



Physical, mechanical, and antimicrobial properties of an active nano-composite film containing garlic (*Allium sativum* L.) extract

Fatemeh Nourkami¹ and Dariush Khademi Shurmasti^{2*}

1. M.Sc. Graduated, Department of Agriculture, Sava.C., Islamic Azad University, Savadkooh, Iran

2*. Corresponding Author, Department of Agriculture, Sava.C., Islamic Azad University, Savadkooh, Iran,
E-Mail: Da.khademi@iau.ac.ir

Received: March 2024

Revised: March 2025

Accepted: March 2025

Abstract

Background and objectives: Garlic (*Allium sativum* L.) exhibits strong antimicrobial activity, primarily due to its organic sulfur compounds such as thiosulfates, especially allicin. Given the environmental concerns and potential health risks associated with synthetic additives, there is growing interest in developing active, biodegradable packaging materials incorporating herbal essential oils and plant extracts. This study aimed to fabricate and assess the mechanical, physical, and antimicrobial properties of an active composite film made from polyvinyl alcohol, chitosan, and nanoclay, incorporating 2% and 4% garlic extract, for potential application in food packaging.

Methodology: First, separate solutions were prepared by dissolving polyvinyl alcohol (5%), chitosan (2%), and nanoclay (4%) in appropriate solvents, along with an aqueous extract of garlic. Film fabrication was carried out using the casting method, based on five experimental treatments: (1) polyvinyl alcohol (PVA) alone, (2) PVA/chitosan, (3) PVA/chitosan/nanoclay, and (4–5) PVA/chitosan/nanoclay films containing 2% and 4% garlic extract (montmorillonite-based). The mechanical properties of the films, including tensile strength (TS), elongation at break (EB), and Young's modulus (YM), were measured using a texture analyzer. Physical properties such as film thickness were assessed with a digital micrometer, while solubility (WS), water absorption capacity (WAC), and water vapor permeability (WVP) were evaluated using ASTM standard methods. Opacity was measured via spectrophotometry. Antimicrobial activity against *Staphylococcus aureus* and *Escherichia coli* was assessed using the disc diffusion method on Mueller-Hinton agar. The diameter of the inhibition zones was recorded as an indicator of antimicrobial efficacy. Data were analyzed in a completely randomized design (CRD) with five treatments and three replications using one-way ANOVA in SPSS software, and treatment means were compared using Duncan's test at a significance level of $p < 0.05$.

Results: The structural components of the films and the garlic extract concentration significantly influenced the mechanical, physical, and antimicrobial properties. The active triple composite films containing garlic extract exhibited higher tensile strength and Young's modulus (approximately 30 MPa and 0.14 MPa, respectively) while demonstrating the lowest elongation at break. The incorporation of chitosan and nanoclay into the polyvinyl alcohol matrix increased film thickness, with triple composite films showing greater thickness (0.17 mm) and opacity. These films also exhibited the lowest values of water absorption, solubility, and water vapor permeability. Unlike most mechanical and physical properties, the antimicrobial effectiveness of the films was directly dependent on garlic extract concentration. In general, the garlic extract showed stronger antibacterial effects against gram-positive *S. aureus* than gram-negative *E. coli*. In films containing 2% and 4% garlic extract, the inhibition zones for *S. aureus* measured 21.6 mm and 26.55 mm, respectively, and for *E. coli*, 16.5 mm and 19.1 mm, respectively.

Conclusion: The active triple composite film (polyvinyl alcohol/chitosan/montmorillonite) containing 4% garlic extract demonstrated the lowest WVP and higher values for TS, YM, and thickness. These



characteristics enable the film to minimize moisture transfer, preserve the structural integrity of packaged food, and delay spoilage, thereby extending shelf life. Hence, enriching biodegradable triple composite films with garlic extract presents a promising approach for developing innovative food packaging materials with extended storage capabilities.

Keywords: polyvinyl alcohol (PVA), garlic (*Allium sativum* L.), composite film, chitosan, nanoclay

خصوصیات فیزیکی، مکانیکی و ضد میکروبی فیلم نانومرکب فعال حاوی عصاره سیر (*Allium sativum* L.)

فاطمه نورکامی^۱ و داریوش خادمی شورمستی^{۲*}

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه کشاورزی، واحد سوادکوه، دانشگاه آزاد اسلامی، سوادکوه، ایران

۲- نویسنده مسئول، دانشیار، گروه کشاورزی، واحد سوادکوه، دانشگاه آزاد اسلامی، سوادکوه، ایران، پست الکترونیک: Da.khademi@iau.ac.ir

تاریخ دریافت: اسفند ۱۴۰۲

تاریخ اصلاح نهایی: اسفند ۱۴۰۳

تاریخ پذیرش: اسفند ۱۴۰۳

چکیده

سابقه و هدف: سیر (*Allium sativum* L.) با دارا بودن ترکیبات آلی گوگردی مانند تیوسولفات‌ها به‌ویژه آلیسین فعالیت ضد میکروبی دارد. با توجه به مخاطرات زیست محیطی و نیز نگرانی خطر بالقوه افزودنی‌های سنتزی، ساخت و بکارگیری بسته‌بندی‌های زیست تخریب پذیر فعال حاوی اسانس و عصاره‌های گیاهی به صورت فیلم و پوشش چندسازه‌ای در صنعت غذا مورد توجه قرار گرفته است. هدف از اجرای این تحقیق، ساخت و ارزیابی خصوصیات مکانیکی، فیزیکی و ضد میکروبی فیلم کامپوزیت فعال بر پایه پلی وینیل الکل / کیتوزان / نانورس همراه با غلظت‌های ۲ و ۴ درصد عصاره سیر برای کاربردهای آینده‌نگر آن در بسته‌بندی مواد غذایی بود.

مواد و روش‌ها: ابتدا محلول‌های پلی وینیل الکل (۵ درصد)، کیتوزان (۲ درصد) و نانورس (۴ درصد) و عصاره آبی سیر آماده شدند. سپس فیلم‌ها با استفاده از روش ریخته‌گری براساس تیمارهای آزمایشی شامل فیلم پلی وینیل الکل، فیلم پلی وینیل الکل / کیتوزان، فیلم پلی وینیل الکل / کیتوزان / نانورس و فیلم‌های پلی وینیل الکل / کیتوزان / نانورس (مونت‌موریلونیت) حاوی غلظت‌های ۲ و ۴ درصد عصاره سیر (در مجموع ۵ تیمار) ساخته شدند. خصوصیات مکانیکی فیلم‌ها شامل استحکام کششی (TS)، ازدیاد طول در نقطه شکست (EB) و مدول یانگ (YM) با استفاده از دستگاه بافت‌سنج، خصوصیات فیزیکی شامل ضخامت با استفاده از ریزسنج، حلالیت (WS)، جذب رطوبت (WAC)، نفوذپذیری در برابر بخار آب (WVP) با روش‌های استاندارد ASTM، کدورت با استفاده از اسپکتروفتومتر و خصوصیات ضد میکروبی فیلم علیه باکتری‌های *استافیلوکوکوس اورئوس* (*Staphylococcus aureus*) و *اشریشیا کلی* (*Escherichia coli*) با روش انتشار از دیسک بر روی محیط کشت مولر هینتون آگار ارزیابی شد. اختلاف قطر هاله‌های تشکیل شده پیرامون دیسک‌ها به عنوان شاخص فعالیت ضد میکروبی فیلم‌ها در نظر گرفته شد. در قالب طرح کاملاً تصادفی با ۵ تیمار و ۳ تکرار، داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار آماری SPSS به روش تجزیه واریانس یک طرفه تجزیه و تحلیل و میانگین‌ها در سطح معنی‌داری ۵ درصد با استفاده از آزمون دانکن مقایسه شدند.

نتایج: خصوصیات مکانیکی، فیزیکی و ضد میکروبی فیلم‌های ساخته شده تحت تأثیر اجزای سازه‌ای فیلم‌ها و غلظت عصاره سیر قرار گرفت. استحکام کششی و مدول یانگ (به ترتیب حدود ۳۰ مگاپاسکال و ۰/۱۴ مگاپاسکال) در فیلم‌های کامپوزیت سه سازه‌ای فعال حاوی عصاره سیر بیشتر بود، در حالی که این فیلم‌ها کمترین درصد ازدیاد طول در نقطه شکست را داشتند. افزوده شدن کیتوزان و نانورس به پلی وینیل الکل و ساخت فیلم‌های کامپوزیت موجب افزایش ضخامت فیلم‌ها شد، به‌طوری‌که فیلم‌های کامپوزیت سه سازه‌ای ضخیم‌تر (۰/۱۷ میلی‌متر) و در عین حال کدرتر بودند. کمترین درصد جذب آب و حلالیت و نیز نفوذپذیری در برابر بخار آب در فیلم‌های کامپوزیت سه سازه‌ای فعال دیده شد. بر خلاف اغلب خصوصیات مکانیکی و فیزیکی فیلم‌ها، اثر ضد میکروبی فیلم‌های کامپوزیت فعال تحت تأثیر معنی‌دار و مستقیم غلظت عصاره سیر مورد استفاده بود. به‌طور کلی اثر ضد میکروبی عصاره سیر در برابر باکتری گرم مثبت (*استافیلوکوکوس اورئوس*) بیش از باکتری گرم منفی (*اشریشیا کلی*) بود، در عین حال در مورد هر دو باکتری، عصاره سیر در غلظت ۴ درصد اثربخشی ضد میکروبی بالاتری داشت. در غلظت‌های ۲ و ۴ درصد عصاره سیر قطر هاله عدم رشد باکتری *استافیلوکوکوس اورئوس* به ترتیب ۲۱/۶ و ۲۶/۵۵ میلی‌متر و باکتری *اشریشیا کلی* به ترتیب ۱۶/۵ و ۱۹/۱ میلی‌متر بود.

نتیجه‌گیری: فیلم سه سازه‌ای (پلی وینیل الکل / کیتوزان / مونت‌موریلونیت) فعال حاوی ۴ درصد عصاره سیر با دارا بودن WVP کمتر، TS، TM و ضخامت بیشتر می‌تواند ضمن جلوگیری از تبادل رطوبت مواد غذایی و حفظ یکپارچگی محصول بسته‌بندی شده، فرایند

فساد محصولات را به تأخیر انداخته و ماندگاری محصولات را افزایش دهد. بنابراین، غنی سازی فیلم زیست تخریب پذیر سه سازه ای پلی وینیل الکل / کیتوزان / نانو رس با عصاره سیر می تواند آن را به یک گزینه بالقوه قابل توصیه برای بسته بندی های جدید برای ذخیره سازی طولانی مدت تر مواد غذایی تبدیل کند.

واژه های کلیدی: پلی وینیل الکل، سیر، فیلم کامپوزیت، کیتوزان، نانو رس.

مقدمه

در سال های اخیر بیماری هایی که از طریق غذا به انسان منتقل می شوند به معضلی بزرگ تبدیل شده و عوارض جانبی منفی مواد نگهدارنده مصنوعی افزوده شده به مواد غذایی باعث ایجاد شک و تردید در مورد این مواد نگهدارنده شده است (Rohr *et al.*, 2019). اسانس ها و عصاره های گیاهی که مواد شیمیایی فرار و معطر با فعالیت ضدباکتریایی مناسب هستند، از جمله ترکیبات جایگزین می باشند. سیر (*Allium sativum* L.) متعلق به خانواده Amaryllidaceae گیاهی یکساله است با پیازهایی که از یک ساقه دیسکی تشکیل شده است. سیر یک عامل ضد باکتری است که در واقع می تواند رشد عوامل عفونی را مهار کند و در عین حال از بدن در برابر عوامل بیماری زا محافظت کند (Farbman *et al.*, 1993). سیر دارای ترکیبات آلی گوگردی مانند تیوسولفات ها به ویژه آلیسین است. این ماده دارای خاصیت ضدباکتریایی است که هنگام له شدن حبه های سیر آزاد می شود و از گیاه در برابر انگل ها و قارچ های خاک محافظت می کند و مسئول بوی تند سیر است. آلیسین یک سلاح طبیعی در برابر عفونت است که با مسدود کردن دو گروه از آنزیم ها، پروتئینازهای سیستمی و دهیدروژنازهای الکلی، تصور می شود یک ترکیب ضد میکروبی وسیع الطیف است (Abiy & Berhe, 2016). با توجه به نگرانی از خطر بالقوه افزودنی های سنتزی، توسعه بکارگیری ترکیبات زیست فعال در ترکیب بسته بندی های فعال مواد غذایی مورد توجه قرار گرفته است. ترکیبات طبیعی مانند عصاره و اسانس گیاهی که اغلب دارای خواص ضد اکسیدانی و ضد میکروبی هستند، در فرمولاسیون لفاف های فعال استفاده شده اند.

طی دهه های اخیر، مواد بسته بندی دوستدار محیط زیست

از جمله زیست پلیمرها جایگزین انواع سنتی آنها در بسته بندی های جدید شده و توجه مصرف کنندگان را به خود جلب کرده است. کربوهیدرات ها، پروتئین ها و لیپیدها عمدتاً به عنوان مواد خام برای بسته بندی های زیست تخریب پذیر استفاده شده و می توانند به تنهایی یا به صورت ترکیبی استفاده شوند (Pandey *et al.*, 2022). در این بین، کیتوزان (CH) اغلب در ساخت پوشش های خوراکی استفاده می شود. این ماده فعالیت ضدباکتریایی ذاتی، توانایی عالی در تشکیل فیلم و خواص ممانعتی در برابر اکسیژن را از خود نشان می دهد (Zhang *et al.*, 2021). در عین حال، برای تقویت خصوصیات کششی و سدی فیلم های بسته بندی مبتنی بر زیست پلیمر، افزودن نانوپرکننده های مختلف پیشنهاد شده است. نانو رس های سیلیکات لایه ای از جمله امیدوارکننده ترین مواد در بین نانوپرکننده های مختلف هستند. افزودن مقادیر کمی از نانوپرکننده ها مانند نانورس به زیست پلیمرها باعث می شود کلاس جدیدی از فیلم های بسته بندی مبتنی بر زیست نانوکامپوزیت ایجاد شود (Rhim *et al.*, 2013). پلی وینیل الکل (PVA) یک پلیمر مصنوعی نیمه کریستالی آبریز است که حاوی تعداد زیادی از گروه های هیدروکسیل است و به راحتی می تواند پیوندهای هیدروژنی را با مولکول های آب آزاد تشکیل دهد. برای غلبه بر خواص مکانیکی ضعیف PVA معمولاً آن را با کیتوزان مخلوط می کنند تا از فعل و انفعالات بین این دو ماده استفاده شود. گزارش شده است که کیتوزان خواص مکانیکی PVA را با افزایش مدول یانگ بهبود می بخشد (Olarte-Paredes *et al.*, 2021). اخیراً، پلی وینیل الکل (PVA) به یک ماتریس کیتوزان / مونت موریلونیت اضافه شد و به عنوان یک نرم کننده مؤثر عمل کرده و خواص ممانعتی و خصوصیات ضد میکروبی را تقویت کرد. ضمن اینکه نشان

(۲۰۱۹) تهیه شد. به طور خلاصه، ابتدا حبه‌های سیر تهیه شده را به منظور جداسازی بهتر پوست در آب خیس کرده، سپس پوست جدا و با آب شستشو داده شد. بعد از شستشو، سیرها با مخلوط‌کن خانگی (مولینکس، فرانسه) کاملاً خرد شده و با نسبت ۱:۱ با آب مقطر مخلوط و به مدت ۲۴-۴۸ ساعت در دمای کمتر از ۱۵ درجه سانتی‌گراد نگهداری گردید. در پایان مدت نگهداری، ترکیب ابتدا از صافی پارچه‌ای برای جداسازی ذرات درشت سیر و در ادامه از کاغذ صافی واتمن شماره ۱ عبور داده شد. در پایان پس از سانتریفوژ با سرعت ۶۰۰۰ دور در دقیقه به مدت ۱۵ دقیقه عصاره سیر تهیه شد.

آماده‌سازی فیلم‌ها

فیلم‌ها با استفاده از روش ریخته‌گری (Casting) تهیه شدند (Haghighi et al., 2019). محلول کیتوزان (۲ درصد وزنی/حجمی) با حل کردن مقدار مشخصی کیتوزان در اسید استیک ۱ درصد با هم‌زدن یک‌شبه در دمای اتاق تهیه شد. محلول پلی‌وینیل الکل (۵ درصد وزنی/حجمی) با حل کردن PVA در آب مقطر با هم‌زدن در دمای ۹۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲ ساعت و محلول نانومونت‌موریلونیت (۴ درصد وزنی/وزنی) از طریق انحلال مقدار مشخصی نانورس در آب مقطر آماده شد. هر محلول از PVA، CH₃ و MMT در نسبت جرمی ۱:۱:۱ مخلوط شده و در دمای اتاق به مدت ۱ ساعت هم زده شد. دو غلظت مختلف (۲ و ۴ درصد) از عصاره سیر (Gar) مطابق با تیمارهای آزمایشی به محلول‌ها اضافه شد و به مدت ۱ ساعت در دمای اتاق هم‌زده شد. در نهایت ۲۰ گرم از مخلوط‌ها در پتری ریخته شده و در آن با دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت خشک شدند. فیلم‌های خشک شده با دقت جدا شده و تا زمان تجزیه و تحلیل در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی ۵۰ درصد نگهداری گردیدند.

اندازه‌گیری خصوصیات فیزیکی و مکانیکی فیلم‌ها

ضخامت فیلم با استفاده از یک ریزسنج با دقت ۰/۰۱ میلی‌متر اندازه‌گیری شد. پنج نقطه برای هر فیلم اندازه‌گیری

داده شد، فیلم کامپوزیتی از زیست‌پلیمر کیتوزان و پلیمر مصنوعی PVA می‌تواند استحکام مکانیکی پایین پلیمر طبیعی را جبران کند (Liu et al., 2018). به هر حال، مطالعات تحقیقاتی متعددی بر روی فیلم‌های کامپوزیت ساخته شده از کیتوزان و PVA در کاربردهای غذایی انجام شده است (Liu et al., 2017; Choi et al., 2022; Khademi Shurmasti et al., 2023). از سویی، استفاده از پوشش / فیلم خوراکی به عنوان حامل ترکیبات زیست‌فعال می‌تواند با درون‌پوشانی شدن در شبکه پلیمری، منجر به کاهش مقادیر مورد نیاز این ترکیبات شده و تأثیر منفی احتمالی مانند طعم شدید و تغییرات حسی را کاهش دهد و آزادسازی کنترل شده‌ای را در طول ذخیره‌سازی فراهم کند (Jridi et al., 2019).

تحقیقات نسبتاً محدودی در رابطه با بکارگیری عصاره سیر در ترکیب فیلم مرکب سه‌گانه انجام شده است. از این رو، این مطالعه با هدف تهیه فیلم مرکب فعال سه‌گانه پلی وینیل الکل / کیتوزان / مونوموریلونیت حاوی غلظت‌های ۲ و ۴ درصد عصاره سیر و بررسی خواص مکانیکی، فیزیکی و ضد میکروبی آن در مهار رشد باکتری‌های /ستافیلوکوکوس /اورئوس و /شریشیا کلی و کاربردهای آینده‌نگر آن برای بسته‌بندی مواد غذایی فعال اجرا گردید.

مواد و روش‌ها

مواد

پودر کیتوزان با وزن مولکولی ۱۹۰-۵۰ کیلودالتون و درجه استیل‌زدایی ۸۵ درصد از شرکت نانونین پلیمر (ایران)، پلی‌وینیل الکل کاملاً هیدرولیز شده و نانو مونوموریلونیت (MMT, K10) از شرکت سیگما آلدریج (آلمان)، گلیسرول، اسید استیک گلاسیال ۹۹ درصد و سایر مواد شیمیایی و محیط‌های کشت مورد نیاز با درجه خلوص تجزیه‌ای از شرکت مرک (آلمان) خریداری شد. بوته‌های سیر از بازار محلی خریداری شد.

تهیه عصاره

عصاره به روش پیشنهادی Hassanzadeh و همکاران

۲۴ ساعت اندازه‌گیری شد (Wang et al., 2019). حلالیت فیلم به صورت درصد کاهش وزن خشک فیلم پس از غوطه‌ور شدن در مقایسه با وزن خشک اولیه فیلم بیان شد. آزمون در سه تکرار انجام شد. برای اندازه‌گیری میزان جذب رطوبت (WAC)، فیلم‌ها پس از خشک شدن ابتدایی در دسیکاتور حاوی سیلیکاژل توزین شدند. در مرحله بعد، فیلم‌ها درون ظروف محتوای آب مقطر در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند. فیلم‌ها تا زمان رسیدن به وزن ثابت به صورت دوره‌ای و در فواصل زمانی معین توزین شدند. میزان جذب رطوبت مطابق با دستورالعمل شماره D570 استاندارد ASTM به صورت نسبت اختلاف وزن اولیه و نهایی فیلم به وزن اولیه فیلم برحسب درصد محاسبه و تعیین شد. کدورت فیلم (با دستورالعمل شماره D1746-97 استاندارد ASTM) با استفاده از دستگاه اسپکتوفتومتری به صورت نسبت میزان جذب در ۶۰۰ نانومتر بر ضخامت فیلم (میلی‌متر) محاسبه و گزارش گردید (Pathare et al., 2013).

ارزیابی فعالیت ضد میکروبی فیلم‌ها

بررسی فعالیت ضد میکروبی فیلم‌های حاوی عصاره‌های گیاهی با روش انتشار از دیسک انجام شد. فیلم‌ها با استفاده از یک قالب به دیسک‌هایی به قطر ۱۰ میلی‌متر تبدیل شدند. قبل از قرار دادن دیسک‌ها روی سطح محیط کشت، عمل کشت سطحی با استفاده از ۱۰۰ میکرولیتر محیط کشت مایع محتوی تقریباً 10^8 کلنی در میلی‌لیتر از باکتری‌های *استافیلوکوکوس اورئوس* و *شریشیا کالی* انجام شد. دیسک‌ها در شرایط کاملاً استریل بر روی محیط کشت مولر هینتون آگار قرار گرفته و به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۳۷ درجه سانتی‌گراد گرمخانه‌گذاری شدند. اختلاف قطر هاله‌های تشکیل شده پیرامون دیسک‌ها به عنوان شاخص فعالیت ضد میکروبی فیلم‌ها در نظر گرفته شد (Ansarifard & Moradinezhad, 2022).

تجزیه و تحلیل آماری

در قالب یک طرح کاملاً تصادفی با ۵ تیمار شامل فیلم

گردید. میانگین از سه تکرار فیلم محاسبه شد. خصوصیات مکانیکی شامل استحکام کششی (TS) و ازدیاد طول در نقطه شکست (EB) با استفاده از دستگاه بافت‌سنج ارزیابی گردید. اندازه‌گیری‌ها در دمای اتاق انجام شد و میانگین پنج تکرار برای هر نمونه در نظر گرفته شد. مقاومت کششی و کشش‌پذیری با استفاده از رابطه‌های ۱ و ۲ محاسبه گردید.

$$\text{رابطه (۱)} \quad TS \text{ (N/m}^2\text{)} = F / A$$

$$\text{رابطه (۲)} \quad EB \text{ (\%)} = (\Delta L / L) \times 100$$

که در آن، F بیشینه نیرو برحسب نیوتن، A سطح مقطع درگیر (ضخامت $\times$ عرض)، L طول درگیر بین دو گیره دستگاه و ΔL تغییر طول پیش از پاره‌شدن فیلم‌هاست. مطابق با دستورالعمل شماره D882-18 استاندارد ASTM، استحکام کششی و ازدیاد طول در هنگام شکست، مستقیماً از منحنی‌های تنش-کرنش تعیین شدند. مدول یانگ (YM) برحسب مگاپاسکال به صورت شیب ناحیه الاستیک منحنی‌های تنش-کرنش محاسبه شد.

نفوذپذیری در برابر بخار آب (WVP) فیلم با استفاده از روش Fu و همکاران (۲۰۲۱) با اندکی تغییرات آزمایش شد. به طور خلاصه دهانه بطری شیشه‌ای، حاوی ۱۰ میلی‌لیتر آب مقطر، با یک فیلم با استفاده از یک نوار لاستیکی مهر و موم شد و بعد در انکوباتور در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی 50 ± 2 درصد قرار داده شد. وزن بطری هر ساعت به مدت ۲۴ ساعت اندازه‌گیری شد. نفوذپذیری بخار آب فیلم با استفاده از رابطه‌های زیر محاسبه شد. این آزمایش برای هر نمونه سه بار تکرار گردید.

$$\text{رابطه (۳)} \quad WVTR = \frac{\Delta \omega}{A \times \Delta t}$$

$$\text{رابطه (۴)} \quad WVP = WVTR \times \frac{d}{sp}$$

که در آن، $\Delta \omega$ کاهش وزن (g)، A سطح مقطع فیلم (m^2)، Δt فاصله زمانی (h)، d میانگین ضخامت لایه (mm) و sp گرادیان فشار جزئی بخار آب در سطوح داخلی و خارجی فیلم (Pa) است. حلالیت در آب (WS) فیلم با روش غوطه‌وری در آب مقطر در دمای ۲۵ درجه سلسیوس به مدت

مقایسه گردیدند.

نتایج

نتیجه تجزیه و تحلیل واریانس (جدول ۱) نشان داد تأثیر تیمارهای آزمایشی بر خصوصیات مکانیکی (استحکام کششی، پارگی در نقطه شکست و مدول یانگ) و فیزیکی (ضخامت، جذب آب، حلالیت، نفوذپذیری در برابر بخار آب و کدورت) در سطح احتمال ۵ درصد معنی دار بود.

جدول ۱- تجزیه واریانس تأثیر عصاره سیر بر خصوصیات مکانیکی و فیزیکی فیلم‌های مرکب پایه پلی‌وینیل الکل

Table 1. Analysis of variance of the effect of garlic extract on the mechanical and physical properties of polyvinyl alcohol-based composite films

S.O.V	d.f.	M.S.							
		Mechanical properties			Physical properties				
		TS	EB	YM	Thickness	WAC	WS	WVP	Opacity
Garlic extract	4	48.21**	687.33**	0.010*	0.0006*	82.54*	38.60*	4.16*	3.74*
Experimental error	10	1.98	5.04	0.00014	0.00004	9.63	11.21	0.431	0.052
C.V. (%)		14.4	20.0	15.78	8.9	8.0	7.2	23.5	46.67

* and **: significant at 5 and 1% probability levels, respectively.

TS: Tensile strength, EB: Elongation at break, YM: Young's modulus, WAC: Water absorption capacity, WS: Water solubility, WVP: Water vapor permeability

مقدار TS نداشت. روند مشابهی را در مقادیر YM می‌توان مشاهده کرد که در آن نیز فیلم‌های کامپوزیتی فعال حاوی عصاره، بیشترین مقدار را نشان دادند. گنجاندن CH به PVA و ساخت فیلم کامپوزیت دوسازه‌ای PVA / CH مقدار EB را از ۷۴/۵۴ درصد به ۹۴/۵۲ درصد افزایش داد، در حالی که با افزوده شدن MMT و متعاقباً عصاره به ترکیب فیلم کامپوزیت فعال مقدار EB با کاهش معنی‌داری همراه بود و به ۶۱/۷۵ درصد در فیلم کامپوزیت سه‌سازه‌ای حاوی ۴ درصد عصاره رسید ($p < 0.05$).

خصوصیات مکانیکی

خواص مکانیکی فیلم کامپوزیتی شامل استحکام کششی (TS)، پارگی در نقطه شکست (EB) و مدول یانگ (YM) در جدول ۲ نشان داده شده است. مقادیر TS از ۲۱/۸۸ تا مگاپاسکال در فیلم کامپوزیت دوسازه‌ای PVA / CH تا ۳۰/۶۰ مگاپاسکال در فیلم کامپوزیت فعال متغیر بود. گنجاندن MMT و ساخت فیلم کامپوزیت سه‌سازه‌ای به‌طور معنی‌داری موجب افزایش استحکام کششی فیلم‌ها شد ($p < 0.05$). در عین حال، افزودن غلظت‌های ۲ و ۴ درصد عصاره در فیلم کامپوزیتی سه‌سازه‌ای، تغییر قابل توجهی در

جدول ۲- مقایسه میانگین تأثیر عصاره سیر بر برخی خصوصیات مکانیکی فیلم‌های مرکب بر پایه پلی‌وینیل الکل

Table 2. Mean comparison of the effect of garlic extract on certain mechanical properties of polyvinyl alcohol-based composite films

	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Young's modulus (MPa)
PVA	23.58±1.20 ^b	75.54±1.16 ^b	0.11±0.00 ^b
PVA+CH	21.88±3.15 ^b	94.52±2.21 ^a	0.10±0.04 ^b
PVA+CH+MMT	29.10±5.15 ^a	64.51±5.12 ^c	0.13±0.07 ^a
PVA+CH+MMT+Gar 2%	30.60±3.16 ^a	56.30±4.17 ^d	0.14±0.05 ^a
PVA+CH+MMT+Gar 4%	30.00±2.23 ^a	61.75±2.14 ^c	0.14±0.03 ^a

Values are presented as mean±SD, n=3. In each column, means with common letters are in the same statistical group at a 5 % probability level (Duncan test).

PVA: Polyvinyl alcohol, CH: Chitosan, MMT: Montmorillonite, and Gar: Garlic extract.

خصوصیات فیزیکی

همانطور که در جدول ۳ آمده است، کمترین ضخامت مربوط به فیلم پلی‌وینیل الکل بود که با افزوده شدن کیتوزان و بعد مونت‌موریلونیت به فرمولاسیون فیلم‌های کامپوزیت، ضخامت فیلم‌ها به طور معنی‌داری بیشتر شد ($p < 0.05$). در عین حال، افزوده شدن عصاره سیر تفاوت معنی‌داری در ضخامت فیلم‌های کامپوزیت سه‌سازه‌ای ایجاد نکرد. ظرفیت جذب رطوبت فیلم‌ها با گنجاندن MMT به ترکیب فیلم کاهش معنی‌داری یافت ($p < 0.05$). ضمن اینکه افزودن ۲ و ۴ درصد عصاره سیر به ترکیب فیلم کامپوزیت سه‌سازه‌ای موجب کاهش معنی‌دار ظرفیت جذب

رطوبت شد. نتایج حلالیت در آب فیلم‌ها نشان داد ساخت فیلم‌های کامپوزیت دوسازه‌ای و بعد سه‌سازه‌ای به طور معنی‌داری موجب کاهش انحلال فیلم‌ها شد ($p < 0.05$). افزوده شدن عصاره سیر تأثیر قابل توجهی بر انحلال فیلم‌ها نداشت. همچنین مقادیر WVP از ۴/۱۰ تا ۶/۸۵ گرم میلی‌متر در مترمربع ساعت پاسکال متغیر بود. مقدار WVP فیلم‌ها با افزودن MMT و عصاره تحت تأثیر قرار گرفته و کاهش یافت ($p < 0.05$). در عین حال، مشاهده شد که افزودن ۲ و ۴ درصد عصاره در فیلم کامپوزیت سه‌سازه‌ای تأثیر قابل توجهی در WVP فیلم‌های خوراکی نداشت.

جدول ۳- مقایسه میانگین تأثیر عصاره سیر بر برخی خصوصیات فیزیکی فیلم‌های مرکب بر پایه پلی وینیل الکل

Table3. Mean comparison of the effect of garlic extract on certain physical properties of polyvinyl alcohol-based composite films

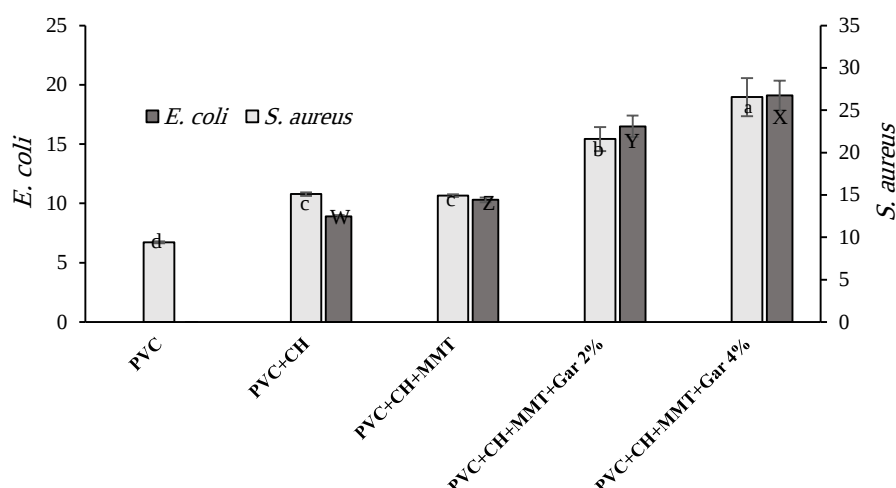
	Thickness (mm)	WAC (%)	WS (%)	WVP (g mm.m ⁻² h Pa)	Opacity
PVA	0.14±0.00 ^c	70.30±3.97 ^a	65.55±0.21 ^a	6.85±1.61 ^b	0.84±0.14 ^b
PVA+CH	0.15±0.02 ^b	77.51±1.77 ^a	63.32±0.11 ^b	6.00±1.30 ^b	1.25±0.55 ^b
PVA+CH+MMT	0.17±0.00 ^a	67.20±2.65 ^b	58.25±0.12 ^c	4.70±0.94 ^a	2.91±0.80 ^a
PVA+CH+MMT+Gar 2%	0.17±0.02 ^a	65.51±2.00 ^c	57.90±0.10 ^c	4.35±0.92 ^a	3.12±1.10 ^a
PVA+CH+MMT+Gar 4%	0.17±0.01 ^a	64.47±1.80 ^c	58.00±0.11 ^c	4.10±1.35 ^a	3.15±1.10 ^a

Values are presented as mean±SD, n=3. In each column, means with common letters are in the same statistical group at a 5 % probability level (Duncan test). PVA: Polyvinyl alcohol, CH: Chitosan, MMT: Montmorillonite, and Gar: Garlic extract; WAC: Water absorption capacity, WS: Water solubility, and WVP: Water vapor permeability.

خصوصیات ضد میکروبی

ارزیابی ضد میکروبی فیلم‌ها در برابر باکتری‌های منتخب /ستافیلوکوکوس/ اورئوس (گرم مثبت) و /شریشیا کلی (گرم منفی) به صورت اندازه‌گیری قطر هاله عدم رشد باکتری در شکل ۱ ارائه شده است. ساخت فیلم کامپوزیت دوسازه‌ای با افزوده شدن CH به ترکیب پایه PVA به وضوح موجب افزایش قطر هاله عدم رشد هر دو باکتری مورد مطالعه و یا به عبارتی بهبود خصوصیت ضد میکروبی

شد ($p < 0.05$). ضمن اینکه کارایی ضد میکروبی فیلم‌های کامپوزیت سه‌سازه‌ای با افزوده شدن عصاره سیر به طور معنی‌داری افزایش یافت، به طوری که بیشترین قطر هاله عدم رشد /ستافیلوکوکوس/ اورئوس (۲۶/۵۵ میلی‌متر) و /شریشیا کلی (۱۹/۱۰ میلی‌متر) در فیلم کامپوزیت فعال حاوی ۴ درصد عصاره سیر دیده شد ($p < 0.05$). همچنین به طور کلی می‌توان گفت اثربخشی ضد میکروبی فیلم‌ها در برابر باکتری‌های گرم مثبت بیش از گرم منفی بود.



شکل ۱- مقایسه میانگین تأثیر عصاره سیر بر قطر هاله عدم رشد *استافیلوکوکوس اورئوس* و *اشریشیا کلی* فیلم‌های بر پایه پلی‌وینیل الکل

Figure 1. Mean comparison of the effect of garlic extract on the inhibition zone diameter of *Staphylococcus aureus* and *Escherichia coli* in polyvinyl alcohol-based films

Values are presented as mean±SD, n=3. Means with common letters are in the same statistical group at a 5 % probability level (Duncan test), PVA: Polyvinyl alcohol, CH: Chitosan, MMT: Montmorillonite, and Gar: Garlic extract.

جدول ۴- ضرایب همبستگی بین فراسنجه‌های مکانیکی، فیزیکی و نوری فیلم‌های مرکب بر پایه پلی‌وینیل الکل حاوی عصاره سیر

Table 4. Correlation coefficients between the mechanical, physical, and optical parameters of polyvinyl alcohol-based composite films containing garlic extract

	Thickness	TS	EB	YM	WAC	WS	WVP	Opacity
Thickness	1							
TS	0.911	1						
EB	-0.741	-0.951	1					
YM	0.876	0.992	-0.960	1				
WAC	-0.705	-0.927	0.984	-0.949	1			
WS	-0.999	-0.927	0.766	-0.896	0.731	1		
WVP	-0.983	-0.908	0.741	-0.894	0.721	0.987	1	
Opacity	0.989	0.958	-0.823	0.937	-0.796	-0.995	-0.986	1

TS: Tensile strength, EB: Elongation at break, YM: Young's modulus, WAC: Water absorption capacity, WS: Water solubility, WVP: Water vapor permeability

بحث

گسترده در بازار استفاده می‌شوند، مانند پلی‌اتیلن با چگالی بالا (۲۲-۳۱ مگاپاسکال) قابل مقایسه بود اما کمی از پلی‌پروپیلن (۳۱-۳۸ مگاپاسکال) و پلی‌استایرن (۴۵-۸۳ مگاپاسکال) کمتر بود (Haghighi et al., 2020). مطابق داده‌های جدول ۴ یک همبستگی منفی شدیدی بین استحکام کششی فیلم‌ها و خصوصیات فیزیکی آنها شامل حلالیت، جذب رطوبت و نفوذپذیری در برابر بخار آب وجود دارد.

نتایج به‌دست آمده در این مطالعه نشان می‌دهد که افزودن MMT و عصاره سیر باعث افزایش استحکام کششی فیلم‌ها شده است. این به دلیل پیوند متقابل ایجاد شده ناشی از مواد زمینه‌ای و عصاره بوده که موجب تقویت فیلم می‌شود (Kaur et al., 2024). باید توجه داشت که مقادیر TS برای فیلم‌های فعال حاوی MMT و عصاره با فیلم‌های پلاستیکی که به‌طور

فیلم پایه افزایش می‌یابد، در حالی که عصاره سیر نقش زیادی در افزایش ضخامت فیلم ندارد که با نتایج گزارش شده توسط Choi و همکاران (۲۰۲۲) مطابقت دارد.

یکی از فراسنجه‌های مهم فیلم‌های خوراکی، حلالیت آنها در آب است که نیاز آن با توجه به هدف کاربرد متفاوت است. برای مثال، فیلم‌های با حلالیت کمتر برای ذخیره‌سازی‌های طولانی مدت تر غذا ترجیح داده می‌شوند، در حالی که فیلم‌های محلول برای غذای فوری ترجیح داده می‌شوند (Kaur et al., 2024). یافته‌های این مطالعه بیانگر این بود که فیلم مرکب PVA و CH در مقایسه با PVA به تنهایی، حلالیت کمتری داشتند ($p < 0.05$). با وجود اینکه کیتوزان یک پلیمر آبدوست است، آبدوستی شدید پلی‌وینیل الکل نسبت به کیتوزان باعث شده است که در رقابت برای جذب، پلی‌وینیل الکل مولکول‌های آب بیشتری را به خود جذب کند. ضمن اینکه نتایج حلالیت در آب با نتایج به‌دست‌آمده در مورد جذب رطوبت فیلم (۰/۷۳۱) و WVP (۰/۹۸۵۰) همبستگی زیادی داشت. نفوذپذیری بخار آب (WVP) عامل مهمی در انتخاب بسته‌بندی مواد غذایی است. WVP پایین در افزایش ماندگاری غذاها مؤثر است؛ در واقع کارایی فیلم‌های بسته‌بندی به توانایی آنها در جلوگیری یا حداقل کاهش انتقال رطوبت بین غذا و محیط اطراف مربوط می‌شود (Choi et al., 2022). همانطور که در جدول ۳ آمده است، WVP فیلم‌های حاوی MMT نسبت به سایر فیلم‌ها کاهش یافته است. تأیید شده است که وجود لایه‌های نانوذرات پراکنده منظم با نسبت‌های نسبتاً بزرگ در فیلم‌های نانوکامپوزیت منجر به کاهش قابل توجه WVP می‌شود. در این مطالعه، کاهش WVP فیلم‌های حاوی MMT را می‌توان به وجود ساختارهای لایه‌ای نانورس نسبت داد که مسیر پریپیچ و خمی برای انتشار ایجاد می‌کند، بنابراین انتقال رطوبت از طریق ماتریس را محدود کرده و ویژگی مانع‌تی فیلم‌های نانوکامپوزیت را بهبود می‌بخشد (Koosha & Hamed, 2019). از سوی دیگر، می‌توان کاهش نفوذپذیری به بخار آب را به ایجاد برهم‌کنش قوی بین نانوذرات خاک رس و زیست‌پلیمرها نسبت داد. در واقع، این برهم‌کنش‌ها فراسنجه انتشارپذیری را که در تعیین

یکی دیگر از فراسنجه‌های مهم خواص مکانیکی، کرنش است که به ماده اجازه می‌دهد در برابر تغییر شکل و شکست تحت کشش مقاومت کند. درصد کرنش به انعطاف‌پذیری و دوام مواد بستگی دارد. یک همبستگی منفی شدیدی بین استحکام کششی و کرنش فیلم‌ها وجود دارد (۰/۹۵۱-). به عبارتی فیلم‌های با استحکام کششی بالاتر کرنش کمتری دارند. روند کاهش در EB و افزایش شکنندگی در فیلم کامپوزیت فعال را می‌توان با ادغام توده‌های عصاره در شبکه ماتریس پلیمری توضیح داد که موجب محدودیت حرکت زنجیره‌های پلیمری می‌شود (Yun et al., 2019). گزارش شده است که فیلم‌های ساخته شده با استفاده از کیتوزان/پلی‌وینیل الکل/ژلاتین حاوی عصاره توت‌فرنگی هندی دارای مقادیر TS (۱۷/۷۲ تا ۲۱/۵۹ مگاپاسکال) کمتر و EB (۱۰۶/۴۳-۶۲/۲۴ درصد) بیشتر نسبت به موارد به‌دست‌آمده در این مطالعه هستند (Choi et al., 2022). به‌طورکلی، مواد با استحکام کششی بالا و مدول یانگ، اما درصد کرنش کم، بدون در نظر گرفتن ضخامت ماده، دارای پیوند متقاطع بالاتری هستند (Kaur et al., 2024). نتایج نشان می‌دهد که مواد زمینه‌ای و افزودنی‌ها در فیلم‌های کامپوزیت و فعال تأثیر قابل‌توجهی بر خواص مکانیکی فیلم‌های خوراکی دارند.

محدوده بهینه ضخامت فیلم به اهداف کاربرد بستگی دارد. برای مثال، در صنایع بسته‌بندی به دلیل استفاده کمتر از ویژگی‌های مانع‌تی نسبت به اکسیژن یا رطوبت، فیلم‌های نازک‌تر ترجیح داده می‌شوند، در حالی که برای حفظ یکپارچگی ساختاری محصولات تازه، فیلم‌های ضخیم‌تر مزایای بیشتری را برای کاربردهای پوشش‌دهی فراهم می‌کنند (Kumar et al., 2022). همبستگی مثبت و مستقیم شدیدی بین ضخامت و استحکام کششی فیلم‌ها (۰/۹۱۱) و کدورت (۰/۹۸۹) وجود داشت. ضمن اینکه مطابق انتظار همبستگی منفی شدیدی نیز بین ضخامت و خصوصیات فیزیکی فیلم‌ها شامل حلالیت، جذب رطوبت و نفوذپذیری در برابر بخار آب وجود داشت (جدول ۴). عوامل متعددی از جمله غلظت ماده مورد استفاده بر ضخامت فیلم تأثیر می‌گذارند. نتایج نشان می‌دهد ضخامت فیلم‌های خوراکی با افزودن CH و MMT به

سه‌سازه‌ای (PVA+CH+MMT) صرف‌نظر از وجود عصاره، توانست کارایی ضد میکروبی فیلم‌ها را افزایش دهد. این نتیجه ممکن است به دلیل تجمع بیش از حد مواد ضد میکروبی ناشی از تشکیل لایه‌های متعدد باشد که ممکن است از انتشار ماده ضد میکروبی جلوگیری کند. این نتایج نشان می‌دهد که اثرهای ضد میکروبی پوشش خوراکی را می‌توان براساس نوع و مقدار عوامل ضد میکروبی و پلیمرهای مورد استفاده و سایر عوامل محیطی تعیین کرد (Choi et al., 2022).

مشابه با نتایج تحقیق پیشتر به ارتباط مثبت بین مقدار مواد ضد میکروبی اضافه شده به فیلم و فعالیت ضد میکروبی آنها اشاره شده است (Amankwaah et al., 2020). همچنین این نتایج نشان می‌دهد که غلظت بهینه مواد ضد میکروبی برای رها شدن از ماتریس فیلم و نشان دادن فعالیت ضد میکروبی ضروریست (Choi et al., 2022). در مطابقت با نتایج این مطالعه، نتایج تحقیقی نشان داد که هم جدایه‌های بالینی و هم استاندارد/ستافیلوکوکوس/اورئوس و/شریشیا کلی حساسیت بالایی در برابر عصاره سیر نشان دادند. در عین حال، بر خلاف جدایه‌های بالینی/ستافیلوکوکوس/اورئوس، ایزوله بالینی/شریشیا کلی کمی مقاوم/ غیر حساس بود که می‌تواند با ماهیت نفوذپذیری/شریشیا کلی در ارتباط باشد، زیرا ۲۰ درصد غشای/شریشیا کلی از لیپید ساخته شده است، در حالی که این مقدار در غشای/ستافیلوکوکوس/اورئوس فقط ۲ درصد است (Abiy & Berhe, 2016). ضمن اینکه در این مطالعه مشاهده شد که با افزایش غلظت عصاره سیر، کارایی آن افزایش یافته و مهار و رشد باکتری‌های مورد بررسی به صورت هاله‌های شفاف مهاری بزرگتر در غلظت بالاتر (۴ درصد) کاهش یافته است. اثر ضدباکتریایی عصاره سیر توسط ترکیبات تیوسولفینات از جمله آلین، آلیسین و دیالیل سولفونات انجام می‌شود. آلیسین نقش ضدباکتریایی قوی دارد. سیر له شده ترکیبات آلیسین تولید می‌کند که در مهار سنتز DNA، RNA و پروتئین باکتریایی نقش دارد. سیر له شده آنزیم آلیناز را فعال می‌کند که پیش‌ساز آلین را به آلیل سولفونیک اسید تبدیل می‌کند که ناپایدار است. دو مولکول آلیل سولفونیک اسید به‌طور خود به خود با حذف آب متراکم

مقدار نفوذپذیری بسیار مؤثرند، تحت تأثیر قرار می‌دهد. زیرا با قرارگیری لایه‌های نانوذرات خاک رس در بین زنجیره‌ها و کاهش فضای آزاد مقدار انتشارپذیری مولکول‌های آب کنترل می‌شود (Zahed Karkaj & Peighambardoust, 2018). در مطابقت با یافته‌های این مطالعه، نتایج تحقیقات قبلی نشان داد استفاده از سطوح افزایشی نانورس با بهبود خصوصیات ممانعتی، موجب افزایش کارایی پوشش‌های نانوکامپوزیت می‌شود (Mardani Kiasari & Khademi Shurmasti, 2020; Ehsan & Khademi Shurmasti, 2021).

تحقیقات نشان داد که تفاوت آماری معنی‌داری در مقدار WVP فیلم‌های کامپوزیت کیتوزان/پلی‌وینیل الکل/ژلاتین حاوی سطوح مختلف عصاره دیده نشد (Choi et al., 2022). گزارش شده است که WVP یک فیلم به چندین متغیر، به‌ویژه ضخامت بستگی دارد (Martiny et al., 2020). مشاهده شده که WVP با ضخامت فیلم (۰/۷۰۵-) و نیز استحکام کششی فیلم (۰/۹۲۵-) همبستگی منفی دارد (جدول ۴). با توجه به اینکه افزودن اجزای فیلم کامپوزیت (CH، MMT) به فیلم PVA باعث افزایش ضخامت و استحکام کششی فیلم می‌شود، می‌توان نتیجه گرفت که ساختار سه‌گانه فیلم کامپوزیتی موجب کاهش WVP و در واقع افزایش کارایی فیلم شده است. براساس تحقیق Terzioğlu و همکاران (۲۰۲۱)، افزودن پوست پرتقال بیشتر به فیلم کیتوزان/پلی‌وینیل الکل باعث افزایش ضخامت و کاهش مقادیر WVP شد.

بالا تر بودن کارایی ضد میکروبی فیلم‌های مرکب PVA+CH نسبت به فیلم PVA ممکن است به دلیل فعالیت ضد میکروبی ذاتی کیتوزان باشد که قبلاً گزارش شده است (Zhang et al., 2021). یکی از خواص ضد میکروبی کیتوزان در برابر/ستافیلوکوکوس/اورئوس این است که کیتوزان روی سطح سلول یک غشای پلیمری تشکیل می‌دهد که می‌تواند مانع از ورود مواد مغذی به سلول شود (Dutta et al., 2009). نشان داده شد که افزودن اسانس سیر تأثیر هم‌افزایی قابل توجهی در بازدارندگی میکروبی در بسته‌بندی با فیلم‌های کیتوزان داشت (Molaei Aghaee et al., 2016). در مورد هر دو باکتری، تهیه فیلم‌های مرکب دو سازه‌ای (PVA+CH) و

کارایی ضد میکروبی عصاره سیر در برابر باکتری‌های گرم مثبت بیش از گرم منفی و وابسته به غلظت است. در عین حال، بکارگیری غلظت‌های ۲ و ۴ درصد عصاره سیر در ترکیب فیلم‌های سه سازه‌ای (پلی‌وینیل الکل/کیتوزان/مونت‌موریلونیت) فعال منجر به ساخت فیلم‌هایی با کارایی مطلوب شد. این فیلم‌های ساخته شده با دارا بودن برخی خصوصیات فیزیکی و مکانیکی به‌ویژه WVP پایین‌تر (۳/۹۰ گرم میلی‌متر در مترمربع ساعت پاسکال) و استحکام کششی بالاتر (۳۰/۱۰ مگاپاسکال) می‌توانند از تبادل رطوبت مواد غذایی جلوگیری کند و فرایند فساد محصولات را کاهش دهد؛ همچنین این فیلم خوراکی قادر به حفظ یکپارچگی محصول بسته‌بندی شده است و با فیلم‌های پلاستیکی مانند پلی‌اتیلن که به‌طور گسترده در بازار استفاده می‌شوند، قابل مقایسه است. بنابراین، ترکیب زیست‌پلیمرهای پلی‌وینیل الکل/کیتوزان/نانو رس غنی‌شده با عصاره سیر، یک گزینه بالقوه قابل توصیه برای بسته‌بندی‌های زیست تخریب‌پذیر برای ذخیره‌سازی طولانی‌مدت در صنایع غذایی است.

می‌شوند و بعد آلیسین را تشکیل می‌دهد. آلیسین نسبت به حرارت بسیار حساس و ناپایدار است (Ilic et al., 2011). اثر باکتری‌کشی سیر می‌تواند تحت تأثیر ویژگی‌های خود باکتری باشد. اثر ضدباکتریایی ترکیب آلیسین موجود در سیر سه برابر بیشتر از باکتری‌های گرم منفی در برابر باکتری‌های گرم مثبت مؤثر است. لیپیدهای موجود در غشای باکتری‌های گرم مثبت مانند /استافیلوکوکوس/ اورئوس در کمک به نفوذ ترکیبات آلیسین به باکتری‌ها نقش دارند، بنابراین آلیسین می‌تواند بر فعالیت سنتز RNA باکتریایی و سنتز پروتئین (که یکی از آنها از طریق تبادل ترکیبات دی‌سولفید است) با مهار فعالیت گروه‌های تیول بدون آنزیم باعث آسیب و حتی مرگ باکتری‌ها شود. اگرچه آلیسین ناپایدار است، اما این مولکول به دلیل ماهیت آبگریزش می‌تواند به راحتی از غشای سلولی باکتری عبور کند، بنابراین می‌تواند به محفظه سلولی باکتری برسد که به سرعت با گروه تیول آزاد واکنش نشان می‌دهد (Meilanie Putri et al., 2021).

یافته‌های این مطالعه ضمن تأیید اثر ضد میکروبی عصاره سیر علیه باکتری‌های گرم مثبت و گرم منفی، نشان داد که

References

- Abiy, E. and Berhe, A., 2016. Anti-bacterial effect of garlic (*Allium sativum*) against clinical isolates of *Staphylococcus aureus* and *Escherichia coli* from patients attending Hawassa Referral Hospital, Ethiopia. *Journal of Infectious Diseases and Treatment*, 2(2): 18. <https://doi.org/10.21767/2472-1093.100023>
- Amankwaah, C., Li, J., Lee, J. and Pascall, M.A., 2020. Development of antiviral and bacteriostatic chitosan-based food packaging material with grape seed extract for murine norovirus, *Escherichia coli* and *Listeria innocua* control. *Food Science and Nutrition*, 8: 6174-6181. <https://doi.org/10.1002/fsn3.1910>
- Ansarifard, E. and Moradinezhad, F., 2022. Encapsulation of thyme essential oil using electrospun zein fiber for strawberry preservation. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 9: 1-11. <https://doi.org/10.1186/s40538-021-00267-y>
- Choi, H.J., Choi, S.W., Lee, N. and Chang, H.J., 2022. Antimicrobial activity of chitosan/ gelatin/ Poly (vinyl alcohol) ternary blend film incorporated with *Duchesnea indica* extract in strawberry applications. *Foods*, 11: 3963. <https://doi.org/10.3390/foods11243963>
- Dutta, P.K., Tripathi, S., Mehrotra, G.K. and Dutta, J., 2009. Perspectives for chitosan-based antimicrobial films in food applications. *Food Chemistry*, 114: 1173-1182. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2008.11.047>
- Ehsan, M. and Khademi Shurmasti, D., 2021. Effect of washing and active nanocomposite coating of carboxymethyl cellulose-nanoclay containing marjoram extract (*Origanum vulgare* L.) on egg quality during storage at ambient temperature. *Iranian Journal of Food Science and Technology*, 118(18): 107-118. <https://doi.org/10.52547/fscst.18.118.107>
- Farbman, K.S., Barrett, E.D., Rolduc, G.R. and Klein, J.O., 1993. Antibacterial activity of garlic and onions:

- A historical perspective. *Pediatric Infectious Disease Journal*, 12(7): 613-614.
<https://doi.org/10.1097/00006454-199307000-00013>
- Fu, B., Mei, S., Su, X., Chen, H., Zhu, J., Zheng, Z., Lin, H., Dai, C., Luque, R. and Yang, D.P., 2021. Integrating waste fish scale-derived gelatin and chitosan into edible nanocomposite film for perishable fruits. *International Journal of Biological Macromolecules*, 191: 1164-1174.
<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.09.171>
 - Haghighi, H., De Leo, R., Bedin, E., Pfeifer, F., Siesler, H.W. and Pulvirenti, A., 2019. Comparative analysis of blend and bilayer films based on chitosan and gelatin enriched with LAE (*lauroyl arginate ethyl*) with antimicrobial activity for food packaging applications. *Food Packaging and Shelf Life*, 19: 31-39. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2018.11.015>
 - Haghighi, H., Kameni Leugoue, S., Pfeifer, F., Wilhelm Siesler, H., Licciardello, F., Fava, P. and Pulvirenti, A., 2020. Development of antimicrobial films based on chitosan-polyvinyl alcohol blend enriched with ethyl lauroyl arginate (LAE) for food packaging applications. *Food Hydrocolloids*, 100: 105419. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.105419>
 - Hassanzadeh, H., Alizadeh, M. and Rezazad, B.M., 2019. Nano-encapsulation of garlic extract by water-in-oil emulsion physicochemical and antimicrobial characteristics. *Journal of Food Science and Technology*, 84(15): 337-347. <https://doi.org/fsct.modares.ac.ir/article-fa.html>
 - Ilic, D., Nikolic, V., Nikolic, L., Stankovic, M., Stanojevic, L. and Cakic, M., 2011. Allicin and related compounds: biosynthesis, synthesis and pharmacological activity. *Facta Universitatis - Series: Physics, Chemistry and Technology*, 9(1): 9-20. <https://doi.org/10.2298/FUPCT1101009I>
 - Jridi, M., Boughriba, S., Abdelhedi, O., Nciri, H., Nasri, R., Kchaou, H., Kaya, M., Sebai, H., Zouari, N. and Nasri, M., 2019. Investigation of physicochemical and antioxidant properties of gelatin edible film mixed with blood orange (*Citrus sinensis*) peel extract. *Food Packaging and Shelf Life*, 21: 100342. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2019.100342>
 - Kaur, N., Somasundram, C., Razali, Z., Mourad, A.H.I., Hamed, F. and Ahmed, Z.F.R., 2024. *Aloe vera*/chitosan-based edible film with enhanced antioxidant, antimicrobial, thermal, and barrier properties for sustainable food preservation. *Polymers*, 16: 242. <https://doi.org/10.3390/polym16020242>
 - Khademi Shurmasti, D., Rezaei Kermani, P., Sarvarian, M. and Godswill Awuchi, CH., 2023. Egg shelf life can be extended using varied proportions of polyvinyl alcohol/chitosan composite coatings. *Food Science & Nutrition*, 11: 5041-5049. <https://doi.org/10.1002/fsn3.3394>
 - Koosha, M. and Hamed, S., 2019. Intelligent chitosan/PVA nanocomposite films containing black carrot anthocyanin and bentonite nanoclays with improved mechanical, thermal and antibacterial properties. *Progress in Organic Coatings*, 127: 338-347. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2018.11.028>
 - Kumar, L., Ramakanth, D., Akhila, K. and Gaikwad, K.K., 2022. Edible films and coatings for food packaging applications: A review. *Environmental Chemistry Letters*, 20: 875-900. <https://doi.org/10.1007/s10311-021-01339-z>
 - Liu, Y., Wang, S. and Lan, W., 2018. Fabrication of antibacterial chitosan-PVA blended film using electrospray technique for food packaging applications. *International Journal of Biological Macromolecules*, 107: 848-854.
 - Liu, Y., Wang, S., Lan, W. and Qin, W., 2017. Fabrication and testing of PVA/chitosan bilayer films for strawberry packaging. *Coatings*, 7: 109. <https://doi.org/10.3390/coatings7080109>
 - Mardani Kiasari, M. and Khademi Shurmasti, D., 2020. Effect of lemon grass (*Cymbopogon citratus*) extract and nanoclay in nanocomposite coating on the physicochemical and microbial properties of chicken fillets during refrigerated storage. *Journal of Food Science and Technology*, 106(17): 13-21. <https://doi.org/10.52547/fsct.17.106.13>
 - Martiny, T.R., Raghavan, V., Moraes, C.C.D., Rosa, G.S.D. and Dotto, G.L., 2020. Bio-based active packaging: carrageenan film with olive leaf extract for lamb meat preservation. *Foods*, 9: 1759. <https://doi.org/10.3390/foods9121759>
 - Meilanie Putri, U., Rochmanti, m., Retno Wahyunitisari, M. and Setiabudi, R.J., 2021. The antibacterial effect of ethanol extract of garlic (*Allium sativum* L.) on methicillin resistant *Staphylococcus aureus* (MRSA) *In Vitro*. *Indian Journal of Forensic Medicine & Toxicology*, 15(2): 3504-3509. <https://doi.org/10.37506/ijfmt.v15i2.14918>
 - Molaee Aghaee, E., Kamkar, A., Akhondzadeh Basti, A., Khanjari, A. and Kontominas, M.G., 2016. Antimicrobial effect of garlic essential oil (*Allium sativum* L.) in combination with chitosan biodegradable coating films. *Journal of Medicinal Plant*, 15(2): 141-150. <https://doi.org/jmp.ir/article-1-1323-en.html>
 - Olarte-Paredes, A., Salgado-Delgado, J.N., Rubio-Rosas, E., Salgado-Delgado, A.M., Hernández-Cocolezzi, H., Salgado-Delgado, R., Moreno-

- Carpintero, E. and Castaño, V.M., 2021. Physico-chemical properties of a hybrid biomaterial (PVA/Chitosan) reinforced with conductive fillers. *Applied Science*, 1: 3040. <https://doi.org/10.3390/app11073040>.
- Pandey, V.K., Islam, R.U., Shams, R., and Dar, A.H., 2022. A comprehensive review on the application of essential oils as bioactive compounds in Nano-emulsion based edible coatings of fruits and vegetables. *Applied Food Research*, 2: 100042. <https://doi.org/10.1016/j.afres.2022.100042>
 - Pathare, P. B., Opara, U.L. and Al-Said, F.A.J., 2013. Color measurement and analysis in fresh and processed foods: a review. *Food and Bioprocess Technology*, 6: 36-60. <https://doi.org/10.1007/s11947-012-0867-9>
 - Rhim, J.W., Park, H.M. and Ha, C.S., 2013. Bio-nanocomposites for food packaging applications. *Progress in Polymer Science*, 38: 1629-1652. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2013.05.008>.
 - Rohr, J.R., Barrett, C.B., Civitello, D.J., Craft, M.E., Delius, B., DeLeo, G.A., Hudson, P.J., Jouanard, N., Nguyen, K.H. and Ostfeld, R.S., Remais, J.V., Riveau, G., Sokolow, S.H. and Tilman, D., 2019. Emerging human infectious diseases and the links to global food production. *Nature Sustainability*, 2(6): 445-456. <https://doi.org/10.1038/s41893-019-293-3>
 - Terzioglu, P., Güney, F., Parin, F.N., Sen, I. and Tuna, S., 2021. Biowaste orange peel incorporated chitosan/polyvinyl alcohol composite films for food packaging applications. *Food Packaging and Shelf Life*, 30: 100742. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2021.100742>
 - Wang, X., Yong, H., Gao, L., Li, L., Jin, M. and Liu, J., 2019. Preparation and characterization of antioxidant and pH-sensitive films based on chitosan and black soybean seed coat extract. *Food Hydrocolloids*, 89: 56-66. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2018.10.019>
 - Yun, D., Cai, H., Liu, Y., Xiao, L., Song, J. and Liu, J., 2019. Development of active and intelligent films based on cassava starch and Chinese bayberry (*Myrica rubra*) anthocyanins. *RSC Advances*, 9: 30905-30916. <https://doi.org/10.1039/C9RA06628D>
 - Zahed Karkaj, S. and Peighambaroust, S.J., 2018. Physical, mechanical and antibacterial properties of nanobiocomposite films based on carboxymethyl cellulose/nanoclay. *Iranian Journal of Polymer Science and Technology*, 30(6): 557-572. <https://doi.org/10.22063/JIPST.2018.1536>
 - Zhang, X., Ismail, B.B., Cheng, H., Jin, T.Z., Qian, M., Arabi, S.A., Liu, D. and Guo, M., 2021. Emerging chitosan-essential oil films and coatings for food preservation- A review of advances and applications. *Carbohydrate Polymers*, 273: 118616. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2021.118616>