Research Article

Iranian Journal of Wood and Paper Industries
Vol. 16, No. 4, Page 483 - 497 (2026)

DOI: 10.22034/ijwp.2025.2066623.1716

Preparation and Characterization of Antibacterial packaging paperboard via coating with carboxymethyl cellulose and ciprofloxacin

Mehdi Roohani[1*], Farnaz Movahedi[2], Behzad Kord[1], Alireza Khakifirooz[1]

1- Corresponding authors, Assistant Professor of Wood and Paper Technology, Research Group of Cellulosic Materials and Packaging, Research Department of Chemistry and Petrochemistry, Standard Research Institute, Iran. email: mroohani@standard.ac.ir
2- Assistant Professor of Organic Chemistry, Research Group of Cellulosic Materials and Packaging, Research Department of Chemistry and Petrochemistry, Standard Research Institute, Iran

Received: July 2025 Accepted: September 2025

Abstract

Problem definition and objectives: Antimicrobial packaging plays a crucial role in maintaining the quality and extending the shelf life of food products. This type of packaging employs materials that inhibit the growth of bacteria, fungi, and other microorganisms, thereby ensuring the safety and freshness of food items. In this study, antibacterial cardboard was produced by coating the cardboard surface with carboxymethyl cellulose (CMC) containing ciprofloxacin. This method not only enhances the antimicrobial properties of the packaging but also addresses environmental concerns by reducing reliance on synthetic chemicals and promoting biodegradability.

Methodology: To fabricate the antibacterial cardboard, the base paper surface was coated with a layer of carboxymethyl cellulose combined with ciprofloxacin. Coating weights of 5, 10, and 15 g/m² were applied, and the dry mass of the coating was calculated accordingly. Ciprofloxacin was incorporated at 3% and 5% (w/w) of the coating as the antibacterial agent. The base paper was fixed on a rigid flat surface to minimize dimensional changes during coating application. The coating formulations were prepared as designed. The morphology and distribution of the coating layer on the base paper were analyzed by digital optical microscopy, and FTIR spectroscopy was used to identify chemical bonds and structural changes. Antibacterial activity was tested against Gram-negative Escherichia coli and Gram-positive Staphylococcus aureus. Barrier properties such as water vapor permeability (WVP) and air permeability (Gurley test), as well as mechanical properties including tensile strength, bending resistance (Taber test), and bursting strength, were evaluated.

Results: Microscopic analysis revealed that the antibacterial coating formed a uniform layered structure on the base paper. In all coated samples, barrier properties improved, showing reduced water vapor transmission rate and air permeability. Mechanical properties including tensile strength, bursting strength, and bending resistance also increased after coating application. Antibacterial tests demonstrated inhibition zones for both bacterial strains, with the largest inhibition zone observed against E. coli in samples coated with 15 g/m² at both 3% and 5% ciprofloxacin concentrations. The smallest inhibition zone was observed against S. aureus in the 5 g/m² coating with 5% ciprofloxacin. Untreated paper showed no antibacterial activity.

Conclusion: The coated cardboard exhibited effective antibacterial properties against both Gram-negative Escherichia coli and Gram-positive Staphylococcus aureus. Addition of the coating improved barrier properties, reducing water vapor and air permeability, and enhanced mechanical strength including tensile, bending, and bursting resistance. These results indicate that coating packaging cardboard with a layer of carboxymethyl cellulose and ciprofloxacin can produce effective antibacterial packaging materials.

Keywords: Packaging Paperboard, Antibacterial Activity, Ciprofloxacin, Mechanical Properties, Barrier Properties.

ساخت و بررسی خواص مقوای بسته‌بندی آنتی‌باکتریال از طریق پوشش‌دهی با کربوکسی‌متیل‌سلولز و سیپروفلوکساسین

مهدی روحانی[1*]، فرناز موحدی[2]، بهزاد کرد[1]، علیرضا خاکی فیروز[1]

۱- نویسنده مسئول، استادیار صنایع چوب و کاغذ، گروه سلولزی و بسته بندی، پژوهشکده شیمی و پتروشیمی، پژوهشگاه استاندارد، کرج، ایران. رایانامه: mroohani@standard.ac.ir

۲- استادیار شیمی آلی، گروه سلولزی و بسته بندی، پژوهشکده شیمی و پتروشیمی، پژوهشگاه استاندارد، کرج، ایران

تاریخ دریافت: تیر ۱۴۰۴ تاریخ پذیرش: شهریور ۱۴۰۴

چکیده

بیان مساله و اهداف: بسته‌بندی ضدمیکروبی نقش بسیار مهمی در حفظ کیفیت و افزایش ماندگاری مواد غذایی ایفا می‌کند. این نوع بسته‌بندی با به‌کارگیری موادی که از رشد باکتری‌ها، قارچ‌ها و دیگر میکروارگانیسم‌ها جلوگیری می‌کنند، ایمنی و تازگی محصولات غذایی را تضمین می‌نماید. در این پژوهش، برای تولید مقوای آنتی‌باکتریال، از پوشش‌دهی مقوا با کربوکسی‌متیل سلولز حاوی سیپروفلوکساسین استفاده شد. این روش نه تنها خواص ضدمیکروبی بسته‌بندی را بهبود می‌بخشد، بلکه با کاهش وابستگی به مواد شیمیایی مصنوعی و ترویج زیست‌تخریب‌پذیری، نگرانی‌های زیست‌محیطی را نیز برطرف می‌کند.

مواد و روشها: برای ساخت مقوای آنتی‌باکتریال، سطح کاغذ پایه با لایه‌ای از کربوکسی متیل سلولز به همراه سیپروفلوکساسین پوشش داده شد. برای این منظور،گراماژ پوشش‌دهی به اندازه ۵، ۱۰ و ۱۵ گرم در متر مربع در نظر گرفته و بر اساس آن و مساحت کاغذ پایه، جرم خشک موردنیاز پوشش‌دهی محاسبه شد. از سیپروفلوکساسین به اندازه ۳ و ۵ درصد وزنی پوشش به عنوان عامل آنتی باکتریال استفاده شد. کاغذ پایه بر روی یک سطح صاف و صلب قرار داده شده و بوسیله چسب نواری مهار شد تا تغییرات ابعادی آن در اثر اعمال لایه پوشش به حداقل ممکن برسد. مواد پوشش‌دهی بر اساس فرمولاسیون تعیین شده تهیه شد. مورفولوژی نمونه‌ها و چگونگی قرارگیری لایه پوشش بر روی کاغذ پایه، بوسیله میکروسکوپ نوری دیجیتال استفاده شد. ویژگی آنتی‌باکتریایی نمونه ها با دو نوع باکتری گرم منفی و گرم مثبت اشرشیا کلای و استافیلوکوکوس اورئوس انجام شد. خواص ممانعتی نمونه‌ها شامل نفوذپذیری نسبت به بخار آب (WVP) و نفوذپذیری به هوا و ویژگی‌های مکانیکی نمونه‌ها نظیر آزمون مقاومت کششی، مقاومت خمشی و مقاومت به ترکیدن مورد بررسی قرار گرفت.

نتایج: نتایج حاصل از بررسی لایه پوشش‌دهی با میکروسکوپ نوری دیجیتال نشان داد که لایهٔ پوشش‌دهی آنتی باکتریال متشکل از مخلوط کربوکسی‌متیل‌سلولز و سیپروفلوکساسین یک ساختار لایه‌ای یکپارچه را روی کاغذ پایه شکل داده است. در همه نمونه‌ها با اضافه شدن لایه پوشش‌دهی بر روی کاغذ، خواص ممانعتی نظیر میزان سرعت عبور بخار آب و نفوذپذیری در برابر هوا کاهش نشان داد. همچنین پوشش‌دهی مقوا منجر به افزایش خواص مکانیکی شامل مقاومت کششی، مقاومت به ترکیدن، مقاومت خمشی شد. نتایج آزمون ضدباکتریایی حاکی از تشکیل هاله عدم رشد باکتری برای هر دو نوع باکتری بود. بیشترین قطر هاله عدم رشد برای باکتری اشرشیا کلای در نمونه‌های دارای پوشش ۱۵ گرم بر مترمربع و ۳ درصد سیپروفلوکساسین و پوشش ۱۵ گرم بر مترمربع و ۵ درصد سیپروفلوکساسین و کمترین آن مربوط به باکتری استافیلوکوکوس اورئوس در نمونه دارای پوشش ۵ گرم بر مترمربع و ۵ درصد سیپروفلوکساسین بود. کاغذ تیمار نشده فعالیت ضدباکتری از خود بروز نداد.

نتیجه‌گیری: مقوای پوشش‌دهی شده ویژگی آنتی‌باکتریایی موثری را در برابر دو نوع باکتری گرم منفی و گرم مثبت اشرشیا کلای و استافیلوکوکوس اورئوس نشان داد. با اضافه شدن لایه پوشش خواص ممانعتی مقوای بسته بندی

شامل نفوذپذیری نسبت به بخار آب و مقاومت نسبت به عبور هوا بهبود پیدا کردند. لایه پوشش همچنین موجب افـزایش استحکام مکانیکی مقوای پوشش‌دهی شده نظیر مقاومت کششی، مقاومت خمشی و مقاومت به ترکیدن شـد. نتـایج نشـان داد که پوشش‌دهی مقوای بسته‌بندی با لایه‌ای از کربوکسی‌متیل سلولز و سیپروفلوکساسین می‌تواند منجر به تولیـد مقـوای بسته بندی آنتی‌باکتریال شود.

واژه های کلیدی: مقوای بسته بندی، فعالیت ضد باکتری، سیپروفلوکساسین، خواص مکانیکی، خواص ممانعتی

مقدمه

در دنیای امروز، با افزایش جمعیت، تغییرات سبک زندگی و رشد مصرف مواد غذایی بسته‌بندی‌شده، چالش‌های بهداشتی و ایمنی محصولات بیش از پیش مورد توجه قرار گرفته است. یکی از راهکارهای نوین برای مقابله با این چالش‌ها، استفاده از بسته‌بندی‌های آنتی‌باکتریال است که می‌توانند رشد میکروارگانیسم‌ها را مهار کرده و کیفیت و ایمنی محصولات را حفظ کنند. بر اساس گزارش‌های اخیر، بازار جهانی بسته‌بندی آنتی‌باکتریال در حال رشد سریع است و پیش‌بینی می‌شود که تا سال ۲۰۳۲ به ارزشی بالغ بر ۱۵/۲ میلیارد دلار برسد. این رشد ناشی از افزایش آگاهی مصرف‌کنندگان نسبت به ایمنی غذایی و تمایل به استفاده از محصولات با ماندگاری طولانی‌تر است. با افزایش آگاهی مصرف‌کنندگان در مورد سلامت، محصولاتی که ماندگاری بیشتری دارند و در برابر آلودگی میکروبی محافظت می‌کنند، به طور فزاینده‌ای ترجیح داده می‌شوند. بسته‌بندی ضدمیکروبی با افزودن موادی که از رشد باکتری‌ها، قارچ‌ها و سایر میکروارگانیسم‌ها جلوگیری می‌کنند، ایمنی و تازگی مواد غذایی را تضمین می‌کند. این روش نه تنها خواص ضدمیکروبی بسته‌بندی را بهبود می‌بخشد، بلکه با کاهش وابستگی به مواد شیمیایی مصنوعی و ترویج زیست‌تخریب‌پذیری، نگرانی‌های زیست‌محیطی را نیز برطرف می‌کند. بسته‌بندی ضدمیکروبی نقش مهمی در بسته‌بندی مواد غذایی ایفا می‌کند، به نحوی که می‌تواند ماندگاری را افزایش داده و نگهداری غذا را تضمین کند. بسته‌بندی ضدمیکروبی را می‌توان با ترکیب مستقیم عوامل زیست‌فعال در ترکیبات بسته‌بندی، با پوشش عوامل زیست‌فعال روی سطح بسته‌بندی، یا با تشکیل فیلم با استفاده از پلیمرهای ضدمیکروبی تهیه کرد [۱]. نشاسته و مشتقات نشاسته، PHB[1] و PLA[2] دارای ویژگی‌های بسیاری هستند که با بسیاری از عوامل ضدمیکروبی برای بسته‌بندی سازگار هستند. آنها از نظر وجود میکروارگانیسم‌های بیماری‌زا و فاسدکننده در کاربردهای زیست‌پزشکی و غذایی در شرایط آزمایش مختلف مورد بررسی قرار گرفته‌اند. فیلم‌های فعال تهیه شده با ریخته‌گری حلال[3] آزادسازی عوامل ضدمیکروبی و اثربخشی در برابر میکروارگانیسم‌های هدف را نشان داده‌اند [۲، ۳]. بسته‌بندی یک مرحله حیاتی در فرآیند تولید مواد غذایی است زیرا کیفیت محصولات غذایی را برای نگهداری، حمل و نقل و استفاده نهایی حفظ می‌کند [۴، ۵]. بسته‌بندی برای محصولات غذایی تازه و فرآوری شده ضروری است تا در برابر عوامل خارجی مانند آلاینده‌ها، ترکیبات گاز، باکتری‌های فاسد کننده، بارگذاری‌های مکانیکی و آسیب‌های فیزیکی محافظت کند [۶، ۷]. کیفیت یک محصول غذایی می‌تواند از نظر فیزیولوژیکی، شیمیایی و فیزیکی در طول توزیع کاهش یابد. بسته‌بندی مواد غذایی ماندگاری محصولات غذایی را افزایش می‌دهد و در عین حال کیفیت و ایمنی آنها را تضمین می‌کند [۸]. بسته‌بندی نقش حیاتی در جابجایی و حمل و نقل پس از برداشت مواد غذایی تازه و فرآوری شده و سایر مواد زیستی ایفا می‌کند [۹].

امروزه، افزایش تقاضای مصرف‌کنندگان برای غذاهای کم فرآوری‌شده که مستعد فساد هستند، ایمنی و کیفیت غذا را به خطر می‌اندازد [۱۰]. فساد مواد غذایی ناشی از رشد یا فعالیت میکروبی، شایع‌ترین علت تخریب مواد غذایی است که باعث می‌شود غذا برای مصرف ناامن شود و منجر به از دست رفتن مواد غذایی شود [۱۱]. یکی از این پیشرفت‌های تکنولوژیکی در بسته‌بندی مواد غذایی،

[1] Poly(3-hydroxybutyrate)
[2] Polylactic Acid
[3] solvent casting

توسعه بسته‌بندی فعال است. بسته‌بندی فعال عملکردهایی غیر از محافظت مرسوم و ارائه یک مانع بی‌اثر در برابر محیط خارجی را انجام می‌دهد و برای حفظ کیفیت غذا طراحی شده است [۱۲، ۱۳]. صنایع داروسازی و مراقبت‌های بهداشتی نیز به طور فزاینده‌ای از بسته‌بندی ضدمیکروبی برای اطمینان از استریل بودن و ایمنی محصولات و دستگاه‌های پزشکی استفاده می‌کنند. تأکید نظارتی بر استانداردهای بهداشتی و پیشگیری از عفونت‌های بیمارستانی به رشد بازار بیشتر دامن خواهد زد در میان انواع مختلف بسته‌بندی‌های آنتی‌باکتریال، مقوای آنتی‌باکتریال به دلیل ویژگی‌های منحصربه‌فرد خود، از جمله قابلیت تجزیه‌پذیری زیستی و امکان استفاده از مواد طبیعی در ساختار آن، توجه ویژه‌ای را جلب کرده است. در یک مطالعه از عصاره گیاه رزماری استخراج شده به دو روش سوکسوله و التراسونیک به عنوان عامل آنتی بیوتیک برای ساخت کاغذ دست‌ساز استفاده شده است [۱۴]. در پژوهشی دیگر برای ساخت کاغذ آنتی‌باکتریال، نانوذرات سلنیوم از طریق پوشش‌دهی سطح بکار گرفته شده است [۱۵].

آنتی‌بیوتیک سیپروفلوکساسین خواص درمانی مهمی دارد که آن را به یکی از داروهای مؤثر در مقابله با بسیاری از عفونت‌های باکتریایی تبدیل کرده است. سیپروفلوکساسین یک آنتی‌بیوتیک از دسته‌ی فلوروکینولون‌ها[4] است که دارای طیف اثر وسیع بوده و می‌تواند باکتری‌های گرم منفی و برخی باکتری‌های گرم مثبت را از بین ببرد [۱۶]. این دارو با مهار آنزیم‌های مورد نیاز برای تکثیر DNA باکتری‌ها، از رشد آن‌ها جلوگیری می‌کند و برای درمان انواع عفونت‌های باکتریایی استفاده می‌شود [۱۷]. از خواص آنتی‌باکتریال این ماده برای ساخت کاغذها و ترکیبات سلولزی آنتی‌باکتریال استفاده شده است. در مطالعه‌ای، سلولز پودر شده با سیپروفلوکساسین هیدروکلراید در محیط دی‌متیل فرمامید (DMF) و در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد برای ۲۵ ساعت واکنش داده شدند. نتایج نشان داد که این ترکیب خواص آنتی‌باکتریالی علیه باکتری‌های گرم مثبت مانند Staphylococcus aureus و Bacillus cereus از خود نشان می‌دهد[۱۸]. در تحقیقی دیگر، سیپروفلوکساسین به‌صورت درون‌سینتیک در ساختار سلولز باکتریایی (BC) گنجانده شد. این ترکیب خواص ضدباکتریایی علیه باکتری‌های مرتبط با زخم‌های دیابتی مانند Escherichia coli، Klebsiella pneumoniae و Pseudomonas aeruginosa را نشان داد[19]. در مطالعه‌ای، کاغذ گرافن با استفاده از سیپروفلوکساسین، سفازولین و متی‌سیلین بارگذاری شد. نتایج نشان داد که کاغذ گرافن بارگذاری‌شده با سیپروفلوکساسین اثر باکتری‌کشی علیه Staphylococcus aureus و Pseudomonas aeruginosa دارد [۲۰]. در تحقیقی دیگر، فیلم‌های کیتوزان با سیپروفلوکساسین ساخته شدند. این فیلم‌ها خواص ضدباکتریایی علیه باکتری‌های Escherichia coli و Staphylococcus aureus را نشان دادند [۲۱]. در این پژوهش، به بررسی امکان ساخت مقوای آنتی‌باکتریال، از طریق اعمال پوشش سطح با کربوکسی‌متیل سلولز حاوی سیپروفلوکساسین پرداخته خواهد شد. همچنین، خواص ضد میکروبی، مکانیکی و ممانعتی مقوای آنتی‌باکتریال مورد تحلیل قرار می‌گیرد.

مواد و روش‌ها

کربوکسی متیل سلولز با وزن مولکولی متوسط ۹۰۰۰۰ از شرکت سیگما الدریچ خریداری شد. از کاغذ بدون پوشش با گرماژ ۱۷۰ گرم بر متر مربع تهیه شده از خمیر سلولزی شیمیایی به عنوان کاغذ پایه استفاده شد. برای بررسی و ریخت‌شناسی لایه پوشش و نحوه قرارگیری آن بر روی مقوا، میکروسکوپ نوری دیجیتال مدل یورواسکوپ با بزرگنمایی ۲۰۰ برابر بکار گرفته شد. برای آزمون کشش، دستگاه اندازه‌گیری خواص مکانیکی مدل STM-20 ساخت شرکت سنتام بکار گرفته شد. آزمون مقاومت خمشی (تابر) با دستگاه مدل RI-5000، آزمون مقاومت در برابر عبور هوا با دستگاه گرلی مدل PAG-1000 ساخت شرکت Regmed و آزمون مقاومت به ترکیدن مقوا (mullen) با استفاده از دستگاه مولن مدل Zb-NPY ساخت شرکت Hangzhou Zhibang انجام شد.

روش پوشش‌دهی

پس از برش کاغذ پایه به ابعاد۳۰×۲۰ سانتی‌متر، سطح آن با لایه ای از کربوکسی متیل سلولز به همراه سیپروفلوکساسین پوشش داده شد. برای این

[4] Fluoroquinolones

منظور،گرماژ پوشش به اندازه ۵، ۱۰ و ۱۵ گرم در متر مربع در نظر گرفته و بر اساس آن و مساحت کاغذ پایه، جرم خشک موردنیاز پوشش محاسبه شد. از سیپروفلوکساسین به اندازه ۳ و ۵ درصد وزنی پوشش به عنوان عامل آنتی باکتریال استفاده شد. کاغذ پایه بر روی یک سطح صاف و صلب قرار داده شده و بوسیله چسب نواری مهار شد تا تغییرات ابعادی آن در اثر اعمال لایه پوشش به حداقل ممکن برسد. مواد پوشش بر اساس فرمولاسیون تعیین شده تهیه شد. جدول ۱ مقدار و ترکیب پوشش تیمارها را نشان می‌دهد. کربوکسی متیل سلولز پس از توزین، در مقدار معین آب مقطر حل شده و در حمام بن ماری در دمای ۹۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲ ساعت هم زده شد. پس از اطمینان از حل شدن کامل مواد، همزنی در دمای اتاق به مدت یک ساعت دیگر ادامه پیدا کرد. سیپروفلوکساسین به اندازه ۳ و ۵ درصد وزن خشک کربوکسی متیل سلولز توزین و در به مخلوط اضافه شده و به مدت ۱ ساعت در دمای اتاق همزنی شد. برای اطمینان از پخش مطلوب سیپروفلوکساسین سوسپانسیون حاصل طی سه دوره زمانی ۵ دقیقه ای تحت تیمار صوتی قرار گرفت. مخلوط حاصل به مدت ۱۵ دقیقه تحت تیمار صوتی قرار گرفت. در نهایت پس از اطمینان از یکنواختی و پخش مناسب، مخلوط حاصل بوسیله کاردک بر روی کاغذ پایه پوشش دهی شد. کاغذ پوشش‌داده شده به مدت ۲۴ ساعت در دمای اتاق نگهداری شد تا لایه پوشش خشک شود. در ادامه برای خشک شدن کامل، نمونه ها به مدت ۲۴ ساعت در گرمخانه با دمای ۷۰ درجه سانتی گراد قرار داده شد. قبل از هر گونه آزمون و اندازه‌گیری، نمونه ها در اتاقک مشروط سازی در دمای ۲۳ درجه سانتیگراد و رطوبت نسبی ۵۰ درصد قرار داده شدند. آزمون ها با ۳ تکرار برای هر نمونه انجام شد نتایج در قالب طرح آماری کاملا تصادفی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند.

مطالعه خواص

بررسی میکروسکوپی لایه پوشش

مورفولوژی مقواهای پوشش داده شده و چگونگی قرارگیری لایه پوشش بر روی کاغذ پایه، بوسیله میکروسکوپ نوری دیجیتال مدل یورواسکوپ با بزرگنمایی ۲۰۰ برابر مورد بررسی قرارگرفت. این بررسی‌ها شامل مشاهده سطوح تازه شکسته نمونه‌ها است که به قضاوت درباره‌ی یکنواختی لایه پوشش، وجود منافذ و فضاهای خالی دربافت پوشش کمک شایانی می‌کند.

جدول۱- مشخصات تیمارها

شماره	کد تیمار	گرماژ پوشش (g/m2)	مقدار سیپروفلوکساسین برحسب درصد جرمی پوشش (٪)
۱	نمونه بدون پوشش	-	-
۲	5gsm3%Cypro	۵	۳
۳	5gsm5%Cypro	۵	۵
۴	10gsm3%Cypro	۱۰	۳
۵	10gsm5%Cypro	۱۰	۵
۶	15gsm3%Cypro	۱۵	۳
۷	15gsm5%Cypro	۱۵	۵

آزمون ضدمیکروبی مقواهای آنتی باکتریال

برای ارزیابی فعالیت ضدباکتریایی نمونه‌های مقوای پوشش‌داده‌شده، از روش انتشار در آگار[5] مطابق با استاندارد CLSI M02-A12 و با دو گونه باکتری گرم منفی اشرشیا کلای به عنوان یک باکتری شاخص برای آلودگی مدفوعی و معمول در فساد مواد غذایی و گرم مثبت استافیلوکوکوس اورئوس به عنوان عامل بالقوه بیماری‌زا و رایج در آلودگی مواد غذایی استفاده شد. نمونه‌ها پس از برش به‌طور مستقیم بر سطح محیط کشت آگار که قبلاً با سوسپانسیون باکتری تلقیح شده بود، قرار گرفتند. محیط‌های کشت تلقیح‌شده با نمونه‌ها در دمای

[5] Disk Diffusion Method

۳۷ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت در انکوباتور نگهداری شدند. پس از دوره انکوباسیون، قطر ناحیه شفاف اطراف نمونه‌ها (هاله عدم رشد) با خط‌کش دقیق اندازه‌گیری و به عنوان شاخصی از فعالیت ضدمیکروبی ثبت شد.

نفوذپذیری نسبت به بخار آب

سرعت عبور بخار آب یعنی مقدار بخار آبی که در واحد زمان از هر واحد سطح یک ماده عبور می‌کند. برای اندازه‌گیری این سرعت، طبق استاندارد ISO 2528:2017 عمل شد. ابتدا نمونه‌ها روی درپوش ویال‌هایی بسته شدند که داخل آن‌ها ۱۵ گرم سیلیکاژل (جاذب رطوبت) ریخته شده بود. سطح ویال‌ها با نمونه و ماده‌ای که رطوبت جذب نمی‌کند و مقاوم به اکسید شدن است، کاملاً آب‌بندی شد. کل ویال‌ها در یک دسیکاتور قرار گرفتند که داخل آن محلول فوق اشباع نمک مس (II) سولفات بود تا رطوبت نسبی محیط حدود ۹۸ درصد حفظ شود. در طول آزمایش، وزن نمونه‌ها با ترازو دیجیتال دقیق (با دقت ۰/۰۰۰۱گرم) اندازه‌گیری و ثبت شد. سپس تغییر وزن نمونه‌ها نسبت به زمان رسم شد و شیب خط به دست آمده برای محاسبه سرعت عبور بخار استفاده شد.

$$WVT = \frac{24 \times 10^4 \times m}{s} \qquad (۱)$$

که در آن:

WVT: سرعت انتقال بخارآب ($g/m^2 \times d$)

S: سطح مقطع ظرف

m: شیب نمودار

برای اندازه‌گیری میزان نفوذپذیری نسبت به بخار آب از فرمول ۲ استفاده شد.

$$WVP = \frac{WVT}{P(R_1 - R_2)} .X \qquad (۲)$$

WVP: میزان نفوذپذیری به بخار آب (g/m.Pa.s)

X: ضخامت فیلم (mm)

R1میزان رطوبت داخل دسیکاتور (۹۸ درصد)

P: فشار بخار آب خالص در دمای ۲۵ درجه سانتی-گراد، (Pa)

R2: میزان رطوبت داخل ویال (صفر درصد)

مقاومت نسبت به عبور هوا

مقاومت نسبت به عبورهوا، میزان زمان مورد نیاز برای عبور حجم مشخصی از هوا از واحد سطح نمونه تحت فشار ثابت می باشد. نفوذپذیری (مقاومت) کاغذهای پوشش‌دهی شده نسبت به هوا مطابق استاندارد ISO 5636-5: 2013 با استفاده از دستگاه گرلی اندازه‌گیری شد. در طی آزمون مدت زمان لازم جهت عبور ۱۰۰ میلی‌لیتر هوا از نمونه محاسبه شد. مقاومت نسبت به عبور هوا بر حسب ثانیه در ۱۰۰ میلی‌لیتر بیان می شود. سپس میزان نفوذ پذیری هوا بر حسب میکرومتر بر پاسکال ثانیه با رابطه زیر محاسبه شد:

$$P=128/s \quad (\mu m/Pa.s) \qquad (۳)$$

که در آن:

P: نفوذ پذیری به هوا

S: زمان لازم برای عبور ۱۰۰ میلی لیتر هوا

آزمون کشش استاتیک

خواص کششی نمونه ها با انجام آزمون کشش مطابق استاندارد ISO 1924-2: 2008 اندازه‌گیری شد. نمونه‌ها به پهنای ۱۵ میلی‌متر و طول ۲۲۰ میلی‌متر برش داده شدند و قبل از آزمون در شرایط محیطی متعارف دمای ۲۳ درجه سانتیگراد و رطوبت نسبی ۵۰ درصد متعادل سازی شدند. برای انجام آزمون از دستگاه کشش STM–20ساخت شرکت SANTAM استفاده شد. آزمون با طول اولیه دهانه فک دستگاه ۱۸۰ میلی‌متر و سرعت کرنش ۲۰ میلی‌متر بر دقیقه و لودسل۵ کیلو نیوتن انجام شد.

آزمون مقاومت به ترکیدن

آزمایش مقاومت به ترکیدن کاغذ با روش مولن و طبق استاندارد ISO 2759:2014 انجام شد. برای این منظور، از دستگاه مدل Zb-NPY ساخت شرکت Hangzhou Zhibang استفاده گردید. این آزمون برای تعیین میزان فشاری است که کاغذ می‌تواند قبل از پاره شدن تحمل کند.

آزمون مقاومت خمشی (تابر)

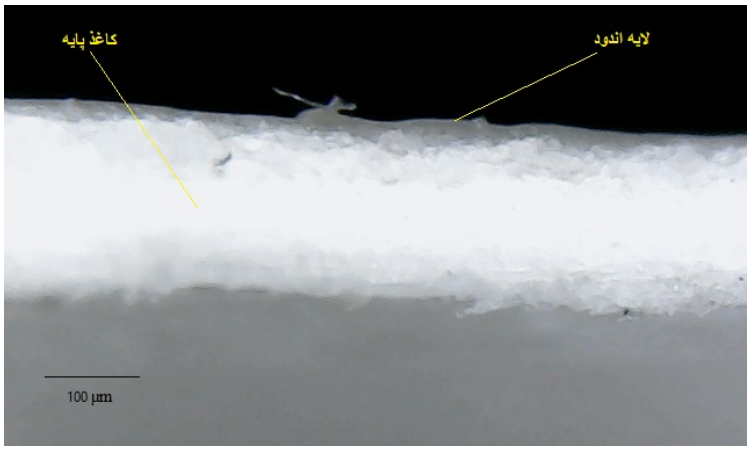
آزمایش مقاومت خمشی کاغذ با روش تابر و طبق استاندارد ISO 2493-2:2020 انجام شد. برای این منظور، از دستگاه مدل RI-5000 ساخت شرکت Regmed استفاده گردید. این آزمون برای تعیین گشتاور خمشی مورد نیاز برای خم کردن انتهای آزاد نمونه با عرض ۳۸ میلی‌متر که به صورت عمودی گیره شده، با اعمال بار در طول خمش ۵۰ میلی‌متر با زاویه ۱۵ درجه به کار می‌رود.

نتایج و بحث

بررسی میکروسکوپی لایه پوشش

بررسی مورفولوژی لایه پوشش بر روی مقوا، علاوه بر ارزیابی یکنواختی و عدم وجود عیوبی مانند منافذ و فضاهای خالی، می‌تواند بر خواص مکانیکی و فیزیکی محصول نهایی تأثیرگذار باشد. لایه پوشش یکنواخت و بدون نقص باعث افزایش مقاومت مکانیکی، بهبود ویژگی‌های جذب رطوبت و ارتقاء کیفیت چاپ روی مقوا می‌شود. علاوه بر این، شناخت دقیق ساختار سطحی و توزیع لایه پوشش می‌تواند در بهینه‌سازی فرایندهای تولید و انتخاب مواد پوشش مورد استفاده راهگشا باشد. مورفولوژی مقواهای پوشش داده شده و نحوه قرارگیری لایه پوشش بر روی کاغذ پایه، با استفاده از میکروسکوپ نوری دیجیتال مدل یورواسکوپ با بزرگنمایی ۲۰۰ برابر مورد بررسی قرار گرفت. این بررسی‌ها شامل مشاهده سطوح تازه شکسته شده نمونه‌ها بود که امکان ارزیابی یکنواختی لایه پوشش و تشخیص وجود منافذ و فضاهای خالی در ساختار پوشش را فراهم می‌کند. این تحلیل‌ها نقش مهمی در قضاوت دقیق‌تر درباره کیفیت پوشش و خواص سطحی مقوا ایفا می‌نماید.

تصویر میکروسکوپی از مقطع عرضی لایه پوشش آنتی باکتریال بر روی کاغذ پایه در نمونه (15gsm5%Cypro) در شکل ۱ ارایه شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، لایهٔ پوشش آنتی باکتریال حاصل از مخلوط کربوکسی‌متیل‌سلولز و سیپروفلوکساسین یک ساختار لایه‌ای یکپارچه را روی کاغذ پایه شکل داده است. علاوه بر افزودن خصوصیت آنتی‌باکتریال بر کاغذ پایه، با اضافه شدن لایهٔ پوشش حفرات و فضاهای خالی بین الیاف کاغذ پایه پر و سبب بهبود صافی سطح شده و به بهبود خواص مقاومتی و ممانعتی کاغذ پوشش داده شده می‌انجامد.



شکل ۱- تصویر میکروسکوپی از مقطع عرضی لایه پوشش آنتی باکتریال بر روی کاغذ پایه در نمونه (15gsm5%Cypro)

آزمون ضدمیکروبی مقواهای آنتی باکتریال

مقواهای آنتی‌باکتریال به عنوان یک نوآوری مهم در صنعت بسته‌بندی، به ویژه در بسته‌بندی مواد غذایی و دارویی، به منظور افزایش ایمنی و حفظ کیفیت محصول توسعه یافته‌اند. این نوع مقواها با توانایی مهار رشد و تکثیر باکتری‌ها، نقش مهمی در جلوگیری از فساد محصولات و کاهش انتقال عوامل بیماری‌زا ایفا می‌کنند. اما برای اثبات عملکرد واقعی این محصولات، انجام آزمون‌های ضدمیکروبی ضروری است. آزمون ضدمیکروبی مقواهای آنتی باکتریال با اندازه‌گیری قطر هاله عدم رشد در برابر دو گونه باکتری گرم منفی اشرشیا کلای و گرم مثبت استافیلوکوکوس اورئوس انجام شد. نتایج آزمون ضدباکتریایی حاکی از تشکیل هاله عدم رشد برای هر دو نوع باکتری بود. نتایج اندازه‌گیری قطر هاله عدم رشد

باکتری‌ها در جدول ۲ و تصاویر آزمون واکنش ضد میکروبی در شکل ۲ و ۳ ارایه شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود برخلاف مقوای بدون پوشش، با اضافه شدن لایه پوشش حاوی سیپروفلوکساسین هاله عدم رشد در تمام تیمارها آشکار می‌شود. بیشترین مقدار قطر هاله عدم رشد باکتری اشرشیا کلای در تیمارهای 15gsm3%Cypro و 15gsm5%Cypro به اندازه ۵۰ mm به ثبت رسید و کمترین آن مربوط به باکتری اسافیلوکوکوس اورئوس در نمونه5gsm5%Cypro بود. در حالی که مقوای بدون لایه پوشش هاله عدم رشد بروز نداد. نتایج مشابه در سایر پژوهش ها نیز گزارش شده است [۱۸-۲۱]. آزمون‌های ضدمیکروبی نه تنها به عنوان یک ابزار علمی برای تأیید کارایی مقواهای آنتی‌باکتریال محسوب می‌شوند، بلکه از جنبه‌های مختلف نیز اهمیت دارند. ادعای خاصیت آنتی‌باکتریال باید بر اساس داده‌های آزمایشگاهی معتبر باشد. این آزمون‌ها میزان مهار رشد باکتری‌ها را مشخص کرده و اثربخشی محصول را به صورت کمی و کیفی ارزیابی می‌کنند. بسته‌بندی‌های آنتی‌باکتریال مستقیماً با مواد غذایی یا دارویی در تماس هستند. بنابراین، اطمینان از عملکرد ضدباکتری این مقواها در جلوگیری از آلودگی‌های میکروبی، سلامت مصرف‌کننده را تضمین می‌کند. همچنین انجام آزمون‌های دوره‌ای ضدمیکروبی به تولیدکنندگان این امکان می‌دهد تا کیفیت محصول نهایی را کنترل و در صورت نیاز فرمولاسیون یا فرآیند تولید را بهبود دهند. بسیاری از سازمان‌های استاندارد، انجام آزمون‌های ضدمیکروبی را برای تأیید و ثبت محصولات آنتی‌باکتریال الزامی می‌دانند. رعایت این مقررات به ورود محصولات به بازارهای داخلی و بین‌المللی کمک می‌کند. استفاده از مقواهای آنتی‌باکتریال به جای بسته‌بندی‌های پلاستیکی، گامی مؤثر در کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی است. آزمون ضدمیکروبی تضمین می‌کند که این محصولات جایگزین مناسبی از لحاظ بهداشتی و زیست‌محیطی هستند.

جدول۲- اندازه قطر هاله عدم رشد باکتری گرم منفی اشرشیا کلای و گرم مثبت استافیلوکوکوس اورئوس در مقوای آنتی باکتریال

شماره	کد تیمار	قطر هاله عدم رشد اشرشیا کلای (mm)	قطر هاله عدم رشد استافیلوکوکوس اورئوس (mm)
۱	نمونه بدون پوشش	۰	۰
۲	5gsm3%Cypro	۳۰	۲۲
۳	5gsm5%Cypro	۳۱	۲۱
۴	10gsm3%Cypro	۴۰	۲۵
۵	10gsm5%Cypro	۴۴	۴۰
۶	15gsm3%Cypro	۵۰	۳۶
۷	15gsm5%Cypro	۵۰	۴۴

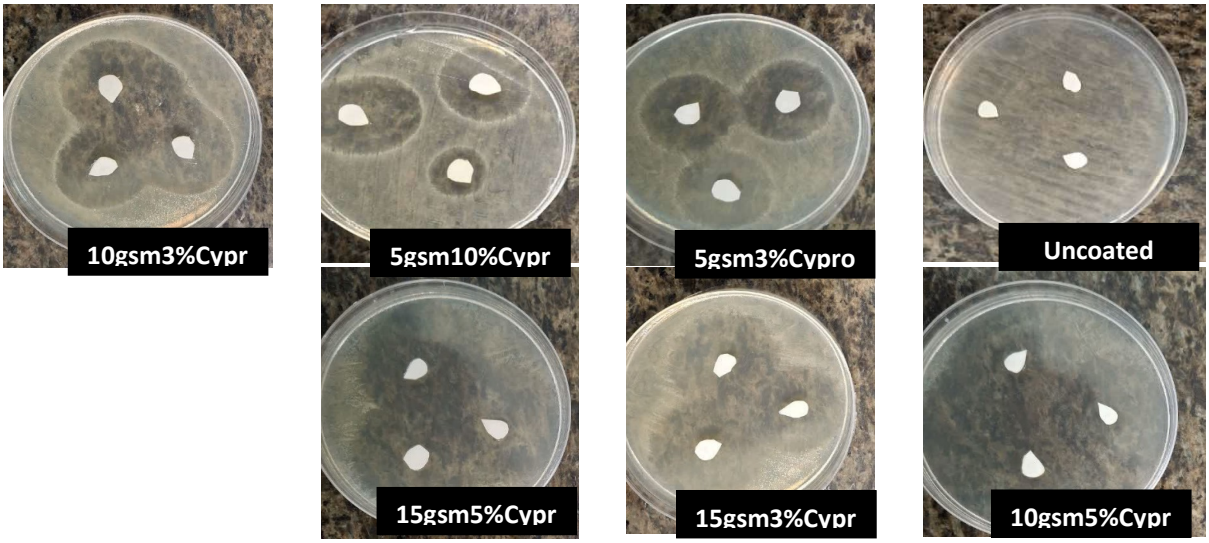
برای تعیین مقاومت، حساسیت، یا حدواسط بودن یک میکروارگانیسم در برابر آنتی‌بیوتیک‌ها از معیارهای جداول استانداردهای مؤسسه استانداردهای بالینی و آزمایشگاه[6]CLSI استفاده می‌شود. CLSI یا مؤسسه استانداردهای بالینی و آزمایشگاهی، یک سازمان غیرانتفاعی جهانی است که استانداردهایی برای روش‌های آزمایشگاهی، از جمله آزمایش‌های حساسیت آنتی‌بیوتیکی[7]تدوین می‌کند. جدول‌های CLSI شامل دستورالعمل‌ها و معیارهایی هستند که آزمایشگاه‌ها برای تعیین مقاومت، حساسیت، یا حدواسط بودن یک میکروارگانیسم در برابر آنتی‌بیوتیک‌ها از آن‌ها استفاده می‌کنند. این معیارها برای دو نوع باکتری اشرشیا کلای و استافیلوکوکوس اورئوس در جدول ۳ ارایه شده است. بر اساس نتایج قطر هاله عدم رشد جدول۲ و معیارهای استانداردهای CLSI ارایه شده در جدول ۳ مشخص می‌شود که دو نوع باکتری اشرشیا کلای و

[6] Clinical and Laboratory Standards Institute
[7] AST – Antimicrobial Susceptibility Testing

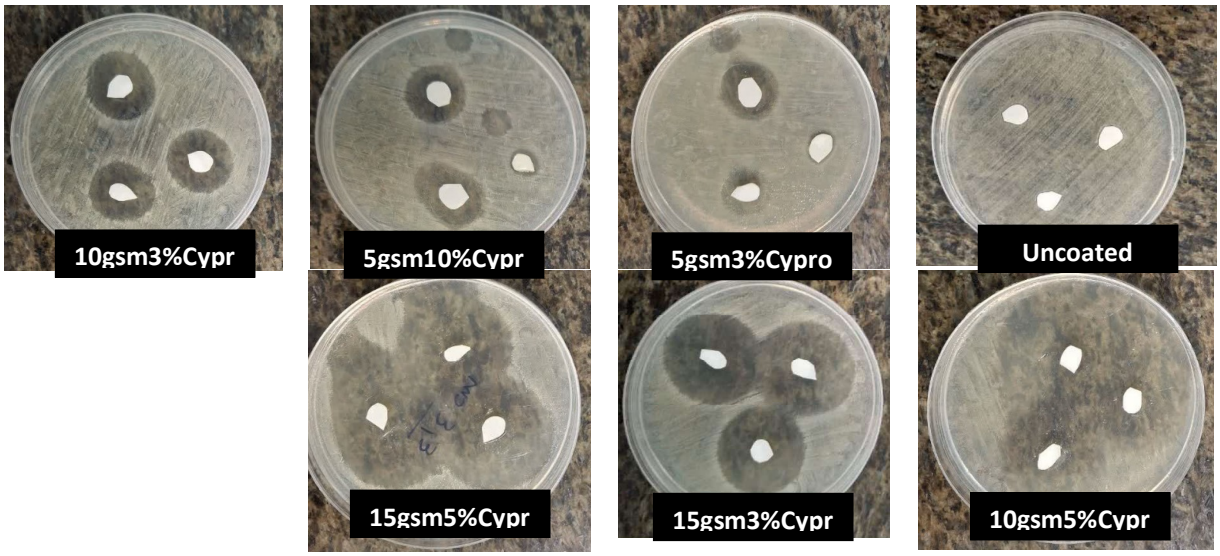
استافیلوکوکوس اورئوس نسبت به لایه پوشش آنتی باکتریال مقوای بسته بندی در حالت حد میانی و حساس قرار می‌گیرد که نشان دهنده تاثیر موثر سیروفلوکساسین در لایه پوشش می‌باشد.

جدول۳- درجه مقاومت و حساسیت دو باکتری اشرشیا کلای و استافیلوکوکوس اورئوس با توجه به قطر هاله عدم رشد براساس CLSI

نام میکروارگانیسم	مقاوم (اندازه هاله میلی متر)	حد میانی (اندازه هاله میلی متر)	حساس (اندازه هاله میلی متر)
اشریشیا کلی	≤ ۲۱	۲۲-۲۵	≥ ۲۶
استافیلوکوکوس اورئوس	≤ ۱۵	۱۶-۲۰	≥ ۲۱



شکل۲- آزمون فعالیت ضد میکروبی مقواهای پوشش داده شده و بدون پوشش در مقابل باکتری گرم منفی اشرشیا کلای

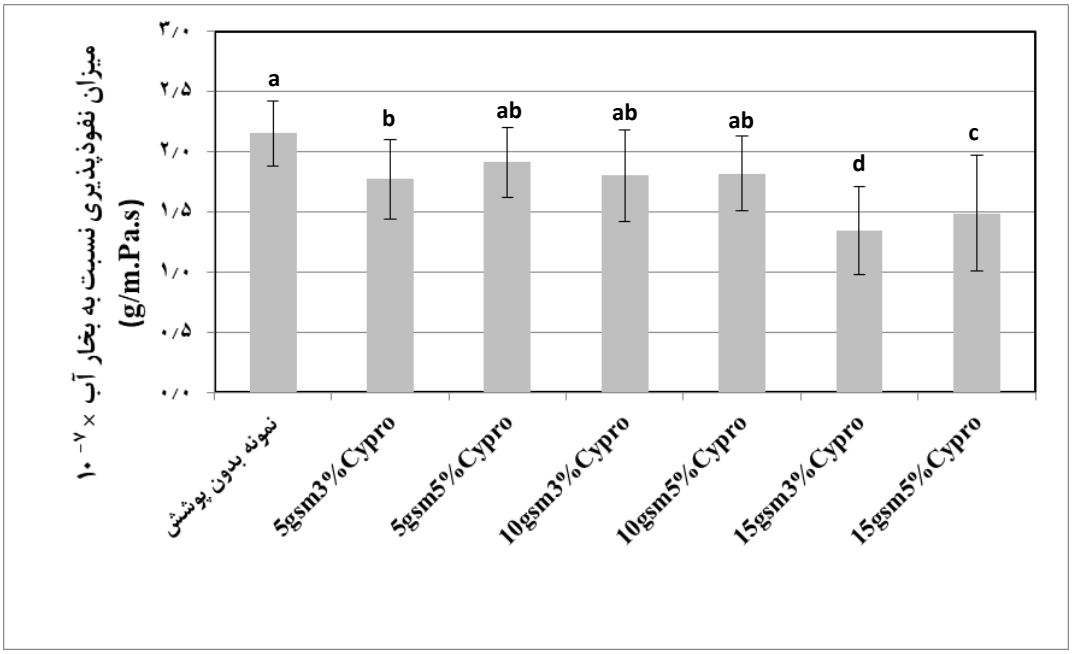


شکل۳- آزمون فعالیت ضد میکروبی مقواهای پوشش داده شده و بدون پوشش در مقابل باکتری گرم مثبت استافیلوکوکوس اورئوس

نفوذپذیری نسبت به بخار آب

نفوذ بخار آب به درون سیستم‌های بسته‌بندی یکی از عوامل تعیین‌کننده در حفظ کیفیت محصول نهایی به‌ویژه در صنعت بسته‌بندی مواد غذایی به‌شمار می‌رود. انتقال رطوبت بین ماده غذایی و محیط بیرونی بسته‌بندی می‌تواند منجر به کاهش کیفیت، تغییر بافت، رشد

میکروارگانیسم‌ها و در نهایت فساد زودهنگام محصول شود. ازاین‌رو، استفاده از موادی با قابلیت ممانعت بالا در برابر عبور بخار آب، ضروری است. نفوذپذیری بخار آب در پوششها و مواد پوششی به عوامل متعددی وابسته است که از آن جمله می‌توان به میزان آب‌دوستی یا آب‌گریزی ترکیبات تشکیل‌دهنده، روش ساخت و فرآوری، نوع و مقدار افزودنی‌ها، وجود نقص‌های ساختاری نظیر منافذ و ترک‌ها و همچنین ریزساختار کلی ماده اشاره کرد. نتایج حاصل از آزمون سرعت عبور بخار آب در شکل ۴ ارائه شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود مقوای بدون پوشش بیشترین مقدار نفوذپذیری به بخار آب به میزان g/m.Pa.s ۱۰-۷×۲/۱۵۲ و تیمار 15gsm3%Cypro کمترین مقدار نفوذپذیری به بخار آب به میزان g/m.Pa.s ۱۰-۷×۱/۳۴۵ را به خود اختصاص داده‌اند. در همه نمونه-ها با اضافه شدن لایه پوشش بر روی کاغذ، میزان سرعت عبور بخار آب کاهش نشان می‌دهد. لایه پوشش با پوشاندن خلل و فرج سطح کاغذ و ایجاد یک لایه یکپارچه، نفوذ مولکول‌های آب را کندتر می‌کند لایه پوشش کننده کاغذ، مسیر عبور مولکول‌های آب را طولانی‌تر می‌کند. مقایسه نتایج حاصل از اندازه‌گیری نفوذپذیری به بخارآب با نتایج حاصل از مطالعات پیشین مطابقت داشت [۲۲].

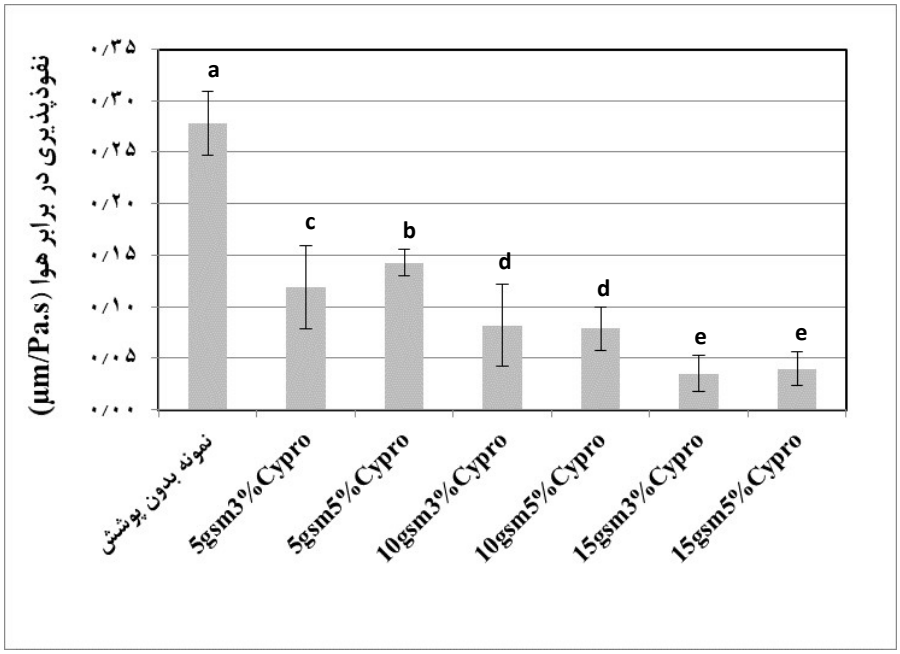


شکل۴- تأثیر لایه پوشش آنتی باکتریال بر نفوذپذیری نسبت به بخار آب در مقوای بسته‌بندی

نفوذپذیری نسبت به هوا

آزمون تخلخل گرلی زمان لازم برای عبور حجم مشخصی از هوا از میان کاغذ را اندازه‌گیری می‌کند. هرچه این زمان کمتر باشد، کاغذ تخلخل بیشتری دارد. میزان نفوذ پذیری به هوا بر حسب میکرومتر بر پاسکال ثانیه بر اساس مقاومت به عبور هوای نمونه ها و با استفاده از رابطه شماره ۱ محاسبه شد. نتایج در شکل ۵ ارایه شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود با اضافه کردن لایه پوشش آنتی‌بیوتیک بر روی سطح کاغذ بسته‌بندی، نفوذپذیری در برابر هوای نمونه ها شدیدا کاهش نشان می‌دهد به طوریکه نفوذپذیری به هوا از ۰/۲۷۸۱ میکرومتر بر پاسکال ثانیه در مقوای بدون پوشش به مقدار ۰/۰۳۵۳ میکرومتر بر پاسکال ثانیه در تیمار 15gsm3%Cypro کاهش نشان می‌دهد. لایه پوشش با مسدود کردن خلل و فرج کاغذ، مسیر عبور هوا را محدود کرده و باعث کاهش نفوذپذیری در برابر هوا می‌شود، که با نتایج پژوهش‌های پیشین هم‌خوانی دارد [۲۲، ۲۳]. این

مقاومت از شاخص‌های کلیدی کیفیت کاغذ و مقوای بسته‌بندی است و در حفظ سلامت مواد بسته‌بندی شده نقش اساسی دارد.



شکل۵-تأثیر لایه پوشش آنتی باکتریال بر نفوذپذیری به عبور هوا در مقوای بسته‌بندی

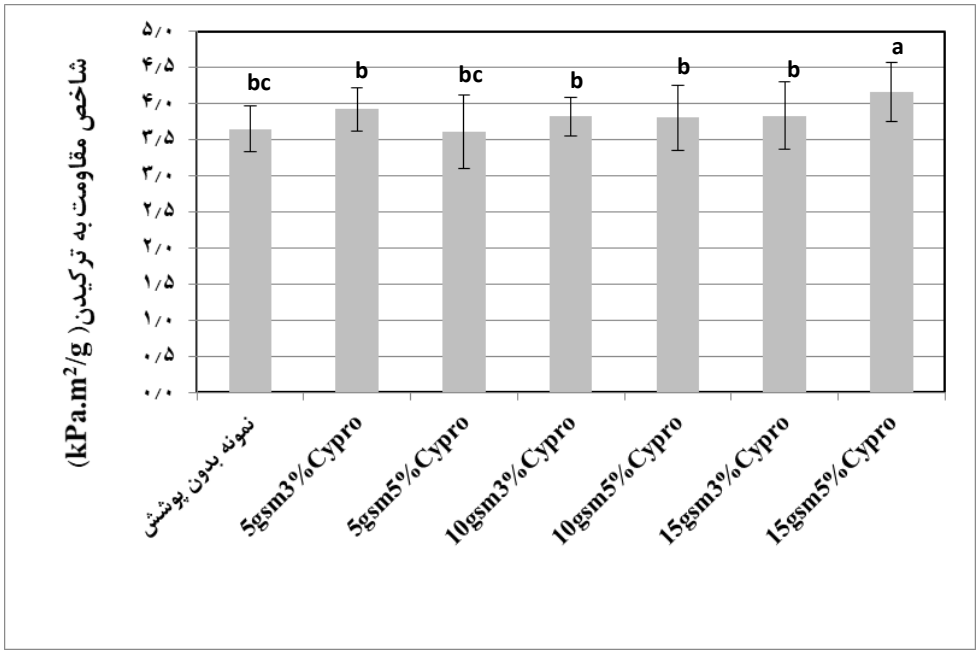
مقاومت به ترکیدن

نتایج آزمون مقاومت به ترکیدن مقواهای پوشش داده شده در شکل ۶ ارایه شده است. همانگونه که اشاره شد این آزمون برای تعیین میزان فشاری است که کاغذ می‌تواند قبل از پاره شدن تحمل کند و شاخص بسیار مهمی برای کاربردهای بسته‌بندی محسوب می‌شود. با اضافه کردن لایه پلیمری روی سطح کاغذ، مقاومت مقوا در برابر ترکیدن افزایش پیدا می‌کند. کمترین مقدار شاخص مقاومت به ترکیدن در نمونه بدون پوشش و تیمار 5gsm5%Cypro به ترتیب ۳/۶۴ $kPa.m^2/g$ و ۳/۶۱ $kPa.m^2/g$ و بیشترین مقدار شاخص مقاومت به ترکیدن در نمونه15gsm5%Cypro به مقدار ۴/۱۶ kPa.m2/g مشاهده شد. این نتیجه مشابه یافته‌های پژوهش‌های قبلی است [۲۳].

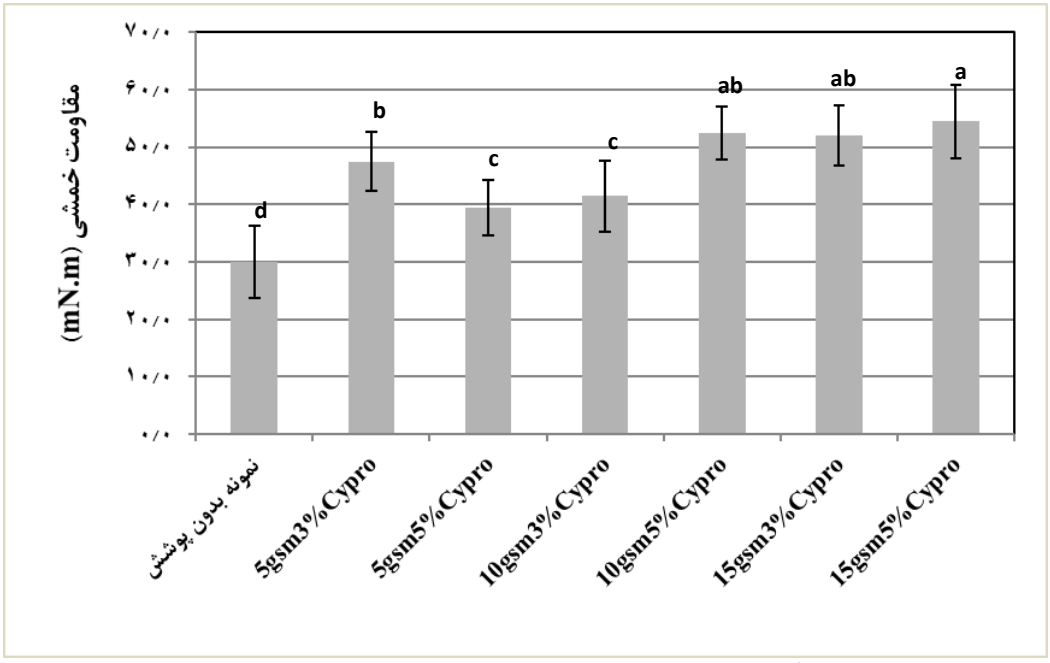
مقاومت خمشی (تابر)

مقاومت خمشی یا تابر به توانایی کاغذ و مقوا در مقاومت در برابر خم شدن یا تا شدن بدون شکستگی یا آسیب گفته می‌شود. این ویژگی یکی از مهم‌ترین مشخصات مکانیکی در صنعت کاغذسازی و بسته‌بندی است. مقاومت خمشی (تابر) معیار مهمی برای ارزیابی کیفیت کاغذ و مقوا است و تحت تأثیر عوامل ساختاری، جنس و شرایط محیطی قرار دارد. با توجه به کاربردهای مختلف کاغذ و مقوا، انتخاب و تولید نمونه‌ای با مقاومت خمشی مناسب، نقش حیاتی در کیفیت نهایی محصولات دارد. ویژگی مقاومت خمشی کاغذ و مقوا کمک می‌کند تا محصولاتی با کیفیت بالاتر طراحی و تولید شود که هم از نظر کاربری و هم از نظر ظاهری عملکرد بهتری داشته باشند. مقاومت خمشی نمونه ها در شکل ۷ ارایه شده است. کمترین مقدار مقاومت خمشی مربوط به مقوای بدون پوشش به میزان ۳۰ mN.m و بیشترین مقدار آن مربوط به تیمار15gsm5%Cypro به میزان ۵۴/۵ mN.m بود. با افزودن لایه پوشش بر روی مقوا مقاومت خمشی نمونه‌ها افزایش یافته است. وقتی روی سطح مقوا یک لایه پوشش اضافه می‌شود، با تقویت ساختار سطحی، افزایش ضخامت موثر، کاهش نفوذ رطوبت و کاهش ضعف سطحی باعث افزایش مقاومت خمشی می‌گردد. سطح مقوا معمولاً ناهموار است و نقاط ضعف دارد که محل شروع ترک‌ها هستند. لایه پوشش سطح را هموار و یکدست می‌کند و

باعث می‌شود فشار خمشی بهتر توزیع شود و از تمرکز تنش‌ها جلوگیری شود.



شکل۶-تأثیر لایه پوشش آنتی باکتریال بر شاخص مقاومت به ترکیدن در مقوای بسته‌بندی

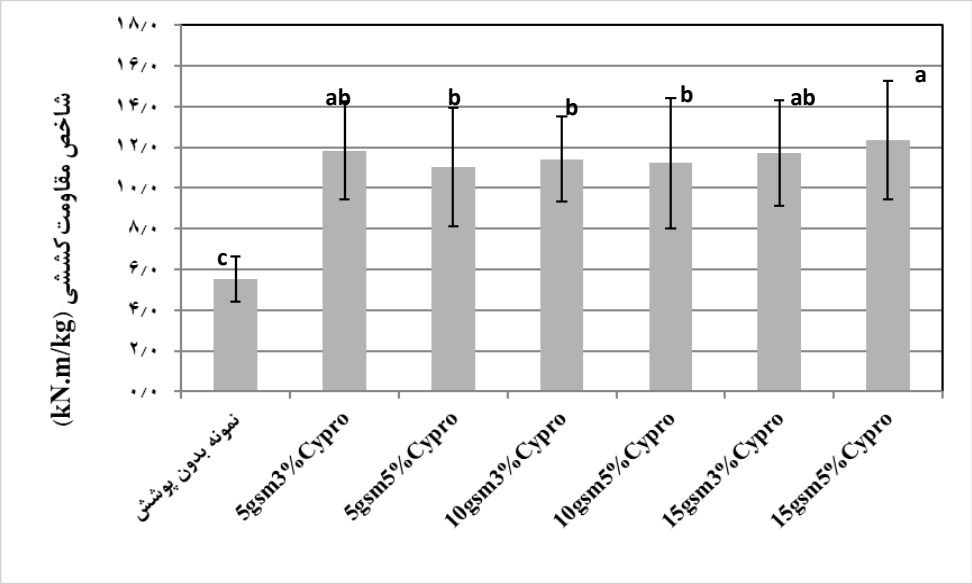


شکل۷- تأثیر لایه پوشش آنتی باکتریال بر مقاومت خمشی (تابر) در مقوای بسته‌بندی

آزمون کشش

آزمون کشش ابزاری حیاتی برای درک رفتار مواد تحت بارهای کششی است و نقش مهمی در تضمین کیفیت، ایمنی و عملکرد محصولات ایفا می‌کند. این آزمون اطلاعات کلیدی درباره خواص مکانیکی مواد فراهم می‌کند و در انتخاب مواد، طراحی مهندسی، کنترل کیفیت و تحلیل شکست کاربرد فراوانی دارد. نتایج اندازه-گیری شاخص مقاومت کششی نمونه‌ها در شکل ۸ ارایه

شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود با افزودن لایه پوشش بر روی سطح مقوا شاخص مقاومت کششی افزایش یافته است. بطوریکه کمترین میزان شاخص مقاومت کششی به اندازه ۳۲/۴۷ kN.m/kg در کاغذ بدون پوشش و بیشترین مقادیر آن به اندازه ۶۷/۶۵ kN.m/kg درتیمار 5gsm3%Cypro دیده می‌شود. نتایج حاصل با یافته‌های پژوهش‌های پیشین هم‌خوانی دارد [۲۲، ۲۳] بسته‌بندی‌های مختلف مانند جعبه‌های ارسال، جعبه‌های مقوایی، جعبه‌های تا شونده و کیسه‌های کاغذی صنعتی نیاز به مقاومت کششی بالا دارند تا در برابر نیروهای کششی ناشی از جابجایی و فشار مقاوم باشند. لایه پوشش روی مقوا علاوه بر ایجاد ویژگی آنتی‌باکتریال، با تقویت ساختار و پوشش نقاط ضعف سطح کاغذ مقاومت کششی را بهبود می‌بخشد.



شکل۸-تأثیر لایه پوشش آنتی باکتریال بر شاخص مقاومت کششی در مقوای بسته‌بندی

نتیجه‌گیری

در پژوهش اخیر، به منظور تولید مقوای آنتی‌باکتریال، سطح مقوا با لایه‌ای از کربوکسی‌متیل سلولز حاوی سیپروفلوکساسین پوشش داده شد. نتایج نشان داد که لایهٔ پوشش آنتی باکتریال متشکل از مخلوط کربوکسی-متیل‌سلولز و سیپروفلوکساسین یک ساختار لایه‌ای یکپارچه را روی کاغذ پایه شکل داده است. نتایج آزمون ضدباکتریایی حاکی از تشکیل هاله عدم رشد باکتری برای هر دو نوع باکتری بود. مقوای پوشش‌دهی شده ویژگی آنتی‌باکتریایی موثری را در برابر دو نوع باکتری گرم منفی و گرم مثبت اشرشیا کلای و استافیلوکوکوس اورئوس نشان داد. بیشترین قطر هاله عدم رشد برای باکتری اشرشیا کلای در نمونه‌های دارای پوشش ۱۵ گرم بر مترمربع و ۳ درصد سیپروفلوکساسین و پوشش ۱۵ گرم بر مترمربع و ۵ درصد سیپروفلوکساسین و کمترین آن مربوط به باکتری اسافیلوکوکوس اورئوس در نمونه دارای پوشش ۵ گرم بر مترمربع و ۵ درصد سیپروفلوکساسین بود. با اضافه شدن لایه پوشش خواص ممانعتی مقوای بسته بندی شامل نفوذپذیری نسبت به بخار آب و مقاومت نسبت به عبور هوا بهبود پیدا کردند. لایه پوشش همچنین موجب افزایش استحکام مکانیکی مقوای پوشش‌دهی شده نظیر مقاومت کششی، مقاومت خمشی و مقاومت به ترکیدن شد. نتایج نشان داد که پوشش‌دهی مقوای بسته‌بندی با لایه‌ای از کربوکسی‌متیل سلولز و سیپروفلوکساسین می‌تواند منجر به تولید مقوای بسته بندی آنتی‌باکتریال شود.

منابع

[1] Cooksey, K., 2001. Antimicrobial food packaging materials, Addit. Polym., (2001), pp.6-10.

[2] Benhacine, F., Hadj-Hamou, A. and Habi, A., 2015. Development of long-term antimicrobial poly (ε-caprolactone)/silver exchanged montmorillonite

nanocomposite films with silver ion release property for active packaging use, Polym. Bull., 73, pp. 1207-1227.

[3] Abreu, A. S., Oliveira, M., Rodrigues, A., Cerqueira, M. A., Vicente, A. A. and Machado, A. V., 2015. Antimicrobial nanostructured starch based films for packaging, Carbohydr. Polym., 129, pp. 127-134.

[4] Ambaw, A., Fadiji, T. and Opara, U.L., 2021. Thermo-Mechanical Analysis in the Fresh Fruit Cold Chain: A Review on Recent Advances. Foods, 10(6), pp.1-32.

[5] Brockgreitens, J. and Abbas, A., 2015. Responsive food packaging: Recent progress and technological prospects. Compr. Rev. Food Sci. Food Saf. 15(1), pp.3–15.

[6] Fadiji, T., Berry, T. M., Coetzee, C. J. and Opara, U.L., 2018. Mechanical design and performance testing of corrugated paperboard packaging for the postharvest handling of horticultural produce. Biosyst. Eng., 171, pp220–244.

[7] Mangaraj, S., Yadav, A., Bal, L.M., Dash, S.K. and Mahanti, N. K., 2019. Application of biodegradable polymers in food packaging industry: A comprehensive review. J. Packag. Technol. Res. 3, pp.77–96.

[8] Vasile, C. and Baican, M., 2019. Progresses in food packaging, food quality, and safety—Controlled-release antioxidant and/or antimicrobial packaging. Molecules, 26 (5), pp.1-49.

[9] Opara, U.L. and Fadiji, T., 2018. Compression damage susceptibility of apple fruit packed inside ventilated corrugated paperboard package. Sci. Hortic., 227, pp.154–161

[10] Sofi, S. A., Singh, J., Rafiq, S., Ashraf, U., Dar, B. N. and Nayik, G. A., 2018. A comprehensive review on antimicrobial packaging and its use in food packaging. Curr. Nutr. Food Sci., pp.14, 305–312.

[11] La Storia, A., Ferrocino, I., Torrieri, E., Di Monaco, R., Mauriello, G., Villani, F. and Ercolini, D., 2012. A combination of modified atmosphere and antimicrobial packaging to extend the shelf-life of beefsteaks stored at chill temperature. Int. J. Food Microbiol.,158, pp.186–194.

[12] Han, J.W., Ruiz-Garcia, L., Qian, J. P. and Yang, X. T., 2018. Food packaging: A comprehensive review and future trends. Compr. Rev. Food Sci. Food Saf., 17, pp.860–877.

[13] Anwar, R.W. and Warsiki, E., 2018. The comparison of antimicrobial packaging properties with different applications incorporation method of active material. IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci., 141.

[14] Ghasemi, A. H., Nazarnezhad, N., Rezanezhad, Sh. and Sharifi, S. H., 2018. Investigating the Possibility of Producing Antibacterial Paper for Food Packaging with Rosemary (Rosmarinus Officinalis l.) Extract. Journal of Food Science and Technology, 133(19), pp103-113. (In Persian).

[15] Akhtari, M. and Dehghani Firoozabadi, M. R., 2021. Study of antibacterial activity and other properties of paper coated by selenium nanoparticles. Iranian Journal of Wood and Paper Industries, 12(1), pp.29–44. (In Persian).

[16] Kumar, A., and Singh, R., 2023. Emerging resistance mechanisms against ciprofloxacin in clinical bacterial isolates: A comprehensive review. Journal of Antimicrobial Chemotherapy, 78(3), pp.456-472.

[17] Redgrave, L. S., Sutton, S. B., Webber, M. A. and Piddock L. J. V., 2014. Fluoroquinolone resistance: mechanisms, impact on bacteria, and role in evolutionary success. Trends Micribiology, 22(8), p438-445.

[18] Bukharov, S. V., Sadykova, Yu. M., Umarov, T. E., Burilov, A. R., Nugumanova, G. N., Momzyakova, K. S., Voloshina A. D. and T. R. Deberdeev., 2021. Synthesis and Antibacterial Activity of Cellulose Modified with Ciprofloxacin Fragments. Polymer Science, Series D, 14, pp. 575–579.

[19] Syed Abdullah, S. S., Faisul Aris, F. A., Said Azmi, S. N. N., Anak John, J. H. S., Khairul Anuar, N. N. and Mohd Asnawi, A. S. F., 2022. Development and evaluation of ciprofloxacin-bacterial cellulose composites produced through in situ incorporation method. Biotechnology Reports, 34, pp1-8.

[20] Barbara Nasiłowska, B., Bombalska, A., Kutwin, M., Lange, A., Jaworski, S., Narojczyk, K., Olkowicz, K. and Zdzisław Bogdanowicz Z., 2024. Ciprofloxacin-, Cefazolin-, and Methicilin-Soaked Graphene Paper as an Antibacterial Medium Suppressing Cell Growth. Int. J. Mol. Sci., 25(5), pp.1-16.

[21] Sikorski, D., Rosiak, P., Janczewski, L., Potrzebowski, M. J., Kregiel, D., Kazmierski, S., Neubauer, D., Kolesinska, B., Fraczyk, J., Adamczyk, A. and Draczynski, Z., 2023. Synthesis and Characterization of Antibacterial Chitosan Films with Ciprofloxacin in Acidic Conditions. Int. J. Mol. Sci., 24, pp.1-18.

[22] Heshmati, S., Azadfallah, M., Mehdi Roohani, M. and Ebrahimi, S. S., 2024. Enhancement of the properties of cellulose nanofiber coatings using ammonium-zirconium-carbonate and sorbitol. Journal of Forest and Wood Products, 77 (2), 187-200. DOI: http//doi.org/10.22059/jfwp.2024.377436.1298.

[23] Roohani, M., Movahedi, F., Kord, B. and Khakifirooz, A., 2023. Investigation on coating of paper with biodegradable polymers and Zinc Oxide nanoparticles on its mechanical and barrier properties. Journal of Wood and Paper Industries of Iran, 14(1), 97-111.