکی لازم است تا دُز بهینه این افزودنی‌ها با آزمون‌های حسی تعیین و کنترل شود.

سلاما و عزیز، نوعی پوشش CMC و کیتوسان گوانیدین‌دارشده و غنی‌شده با نانوذرات تیتانیم اکسید را برای افزایش خاصیت سد UV تولید کردند. هدف از این مطالعه، بهینه‌سازی غلظت اجزای فیلم برای رسیدن به حداقل میزان WVP را تجزیه و بررسی اثربخشی فیلم بهینه در طول نگهداری فلفل دلمه‌ای سبز بود. آزمون‌های ظاهری و پارامترهای کاهش وزن طی ۱۵ روز نشان داد، پوشش یادشده به‌طور معناداری از کاهش کیفیت و فساد محصول جلوگیری کرده است [۱۸].

بررسی جامع فیلم‌های CMC–کیتوسان در مطالعه دیگری نشان داد، افزودن نانوذرات سیلیکا و ZnO به ماتریس، استحکام مکانیکی و فعالیت ضدمیکروبی را به‌طور هم‌زمان افزایش می‌دهد، به‌طوری‌که این فیلم‌ها تا ۹۰ روز نگهداری در ۲۵ کیفیت روغن و بافت مغزها را حفظ کردند [۱۹].

Samsi و همکاران، فیلمی از ژلاتین و CMC تهیه کرده و اثر آن را بر کاهش وزن و شاخص قهوه‌ای شدن گوجه‌فرنگی و انگور طی ۱۴ روز ارزیابی کردند. نتایج نشان داد با افزایش نسبت CMC، افت وزن و قهوه‌ای شدن میوه‌ها کاهش می‌یابد [۲۰]. همچنین، افزودن اسانس لیمو (LEO) به فیلم CMC–ژلاتین مانع رشد مخمر و کپک، کاهش افت وزن، حفظ اسکوربیک اسید و فنول‌ها و تثبیت pH و اسیدینگی توت‌فرنگی شد [۲۱].

شهبازی، اسانس نعناع را به پوشش‌های CMC و کیتوسان افزود و خواص فیزیکی‌شیمیایی، میکروبی و حسی توت‌فرنگی را طی ۱۲ روز نگهداری در یخچال بررسی کرد. پوشش‌های حاوی ۰/۲٪ اسانس بهترین عملکرد را در حفظ تازگی و کنترل میکروب ارائه دادند [۲۲].

در مطالعه‌ای، سلولوز استخراج‌شده از ساقه موز به CMC تبدیل شد و به‌عنوان پوشش توت‌فرنگی به‌کار رفت. این فیلم با خلوص زیاد، عمر قفسه‌ای توت‌فرنگی را در دمای ۲۲ و ۴ °C به‌ترتیب تا ۶ و ۱۶ روز افزایش داد و سبب حفظ کیفیت فیزیکی، شیمیایی و حسی شد [۲۳].

Tesfay و همکاران، محلول پوششی حاوی کیتوسان، CMC و عصاره برگ مورینگا را برای دو نوع آووکادو Fuerte و Hass توسعه دادند. این پوشش کاهش وزن، رسانندگی الکتریکی، سرعت تنفس میوه‌ها، حفظ خواص گیاشیمیایی (phytochemical) و فعالیت آنزیمی را بهبود داد [۲۴]. در مطالعه دیگری، فیلم‌های CMC–کیتوسان حاوی آنتوسیانین‌های تمشک سیاه و پلی‌فنول‌های چای با هدف توسعه بسته‌بندی غذایی زیست‌تخریب‌پذیر تهیه شدند. این فیلم‌ها دارای استحکام کششی بیشتر، نفوذپذیری بخار آب و عبوردهی نور کمتر نسبت به نمونه بدون ترکیبات فعال بودند [۲۵].

السید و همکاران، پنیر نرم را با نوعی فیلم خوراکی حاوی کیتوسان، آلژینات، CMC، سلولوز میکروبلوری ضدمیکروب و سویه‌های پروبیوتیک *بیفیدوباکتریوم لاکتیس* (*B. lactis*)، *لاکتوباسیلوس اسیدوفیلوس* (*L. acidophilus*) و *لاکتوباسیلوس کازئی* (*L. casei*) پوشش دادند. در طول نگهداری در دمای ۷ °C به‌مدت ۴۵ روز، مقادیر ماده خشک، پروتئین و چربی، اسیدینگی، pH، شمارش میکروبی (*بیفیدوباکتریوم لاکتیس*، لاکتوباسیل‌ها، کل

باکتری‌های هوازی، روان‌دوست و مخمر و کپک) و تجزیه‌وتحلیل حسی پنیرهای پوشش‌یافته انجام شد. پوشش حاوی CMC، سلولوز میکروبلوری ضدمیکروب و سویه‌های پروبیوتیک به‌دلیل سدگری بخار آب فیلم‌های برپایه CMC به‌عنوان یک سد روی پنیر عمل می‌کردند، اثر مثبتی بر محتوای ماده خشک، پروتئین و چربی پنیر داشت. درنهایت مشخص شد، پوشش از نمونه‌های پنیر دربرابر فساد محافظت می‌کند [۲۶].

مطالعات پوشش‌دهی اغلب روی فراورده‌های گوشتی بسیار حساس به فساد میکروبی انجام می‌شود. Ruan و همکاران، ماندگاری گوشت خوک پوشش‌یافته با پوششی برپایه آلژینات سدیم و CMC حاوی اپی‌گالوکاتچین گالات را مطالعه کردند. نتایج نشان داد، پوشش‌دهی بر رشد میکروبی، اکسایش چربی و ارزیابی حسی گوشت خوک در طول نگهداری در دمای ۴±۱ °C به‌مدت ۷ روز اثرگذار بوده است [۲۷]. مظفرذوق و همکاران، ماندگاری فیله ماهی قزل‌آلای تازه را بررسی کردند. فیله‌های ماهی قزل‌آلا با فیلم‌هایی برپایه CMC و سدیم کازئینات حاوی سویه‌های پروبیوتیک شامل *لاکتوباسیلوس اسیدوفیلوس*، *لاکتوباسیلوس رویتری* (*L. reuteri*)، *لاکتوباسیلوس کازئی*، *لاکتوباسیلوس رامنوسوس* (*L. rhamnosus*) و *بیفیدوباکتریوم* (*B. bifidum*) بسته‌بندی شدند. استفاده از تمام پوشش‌ها روی فیله ماهی قزل‌آلا، تغییرات شیمیایی را کاهش داد. همچنین فیلم‌های حاوی سویه‌های پروبیوتیک، ماندگاری فیله‌ها را حداقل به‌مدت ۲ هفته افزایش دادند.

Zabihollahi و همکاران، نوعی فیلم نانوکامپوزیت با استفاده از CMC، نانوالیاف سلولوزی و اینولین را تولید کردند. آن‌ها کارایی فیلم‌ها را با یا بدون *لاکتوباسیلوس پلانتاروم* (*L. plantarum*) با بسته‌بندی ران‌های مرغ تازه بررسی کردند. عمل‌آوری‌های پوششی به‌طور مؤثر رشد میکروب‌ها را در طول نگهداری گوشت مرغ در دمای ۴ °C به‌مدت ۸ روز مهار کردند. فیلم‌های دارای سویه‌های پروبیوتیک در مهار تخریب میکروبی مؤثرتر عمل کردند [۲۸].

در یکی از مطالعات نوین، استفاده از نانوامولسیون اسانس گیاه پرسیکاریا ماینر (Huds) (*Persicaria minor*) در فیلم کامپوزیت کربوکسی‌متیل سلولوزکیتوسان (CMC-CS) پرداخته است. این مطالعه نشان داد، نانوامولسیون در مقایسه با درشت‌امولسیون، ویژگی‌های فیزیکی و زیستی بهتری ازجمله اندازه ذرات کوچک‌تر، فعالیت ضدباکتری بیشتر و شاخص سفیدی کمتر دارد. افزودن این نانوامولسیون در غلظت‌های مختلف، به‌ویژه ٪۱۲، به بهبود ویژگی‌های مکانیکی، افزایش انعطاف‌پذیری، کاهش رطوبت، افزایش حل‌پذیری در آب و ارتقای فعالیت ضداکسندگی و ضدباکتری فیلم منجر شد [۲۹]. در مطالعه دیگری، فیلم‌های کامپوزیت CS–CMC با ترکیبات زیست‌فعال آنتوسیانین‌های توت سیاه (BA) و پلی‌فنول‌های چای (TP) تهیه شد. افزودن این ترکیبات بهبود درخور توجهی در خواص مکانیکی (افزایش استحکام کششی و انعطاف‌پذیری) و سدی (کاهش عبور نور UV، رطوبت و نفوذپذیری بخار آب) ایجاد کرد. همچنین فیلم‌های این کامپوزیت در نگهداری گوشت گاو سردشده عملکرد مطلوبی داشتند و کیفیت محصول را حفظ کردند. یافته‌ها نشان داد، استفاده از ترکیبات زیست‌فعال طبیعی نظیر اسانس‌های گیاهی، آنتوسیانین‌ها و پلی‌فنول‌ها در بستر فیلم‌های CS–CMC، رویکرد مؤثر و پایداری برای تولید بسته‌بندی‌های زیست‌تخریب‌پذیر با قابلیت بالقوه زیاد برای جایگزینی مواد پلاستیکی متداول در صنایع غذایی است [۲۵].

فیاضی و همکاران خواص فیزیکی، مکانیکی و ضدمیکروب فیلم CMC و اسانس زنیان را در ظروف گوشت برای کاهش سطح میکروب‌ها و جلوگیری از ریزاندامگان بیماری‌زا و نیز افزایش مدت ماندگاری محصولات گوشتی بررسی کردند. میزان جذب آب، مقدار رطوبت، حل‌پذیری و میزان نفوذپذیری بخار آب فیلم‌ها نیز با افزایش غلظت اسانس، کاهش یافت [۳۰].

محجوب و همکاران، اثر فیلم CMC حاوی اسانس دارچین و میخک بر ماندگاری گوشت گوساله در دمای یخچال را مطالعه کردند. در این پژوهش، اثر استفاده از درصدهای مختلف اسانس دارچین و میخک در تهیه فیلم‌های CMC بررسی شده است. نتایج نشان داد، بسته‌بندی گوشت با فیلم CMC، به‌ویژه با افزودن مقادیر مختلف اسانس‌های دارچین و میخک، اثر بازدارندگی بر افزایش عوامل مهم مؤثر در فساد شیمیایی آن دارد [۳۱].

کوچک‌سرایی و همکاران، CMC و کتیرا با نسبت‌های ۲۵:۷۵، ۵۰:۵۰ و ۷۵:۲۵ با یکدیگر آمیخته‌سازی شده و میزان نفوذپذیری بخار آب، درصد حل‌پذیری، خواص مکانیکی و ریزساختار آن‌ها ارزیابی شد. نتایج نشان داد، آمیخته‌سازی دو پلیمر می‌تواند برخی ویژگی‌های فیزیکی–مکانیکی فیلم خوراکی تهیه‌شده از CMC–کتیرا را بهبود بخشد [۳۲].

الماسی و همکاران، مقادیر متفاوت سیتریک اسید (۰ تا ٪۲۰ وزنی) و CMC را به روش ریخته‌گری در دمای ۶۰ °C تولید کردند. اثر سیتریک اسید بر نفوذپذیری نسبت به بخار آب WVP، میزان جذب رطوبت و ویژگی‌های مکانیکی بررسی شد. وجود ٪۱۰ سیتریک اسید و افزودن CMC بازدارندگی فیلم دربرابر رطوبت را افزایش داد. افزودن ٪۲۰ CMC، استحکام کششی نهایی

جدول ۲- مروری برکاربرد فیلم‌های خوراکی برپایه CMC در بسته‌بندی مواد غذایی.

آمیخته فیلم-پوشش	محصول غذایی	یافته های اصلی	مرجع
CMC + کیتوسان گوانیدین‌دارشده + TiO_2	فلفل دلمه‌ای سبز	افزایش خاصیت سدی UV، کاهش WVP و جلوگیری از کاهش کیفیت طی ۱۵ روز	۱۸
CMC-کیتوسان + SiO_2/ZnO	مغزها (خشکبار)	بهبود مقاومت مکانیکی و خاصیت ضدمیکروبی و حفظ کیفیت تا ۹۰ روز	۱۹
ژلاتین + CMC	گوجه‌فرنگی و انگور	کاهش افت وزن و قهوه‌ای شدن طی ۱۴ روز	۲۰
CMC-ژلاتین + اسانس لیمو	توت‌فرنگی	ممانعت از رشد کپک و مخمر و حفظ ضداکسنده‌ها و pH	۲۱
CMC + کیتوسان + اسانس نعناع	توت‌فرنگی	حفظ تازگی و کنترل میکروبی طی ۱۲ روز در دمای یخچال	۲۲
CMC حاصل از ساقه موز	توت فرنگی	افزایش عمر انباری (۶ روز در ۲۲ °C و ۱۶ روز در ۴ °C)	۲۳
کیتوسان + CMC + عصاره مورینگا	آووکادو	بهبود حفظ خواص گیاشیمیایی و فعالیت آنزیمی و کاهش تنفس و وزن	۲۴
CMC–CS + آنتوسیانین-پلی‌فنول	گوشت گاو	افزایش استحکام، کاهش نفوذ رطوبت و نور و بهبود نگهداری	۲۵
کیتوسان + آلژینات + CMC + سلولوز میکروبلوری + پروبیوتیک	پنیر نرم	بهبود ترکیب شیمیایی و حفاظت دربرابر فساد طی ۴۵ روز	۲۶
آلژینات سدیم + CMC + اپی‌گالوکاتچین گالات	گوشت خوک	مهار رشد میکروبی و اکسایش چربی طی ۷ روز	۲۷
CMC + کازئینات سدیم + پروبیوتیک	ماهی قزل‌آلا	کاهش تغییرات شیمیایی و افزایش ماندگاری تا ۲ هفته	۲۸
CMC + نانوالیاف سلولوزی + اینولین ± سویه‌های پروبیوتیک	ران مرغ	مهار رشد میکروبی تا ۸ روز و اثر بیشتر با وجود سویه‌های پروبیوتیک	۲۸
CMC–CS + نانومولسیون اسانس پرسیکاریا *ماینر*	فیلم آمیخته	بهبود مکانیکی، افزایش خاصیت ضدمیکروبی و ضداکسندگی	۲۹
CMC + اسانس زنیان	گوشت	کاهش میکروب و رطوبت‌پذیری فیلم	۳۰
CMC + اسانس دارچین و میخک	گوشت گوساله	کاهش میکروب و رطوبت‌پذیری فیلم	۳۱
CMC + کتیرا (نسبت‌های مختلف)	فیلم خوراکی	بهبود ویژگی‌های فیزیکی-مکانیکی	۳۲
CMC + سیتریک اسید	ریخته‌گری فیلم	کاهش WVP و افزایش استحکام کششی تا ۵۹٪	۳۳
CMC + کیتوسان + اسانس دارچین	فیلم خوراکی	خواص ضدکپک، ضداکسندگی و بسته‌بندی فعال	۳۴
ژلاتین + سطوح مختلف CMC	فیلم خوراکی	بهینه‌سازی خواص فیزیکی و مکانیکی	۳۵

(UTS) را بیش از ۵۹٪ افزایش داد. درعین‌حال، کاهش معنی‌داری در کرنش تا نقطهٔ شکست SB مشاهده نشد [۳۳].

فتاحی و همکاران نشان دادند، آلودگی میکروبی مواد غذایی یکی از مهم‌ترین دلایل ازدست رفتن آن‌ها در سراسر دنیا به‌شمار می‌رود. استفاده از بسته‌بندی فعال به‌منظور کاهش آلودگی میکروبی با هدف حذف افزودن مستقیم مواد نگهدارنده به ماده غذایی، روش نویدبخشی در نگهداری مواد غذایی به‌شمار می‌رود. ازاین‌رو، هدف از این پژوهش افزودن اسانس دارچین به نوعی بسته‌بندی زیستی و بررسی آثار آن بر ویژگی‌های مختلف فیلم است. براساس نتایج، فیلم‌های تولیدشده برپایه کیتوسان و CMC با اسانس دارچین به‌دلیل دارا بودن خواص ضدکپک و ضداکسایش درخور توجه، گزینه مناسبی برای تولید بسته‌بندی‌های به‌کاررفته در مواد غذایی به‌شمار می‌روند [۳۴].

رنجبر و همکاران در این پژوهش از ژلاتین برای تولید فیلم خوراکی استفاده کردند. آن‌ها برای تقویت خواص مثبت و تضعیف ویژگی‌های منفی مقادیر مختلف ۰، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰٪ (وزنی/وزنی) در فرمول‌بندی استفاده کردند. این پژوهشگران پس از ارزیابی و مطالعه خواص فیزیکی و مکانیکی فیلم‌های تولیدی، درنهایت فرمول‌بندی بهینه را انتخاب کردند (جدول ۲) [۳۵].

نتیجه‌گیری

فیلم‌های خوراکی برپایه CMC به‌عنوان یکی از مواد زیست‌پایه با قابلیت بالقوه زیاد در بسته‌بندی زیست‌تخریب‌پذیر مواد غذایی

شناخته می‌شوند. این فیلم‌ها به‌دلیل خواص مطلوبی چون شفافیت، مقاومت دربرابر روغن و امکان بارگذاری ترکیبات فعال، جایگزین مناسبی برای پلیمرهای سنتزی محسوب می‌شوند. بااین‌حال، محدودیت‌هایی مانند شکنندگی، حل‌پذیری در آب و نفوذپذیری دربرابر بخار آب زیاد مانع از کاربرد گسترده آن‌ها به‌صورت خالص شده است. بررسی‌ها نشان می‌دهد، استفاده از راهکارهایی مانند آمیخته‌سازی CMC با سایر پلیمرهای طبیعی، افزودن نرم‌کننده‌ها، استفاده از نانوذرات معدنی و اعمال پیوندهای عرضی، می‌تواند بهبود چشمگیری در خواص مکانیکی، گرمایی، سدی و فعالیت‌های زیستی این فیلم‌ها ایجاد کند. همچنین، بهره‌گیری از ترکیبات ضدمیکروب و ضداکسنده طبیعی در فرمول‌بندی فیلم‌ها، افق‌های جدیدی برای کاربرد آن‌ها در بسته‌بندی فعال مواد غذایی فراهم کرده است. با وجود پیشرفت‌های حاصل، چالش‌هایی نظیر بهینه‌سازی خواص کارکردی در کنار حفظ زیست‌تخریب‌پذیری، کاهش هزینه تولید و ارزیابی ایمنی مصرف، نیازمند پژوهش‌های بیشتر است. توسعه فرمول‌بندی‌های هوشمند و بررسی رفتار فیلم‌ها در شرایط واقعی نگهداری مواد غذایی، ازجمله مسیرهای آینده پژوهش در این حوزه محسوب می‌شوند. درمجموع، فیلم‌های برپایه CMC با اصلاحات هدفمند می‌توانند نقش مؤثری در ارتقای پایداری بسته‌بندی‌های غذایی و کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی ایفا کنند.

مراجع

1. Siracusa V., Rocculi P., Romani S. and Dalla Rosa M., Biodegradable Polymers for Food Packaging: A Review, *Trend Food Sci. Technol.*, **19**, 634-643, 2008.
2. Zhong Y., Godwin P., Jin Y., and Xiao H., Biodegradable Polymers and Green-Based Antimicrobial Packaging Materials: A Mini-Review, *Adv. Ind. Eng. Polym. Res.*, **3**, 27-35, 2020.
3. He X., Lu W., Sun C., Khalesi H., Mata A., and Andaleeb R., Cellulose and Cellulose Derivatives: Different Colloidal States and Food-Related Applications, *Carbohydr. Polym.*, **225**, 117334, 2021.
4. Al-Tayyar N.A., Youssef A.M., and Al-Hindi R.., Antimicrobial Food Packaging Based on Sustainable Bio-Based Materials for Reducing Foodborne Pathogens: A Review, *Food. Chem*., **310**, 125915, 2020.
5. Youssef A.M. and El-Sayed S.M., Bionanocomposites Materials for Food Packaging Applications: Concepts and Future Outlook, *Carbohydr. Polym.*, **193**, 19-27, 2018.
6. Navarro-Tarazaga M.L., Massa A., and Pérez-Gago M.B., Effect of Beeswax Content on Hydroxypropyl Methylcellulose-Based Edible Film Properties and Postharvest Quality of Coated Plums (Cv. *Angeleno*), *LWT-Food. Sci. Technol*., **44**, 2328-2334, 2018.
7. Li H., Shi H., He Y., Fei X., and Peng L., Preparation and Characterization of Carboxymethyl Cellulose-Based Composite Films Reinforced by Cellulose Nanocrystals Derived from Pea Hull Waste for Food Packaging Applications, *Inter. J. Biol. Macromol.*, **164**, 4104-4112, 2020.
8. Huntrakul K. and Harnkarnsujarit N., Effects of Plasticizers on Water Sorption and Aging Stability of Whey Protein/ Carboxymethyl Cellulose Films, *J. Food. Eng*., **272**, 109809, 2020.
9. Jamróz E., Kulawik P., and Kopel P., The Effect of Nanofillers on The Functional Properties of Biopolymer-Based Films: A Review, *Polymers*, **11**, 675, 2019.
10. Ebrahimzadeh S., Ghanbarzadeh B., and Hamishehkar H., Physical Properties of Carboxymethyl Cellulose Based Nano-Biocomposites with Graphene Nano-Platelets, *Inter. J. Biol. Macromol*., **16**, 23-84, 2016.
11. Jannatyha N., Shojaee-Aliabadi S., Moslehishad M., and Moradi E., Comparing Mechanical, Barrier and Antimicrobial Properties of Nanocellulose/CMC and Nanochitosan/CMC Composite Films, *Inter. J. Biol. Macromol*., **8**, 164, 2020.
12. Anwar M.M., Aly S.S., Nasr E.H., and El-Sayed E.-S.R., Improving Carboxymethyl Cellulose Edible Coating Using ZnO Nanoparticles from Irradiated a lternaria Tenuissima, *AMB Express*, **12**, 116, 2022.
13. Sharma B., Malik P., and Jain P., Biopolymer Reinforced Nanocomposites: A Comprehensive Review, *Mater. Today Commun*., **16**, 353-363, 2018.
14. Farshchi E., Pirsa S., Roufegarinejad L., Alizadeh M., and Rezazad M., Photocatalytic/Biodegradable Film Based on Carboxymethyl Cellulose, Modified by Gelatin and TiO_2-Ag Nanoparticles, *Carbohydr. Polym*., **216**, 189-196, 2019.
15. Bourbon A.I., Costa M.J., Maciel L.C., Pastrana L., Vicente A.A., and Cerqueira M.A., Active Carboxymethyl Cellulose-Based Edible Films: Influence of Free and Encapsulated Curcumin on Films' Properties, *Foods*, **10**, 1512, 2021.
16. Zhang C., Yang X., Li Y., Qiao C., Wang S., and Wang X., Enhancement of a Zwitterionic Chitosan Derivative on Mechanical Properties and Antibacterial Activity of Carboxymethyl Cellulose-Based Films, *Inter. J. Biol. Macromol*., **159**, 1197-1205, 2020.

17. Dadfar S.M.M. and Kavoosi G., Mechanical and Water Binding Properties of Carboxymethyl Cellulose/Multiwalled Carbon Nanotube Nanocomposites, *Polym. Compos.*, **36**, 145-150, 2015.
18. Salama H.E. and Aziz M.S.A., Optimized Carboxymethyl Cellulose and Guanidinylated Chitosan Enriched with Titanium Oxide Nanoparticles of Improved UV-Barrier Properties for the Active Packaging of Green Bell Pepper, *Int. J. Biol. Macromol*., **165**, 1187-1197, 2020.
19. da Costa D.S., Furtado K.F., Kluczkovski A.M., Takeuchi K.P., and Lopes A.S., Cassava Starch/Carboxymethyl Cellulose Edible Coating Added of Tocopherol: A Strategy to Preserve the Oxidative Stability of Brazil Nuts, *Foods*, **13**(17), 2732, 2024.
20. Samsi M.S., Kamari A., Din S.M., and Lazar G., Synthesis, Characterization and Application of Gelatin–Carboxymethyl Cellulose Blend Films for Preservation of Cherry Tomatoes and Grapes, *J. Food. Sci. Technol*., **56**, 3099-3108, 2019.
21. Hassan A.M., Altemimi A.B., Ghanbarzadeh B., Adun P., Arab K., and Ibrahim S., Extending the Shelf Life of Strawberries: Physicochemical and Antibacterial Effects of Carboxymethyl Cellulose and Gelatin Coatings with Lemon Essential Oil, *Food Sci. Nut.*, **13**, 70222, 2025.
22. Shahbazi Y., Characterization of Nanocomposite Films Based on Chitosan and Carboxymethyl Cellulose Containing Ziziphora Clinopodioides Essential Oil and Methanolic Ficus Carica Extract, *J. Food Proc. Preserv.*, **42**, 13444, 2018.
23. Abdullah A.H., Awad-Allah M.A., Abd-Elkarim N.A., Ahmed Z.F., and Taha E.M., Carboxymethyl Cellulose from Banana Rachis: A Potential Edible Coating to Extend the Shelf Life of Strawberry Fruit, *Agriculture*, **13**, 1058, 2023.
24. Tesfay S.Z. and Magwaza L.S., Evaluating the Efficacy of Moringa Leaf Extract, Chitosan and Carboxymethyl Cellulose as Edible Coatings for Enhancing Quality and Extending Postharvest Life of Avocado (*Persea Americana* Mill) Fruit, *Food Pack. Shelf Life*, **11**, 40-48, 2017.
25. Chen H., Meng X., Zhang F. et al., Development of Chitosan-Carboxymethyl Cellulose Edible Films Loaded with Blackberry Anthocyanins and Tea Polyphenols and Their Application in Beef Preservation, *Food Hydrocol*., **164**, 111198, 2025.
26. El-Sayed H.S., El-Sayed S.M., Mabrouk A.M., Nawwar G.A., and Youssef A.M., Development of Eco-friendly Probiotic Edible Coatings Based on Chitosan, Alginate and Carboxymethyl Cellulose for Improving the Shelf Life of UF Soft Cheese, *J. Polym. Environ.*, **29**, 1941-1953, 2021.
27. Ruan C., Zhang Y., Sun Y., Gao X., Xiong G., and Liang J., Effect of Sodium Alginate and Carboxymethyl Cellulose Edible Coating with Epigallocatechin Gallate on Quality and Shelf Life of Fresh Pork, *Int. J. Biol. Macromol*., **141**, 178-184, 2019.
28. Zabihollahi N., Alizadeh A., Almasi H., Hanifian S., and Hamishekar H., Development and Characterization of Carboxymethyl Cellulose Based Probiotic Nanocomposite Film Containing Cellulose Nanofiber and Inulin for Chicken Fillet Shelf Life Extension, *Int. J. Biol. Macromol*., **160**, 409-417, 2020.
29. How Y.-H., Lim E.M.-Y., Kong I., Kee P.-E., and Pui L.-P., Development of Carboxymethyl Cellulose–Chitosan-Based Antibacterial Films Incorporating a *Persicaria Minor* Huds. Essential Oil Nanoemulsion, *Sust. Food. Technol*., **2**, 400-414, 2024.
30. Fayyazi S., Ravan M., Heidari N.J., and Shad MM., Physical, Mechanical, and Antimicrobial Properties of Bioactive Carboxymethyl Cellulose Film Containing Ajwain and Myrtle Essential Oils and Its Effect on the Shelf Life of Turkey Meat, *J. Food Sci. Technol*., **18**, 2021.
31. Mahjoob R. and Atay Salehi A., Evaluation of the Effect of Carboxymethyl Cellulose Film Containing Cinnamon and Clove Essential Oils on the Shelf Life of Veal Meat at Refrigeration Temperature, *J. Food Preserv. Pack*, **16**, 103-110, 2019.
32. Tabari F., Rezaei M., Aryaee P., and Abdollahi M., Evaluation of Some Physical and Mechanical Properties of Edible Film Prepared from Carboxymethyl Cellulose and Tragacanth Gum, *Iran. Food Sci. Technol. Res. J.*, **12**, 88-97, 2016.
33. Ahmadi H., Ghanbarzadeh B., and Panahpour E., Improving of Physical Properties of Starch and Starch–Carboxymethyl Cellulose Composite Biodegradable Films, *J. Food. Sci. Technol.*, **6**, 1-11, 2009,
34. Fatahi R., Ghanbarzade B., and Dehghanniya J., Comparison of Antimicrobial and Chemopreventive Properties of Carboxymethylcellulose-Based Emulsion Films Containing Macro- and Nanoemulsions of Cinnamon Essential Oil, *Food Sci. Nutr.*, **8**, 6568-6579, 2020.
35. Esteghlal S., Niakousari M., and Hosseini S.M.H., Physical and Mechanical Properties of Gelatin-CMC Composite Films under the Influence of Electrostatic Interactions, *Int. J. Biolog. Macromol.*, **114**, 1-9, 2018.