



University of Tehran

## Enhancement of the properties of cellulose nanofiber coatings using ammonium zirconium carbonate and sorbitol

Saeedeh Heshmati<sup>1</sup> | Mohammad Azadfallah<sup>2</sup> | Mehdi Roohani<sup>3</sup> |  
Seyedeh Sedigheh Ebrahimi<sup>4</sup>

1. Department of Wood and Paper Sciences and Technology, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.  
Email: [heshmati.saeede@ut.ac.ir](mailto:heshmati.saeede@ut.ac.ir)

2. Department of Wood and Paper Sciences and Technology, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.  
Email: [adfallah@ut.ac.ir](mailto:adfallah@ut.ac.ir)

3. Corresponding Author, Cellulosic Materials and Packaging Research Group, Research Center of Chemistry and Petrochemistry, Standard Research Institute, Karaj, Iran. Email: [mroohani@standard.ac.ir](mailto:mroohani@standard.ac.ir)

4. Department of Wood and Paper Sciences and Technology, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.  
Email: [s72.ebrahimi@ut.ac.ir](mailto:s72.ebrahimi@ut.ac.ir)

### ARTICLE INFO

#### Article type:

Research Article

#### Article History:

Received: 05 June 2024

Revised: 05 August 2024

Accepted: 19 August 2024

Published online: 10 September 2024

#### Keywords:

*Air permeability,*

*Barrier properties,*

*Mechanical properties,*

*Oxygen transmission rate,*

*Water vapor permeability.*

### ABSTRACT

This research was conducted with the aim of investigating and improving the properties of cellulose nanofiber coatings using ammonium zirconium carbonate and sorbitol. For this purpose, packaging films were prepared based on different formulations of cellulose nanofibers, ammonium zirconium carbonate as a cross-linking agent, and sorbitol as a softening agent, and applied as coatings on packaging paper. The barrier properties and mechanical strength of both coated and uncoated paper were measured and analyzed. The results showed that papers coated with cellulose nanofibers and ammonium zirconium carbonate exhibited proper and uniform coatings. The barrier properties of the coated papers, such as air permeability (Gurley), water vapor permeability (WVP), and oxygen transmission rate (OTR), were measured. The results demonstrated that coating the paper with the cellulose nanofiber and ammonium zirconium carbonate matrix improved the barrier properties, significantly increasing the air resistance of the paper and reducing moisture absorption, oxygen transmission rate, and water vapor permeability. The fracture surfaces of the samples were examined using a field emission scanning electron microscope (FE-SEM), revealing a uniform coating layer on the base paper and an even distribution of the cellulose nanofiber matrix along with the ammonium zirconium carbonate binder in the coating layer. The mechanical properties of the samples were evaluated through a static tensile test, which showed that the mechanical properties improved due to the coating. The sample coated with a mixture of cellulose nanofibers, 15% ammonium zirconium carbonate binder, and 100% sorbitol exhibited the highest results.

**Cite this article:** Heshmati, S., Azadfallah, M., Roohani, M., 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/jfwf.2024.377436.1298>



© The Author(s) **Publisher:** University of Tehran Press.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jfwf.2024.377436.1298>



دانشگاه تهران

## نشریه جنگل و فرآورده‌های چوب

شاپا الکترونیکی: ۲۳۸۳-۰۵۳۰

سایت نشریه: <https://jfw.ut.ac.ir>

# ارتقاء ویژگی‌های پوشش‌های نانو الیاف سلولزی با استفاده از آمونیوم زیرکونیوم کربنات و سوربیتول

سعیده حشمتی<sup>۱</sup> | محمد آزادفلاح<sup>۲</sup> | مهدی روحانی<sup>۳</sup> | سیده صدیقه ابراهیمی<sup>۴</sup>

۱. گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: [heshmati.saeede@ut.ac.ir](mailto:heshmati.saeede@ut.ac.ir)

۲. گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: [adfallah@ut.ac.ir](mailto:adfallah@ut.ac.ir)

۳. نویسنده مسئول، گروه سلولزی و بسته‌بندی، پژوهشکده شیمی و پتروشیمی، پژوهشگاه استاندارد، کرج، ایران. رایانامه: [mroohani@standard.ac.ir](mailto:mroohani@standard.ac.ir)

۴. گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: [s72.ebrahimi@ut.ac.ir](mailto:s72.ebrahimi@ut.ac.ir)

### اطلاعات مقاله

### چکیده

#### نوع مقاله:

پژوهشی

#### تاریخ‌های مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۳/۱۶

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۵/۱۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۵/۲۹

تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۰۶/۲۰

#### کلیدواژه:

خواص مکانیکی،

خواص ممانعتی،

سرعت انتقال گاز اکسیژن،

سرعت عبور بخار آب،

نفوذپذیری نسبت به هوا.

این پژوهش با هدف بررسی و بهبود خواص پوشش‌های نانوالیاف سلولزی با استفاده از آمونیوم زیرکونیوم کربنات و سوربیتول انجام شد. بدین منظور، فرمولاسیون‌های مختلف از نانوالیاف سلولزی، آمونیوم زیرکونیوم کربنات به‌عنوان عامل اتصال‌دهنده عرضی و سوربیتول به‌عنوان عامل نرم‌کننده ساخته شدند و از آنها برای پوشش‌دهی کاغذ بسته‌بندی استفاده شد. سپس خواص مقاومتی و ممانعتی کاغذهای پوشش‌دهی شده نظیر نفوذپذیری نسبت به هوا (گرلی)، سرعت عبور بخار آب (WVTR) و سرعت انتقال گاز اکسیژن (OTR) اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که پوشش‌دهی با نانو الیاف سلولزی و آمونیوم زیرکونیوم کربنات موجب بهبود خواص ممانعتی کاغذ می‌شود، به طوری که در اثر پوشش کاغذ با نانوالیاف سلولزی عمل‌آوری شده با اتصال‌دهنده آمونیوم زیرکونیوم کربنات، مقاومت در برابر عبور هوا شدیداً افزایش و میزان جذب رطوبت، سرعت انتقال گاز اکسیژن و سرعت عبور بخار آب کاهش یافت. این موضوع به انسداد خلل و فرج سطح کاغذ با ایجاد یک لایه یکپارچه، وجود مقدار زیاد پیوندهای هیدروژنی، افزایش گروه‌های آبریز حاصل از واکنش گروه‌های هیدروکسیل نانوالیاف سلولزی با آمونیوم زیرکونیوم کربنات و مسیرهای پیچشی، غیرمستقیم و طولانی‌تر عبور مولکول‌های آب و اکسیژن نسبت داده شد. علاوه بر این، نتایج بررسی سطوح شکست نمونه‌ها با میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FE-SEM) نشان‌دهنده تشکیل ساختاری لایه‌ای و یکپارچه بر سطح کاغذ پایه و توزیع یکنواخت ماتریس نانوالیاف سلولزی عمل‌آوری شده با اتصال‌دهنده آمونیوم زیرکونیوم کربنات در لایه پوشش بود. نتایج همچنین نشان داد که خواص مکانیکی نمونه‌ها در اثر پوشش‌دهی افزایش یافت، به طوری که نمونه پوشش‌دهی شده با نانوالیاف سلولزی عمل‌آوری شده با اتصال‌دهنده آمونیوم زیرکونیوم کربنات (۱۵ درصد) و سوربیتول (۱۰۰ درصد) بیشترین استحکام کششی را به خود اختصاص داد.

**استناد:** حشمتی، سعیده؛ آزادفلاح، محمد؛ روحانی، مهدی؛ ابراهیمی، سیده صدیقه (۱۴۰۳). ارتقاء ویژگی‌های پوشش‌های نانو الیاف سلولزی با استفاده از آمونیوم زیرکونیوم کربنات و

سوربیتول. نشریه جنگل و فرآورده‌های چوب، ۷۷ (۲)، ۱۸۷-۲۰۰. DOI: <http://doi.org/10.22059/jfw.2024.377436.1298>

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

© نویسنده‌گان.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jfw.2024.377436.1298>



## ۱. مقدمه

بسته‌بندی باید از زمان تولید تا مصرف، از محصول در مقابل انواع عوامل فیزیکی، شیمیایی و زیستی محافظت کند تا محصول با کیفیت و ایمن به دست مشتری برسد [۱]. حدود یک سوم صنعت بسته‌بندی را کاغذ و مقوا به خود اختصاص داده است و بیش از ۵۰ درصد این کاغذ و مقوا در صنعت بسته‌بندی مواد غذایی مصرف می‌شود [۲]، اما با وجود مزایای زیاد کاغذ، هیدروفیل بودن الیاف آن، استفاده از آن را در برخی از ساختارهای بسته‌بندی که نیاز به مانعیت به آب، روغن و بخار آب زیاد وجود دارد، محدود کرده است [۳]. این بسته‌بندی‌ها به آسانی آب را از محیط جذب می‌کنند و استحکام فیزیکی و مکانیکی خود را از دست می‌دهند [۲]. بنابراین براساس سوابق فعالیت‌های متداول صنعتی، صنعتگران بر آن شدند که با استفاده از فویل‌های آلومینیومی و یا مواد شیمیایی مشتق شده از صنعت پتروشیمی و کاربرد آن در فرآیندهای تکمیلی کاغذسازی مانند روش پوشش‌دهی خواص مانعیت به آب یا بخار آب را بهبود بخشند [۳]. اما افزایش آلودگی‌های محیط‌زیست در اثر استفاده بی‌رویه از پلاستیک‌های سنتزی، افزایش قیمت نفت و فرآورده‌های پتروشیمی، گرم شدن زمین و آثار محیط‌زیستی آن، از جمله عواملی است که توجه همگان را به استفاده از مواد زیست‌تخریب‌پذیر معطوف کرده است و در طی دو دهه اخیر، مطالعه بر روی مواد زیست‌تخریب‌پذیر حاصل از پلیمرهای طبیعی مانند پروتئین‌ها و کربوهیدرات‌ها گسترش وسیعی یافته است. این درشت‌مولکول‌ها به‌طور بالقوه می‌توانند جایگزینی مناسب برای پلیمرهای سنتزی حاصل از مشتقات نفتی به‌شمار آیند [۴]. در میان پلیمرهای مختلف، پلی‌ساکاریدها مانند نشاسته [۵]، کیتوزان [۶]، سلولز و مشتقات آن [۷] برای این منظور بررسی و استفاده شده‌اند و این گزارش‌ها بر جوانب مثبت و منفی پوشش‌های مختلف طبیعی متمرکز می‌باشند [۸]. با این وجود، در حال حاضر تنها تعداد محدودی از پلیمرهای زیستی توانایی ورود به بازار مصرف پیدا کرده‌اند که معمولاً پایداری حرارتی، خواص مانعیتی و استحکام مکانیکی این پلیمرها نسبت به انواع سنتزی پایین است [۲]. ولی به‌نظر می‌رسد که تحقیقات پیرامون دستیابی به جایگزینی مناسب برای رقابت در عرصه‌ای که مدت‌ها تحت سلطه پلاستیک‌های سنتزی بوده همچنان ضروری است، چرا که هنوز پوشش یا فرآیند مناسب به‌دست نیامده است و مطالعات بیشتری در این خصوص ضروری است. در سال‌های اخیر، استفاده از نانو مواد سلولزی به‌عنوان اجزای موجود ماتریس پوشش‌های زیستی با خصوصیات ذاتی متمایزی از جمله چگالی کم، ضریب لاغری زیاد، خاصیت مکانیکی بالا، خاصیت مانعیتی برتر در برابر گاز اکسیژن و پایداری حرارتی خوب [۹]، مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته است [۱۰-۱۲].

برای غلبه بر محدودیت‌های پلیمرهای زیستی از روش‌های مختلفی نظیر استفاده از عامل اتصال‌دهنده عرضی استفاده شده است. آمونیم زیرکونیوم کربنات یا AZC از جمله مهم‌ترین مواد اتصال‌دهنده عرضی مورد استفاده در این زمینه می‌باشد. از آمونیم زیرکونیوم کربنات به‌طور گسترده در صنایع کاغذ استفاده می‌شود تا استحکام و مقاومت پوشش‌های کاغذ در برابر آب بیشتر شود. از دیگر کاربردهای مهم این ترکیب، استفاده از آن به‌عنوان عامل اتصال‌دهنده عرضی در هیدروژل‌های سلولزی می‌باشد [۱۳]، [۱۴]. مطالعات اخیر نشان داده‌اند که می‌توان با افزودن مواد اتصال‌دهنده عرضی مانند آمونیم زیرکونیوم کربنات به ماتریس تشکیل‌دهنده فیلم و پوشش‌های زیستی، خواص مکانیکی و مانعیتی آن‌ها را در برابر رطوبت و بخار آب بهبود بخشید [۱۵-۱۷]. در مطالعه‌ای به‌منظور ارتقاء خواص آب‌گریزی و مقاومت در برابر اشعه فرابنفش نشاسته از آمونیم زیرکونیوم کربنات و گلی‌اکسال به‌عنوان عامل اتصال‌دهنده عرضی استفاده شد. نتایج نشان داد افزودن ۵ درصد آمونیم زیرکونیوم کربنات و ۵ درصد گلی‌اکسال موجب بهبود خواص آب‌گریزی و ضد اشعه فرابنفش در فیلم نشاسته می‌شود. استفاده از سطوح پایین آمونیم زیرکونیوم کربنات (۲/۵ درصد وزنی) و گلی‌اکسال (۰/۵ درصد) نیز موجب بهبود خواص مکانیکی و آب‌گریزی فیلم نشاسته شد [۱۸]. با این وجود، استفاده از عامل اتصال‌دهنده عرضی آمونیم زیرکونیوم کربنات منجر به افزایش شکنندگی و کاهش انعطاف‌پذیری فیلم پلیمری حاصل می‌شود. با افزودن نرم‌کننده‌هایی مانند سوربیتول به اجزای تشکیل‌دهنده ماتریس فیلم و پوشش‌های زیستی می‌توان بر مشکل شکنندگی و عدم انعطاف‌پذیری آنها فائق آمد [۱۹، ۲۰] و از طرفی، به‌علت غیر سمی بودن سوربیتول، می‌توان از آن در تماس با مواد غذایی بهره برد [۲۱، ۲۲]. از این‌رو، این پژوهش با هدف مطالعه توسعه خواص پوشش‌های نانوالیاف سلولزی با استفاده از آمونیم زیرکونیوم کربنات و سوربیتول به‌منظور بهبود خواص مکانیکی و مانعیتی کاغذهای بسته‌بندی انجام شده است.

## ۲. روش‌شناسی پژوهش

### ۲-۱. مواد

نانوالیاف سلولز با درصد خشکی ۲ درصد از شرکت دانش بنیان نانو نوین پلیمر تهیه شد. سوربیتول مایع با درصد خشکی (۶۹-٪۷۱) محصول شرکت زرین‌پلاست و آمونیوم زیرکونیوم کربنات محلول محصول شرکت سیگما آلدریج خریداری شدند و از مقوای فاقد پوشش با جرم پایه ۱۷۰ گرم بر متر مربع به‌عنوان کاغذ پایه استفاده شد.

### ۲-۲. آماده‌سازی پوشش نانوالیاف سلولزی

برای این منظور، ۴۵ گرم از ژل نانوالیاف سلولز (با درصد خشکی ۲ درصد) در ۸۰ میلی‌لیتر آب مقطر پراکنده شد. سپس به‌منظور بهبود برقراری اتصالات عرضی، آمونیوم زیرکونیوم کربنات با میزان مختلف ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد به آن اضافه و اختلاط کامل اجزای ماتریس پوشش به‌مدت ۵ ساعت، در دمای ۸۵ درجه سانتی‌گراد در حمام آب گرم با همزن مغناطیسی انجام شد. از سوربیتول در سطوح ۱۰۰، ۱۲۵ و ۱۵۰ درصد وزنی نانوالیاف سلولزی به‌عنوان عامل نرم‌کننده استفاده شد. مخلوط حاصل در حمام آب گرم در دمای ۸۵ درجه سانتی‌گراد به‌مدت یک ساعت با همزن مغناطیسی با دور ۹۰ دور در دقیقه هم‌زده شد. برای اطمینان از پخش شدن مطلوب نانو الیاف سلولزی و نرم‌کننده سوربیتول، سوسپانسیون حاصل طی چهار دوره ۵ دقیقه‌ای تحت تیمار صوتی قرار گرفت.

### ۲-۳. پوشش‌دهی مقوا

ابتدا مقوای پایه به نمونه‌هایی با ابعاد  $24/5 \times 17/5$  سانتی‌متر برش داده شد. سپس مقوای پایه روی یک سطح صاف و صلب قرار داده شده و به‌وسیله چسب نواری مهار شد تا تغییرات ابعادی آن در اثر اعمال پوشش به حداقل ممکن برسد. سپس پوشش‌های آماده‌سازی شده با استفاده از روش قالب‌گیری<sup>۱</sup> و به میزان ۱۰ گرم در متر مربع بر سطح مقوا اعمال شدند. برای این منظور اطراف کاغذ پایه مهار شده، به‌وسیله قاب شیشه‌ای مسدود شده و ترکیب پوشش نانوالیاف سلولزی آماده‌سازی شده به‌طور یکنواخت بر روی آن پخش شد. مقوای پوشش‌دهی شده برای خشک شدن به‌مدت ۲۴ ساعت درون آون با دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد قرار داده شدند. قبل و بعد از عملیات پوشش‌دهی، نمونه‌ها در اتاقک مشروط‌سازی به‌مدت حداقل ۷ روز، در دمای ۲۳ درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی ۵۰ درصد قرار داده شدند. آزمون‌ها با ۳ تکرار برای هر نمونه انجام شد. نتایج در قالب طرح آماری کاملاً تصادفی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. جدول یک مشخصات فرمولاسیون پوشش و تیمارهای مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

جدول ۱. تیمارها و فرمولاسیون پوشش‌های نانوالیاف سلولزی تهیه شده

شماره	کد تیمار	آمونیوم زیرکونیوم کربنات (درصد)	سوربیتول (درصد)
۱	CNF-100%S	-	۱۰۰
۲	CNF-125%S	-	۱۲۵
۳	CNF-150%S	-	۱۵۰
۴	CNF-100%S-5%AZC	۵	۱۰۰
۵	CNF-100%S-10%AZC	۱۰	۱۲۵
۶	CNF-100%S-15%AZC	۱۵	۱۵۰
۷	CNF-125%S-5%AZC	۵	۱۰۰
۸	CNF-125%S-10%AZC	۱۰	۱۲۵
۹	CNF-125%S-15%AZC	۱۵	۱۵۰
۱۰	CNF-150%S-5%AZC	۵	۱۰۰
۱۱	CNF-150%S-10%AZC	۱۰	۱۲۵
۱۲	CNF-150%S-15%AZC	۱۵	۱۵۰

(CNF) نانوالیاف سلولزی، (AZC) آمونیوم زیرکونیوم کربنات و (S) سوربیتول.

<sup>۱</sup>Casting

## ۲-۴. مطالعه مورفولوژی نمونه‌ها با میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FE-SEM)

برای مطالعه مورفولوژی نمونه‌ها، از میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FE-SEM) مدل MIRA3 ساخت شرکت TESCAN استفاده شد. نمونه‌ها در محیط نیتروژن مایع منجمد شده، سپس شکسته شدند تا سطوح شکست آنها مورد بررسی و مطالعه قرار گیرد.

## ۲-۵. آنالیز طیف‌سنجی مادون قرمز تبدیل فوریه

این تکنیک برای شناسایی پیوندها و تغییرات ساختار شیمیایی و گروه‌های عاملی بکار گرفته شد. باریکه‌هایی از نمونه‌ها بریده و در آن خشک شدند. سپس طیف‌های لازم با استفاده از دستگاه طیف‌سنجی مادون قرمز تبدیل فوریه Nicolet 750 مجهز به افزونه ATR و در محدوده  $4000-400\text{ cm}^{-1}$  تهیه شدند.

## ۲-۶. مطالعه خواص ممانعتی

### ۲-۶-۱. سرعت عبور اکسیژن

سرعت عبور گاز اکسیژن (OTR) (برحسب سانتی‌متر مکعب در متر مربع در روز) مقدار گاز اکسیژنی است که در واحد زمان در شرایط آزمایش خاص از لحاظ دما و رطوبت نسبی از واحد سطح نمونه عبور می‌کند. میزان انتقال اکسیژن در نمونه‌ها مطابق استاندارد ISO 15105-1:2007 با دستگاه اندازه‌گیری عبور اکسیژن GDP-C ساخت شرکت BRUGGER آلمان در دمای ۲۳ درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی  $50 \pm 2\%$  درصد اندازه‌گیری شد [۲۳]. نمونه در یک سلول عبور گاز به‌صورتی نصب می‌شود که یک مانع بین دو محفظه ایجاد کند. محفظه فشار پایین تخلیه و به‌دنبال آن محفظه فشار بالا تخلیه می‌شود. گاز از درون محفظه فشار بالا و به درون محفظه فشار پایین نفوذ می‌کند. مقدار گاز نفوذ کرده از میان نمونه به‌وسیله بالا رفتن فشار در طرف محفظه فشار پایین تعیین می‌شود.

### ۲-۶-۲. سرعت عبور بخار آب (WVTR)

سرعت عبور بخار آب عبارت است از جرم بخار آب که از واحد سطح ماده طی واحد زمان و تحت شرایط خاص دما و رطوبت عبور می‌کند. اندازه‌گیری سرعت عبور بخار آب بر اساس استاندارد ISO 2528: 2017 انجام شد [۲۴]. نمونه‌ها در قسمت درپوش ویال‌هایی که محتوی ماده جاذب رطوبت هستند، بسته شدند و کل مجموعه در محیطی با رطوبت نسبی معین قرار گرفت. برای این منظور، محلول فوق اشباع سولفات مس (II) یا کات‌کیود برای ایجاد رطوبت نسب ۹۸ درصد در درون دسیکاتور قرار داده شد و داخل ویال‌ها مقدار ۱۵ گرم سیلیکاژل (جاذب رطوبت) ریخته شد و سطح ویال‌ها توسط نمونه‌ها و ماده آب‌بندی (ماده‌ای که با قدرت به ظرف و نمونه چسبیده و در دماهای معمول به‌راحتی شکسته نشده، رطوبت‌گیر نباشد و در برابر اکسید شدن مقاوم باشد) بسته شد. پس از توزین، تمامی نمونه‌ها داخل دسیکاتور حاوی نمک سولفات مس (II) فوق اشباع قرار داده شد که در دمای آزمایشگاه رطوبتی معادل ۹۸ درصد ایجاد می‌نماید. تغییرات وزن نمونه‌ها با استفاده از یک ترازوی دیجیتال با دقت  $0.0001$  گرم اندازه‌گیری شده و نمودار تغییرات وزن برحسب زمان رسم شد تا شیب خط حاصل جهت انجام محاسبات مورد استفاده قرار گیرد. سرعت انتقال بخار از طریق رابطه یک محاسبه شد.

$$WVTR = \left( \frac{G}{A} \right) \quad \text{رابطه (۱)}$$

در این رابطه، WVTR: سرعت انتقال بخار آب ( $\text{g/m}^2 \cdot \text{s}$ )، A: سطح مقطع ظرف ( $\text{m}^2$ ) و G/A: شیب خط میانگین می‌باشد.

### ۲-۶-۳. مقاومت نسبت به عبور هوا

مقاومت نسبت به عبور هوا، مدت زمان مورد نیاز برای عبور حجم مشخصی از هوا از واحد سطح نمونه تحت فشار ثابت می‌باشد.

نفوذپذیری (مقاومت) مقوای پوشش‌دهی شده نسبت به هوا مطابق استاندارد TAPPI T 460 با استفاده از دستگاه گرلی<sup>۱</sup> اندازه‌گیری شد [۲۵]. در طی آزمون، مدت زمان لازم جهت عبور ۱۰۰ میلی‌لیتر هوا از نمونه برحسب ثانیه اندازه‌گیری شد.

## ۲-۷. جذب رطوبت

به‌منظور اندازه‌گیری میزان جذب رطوبت، قطعاتی از مقوای پوشش‌دهی شده به ابعاد ۱×۱ سانتی‌متر مربع بریده و جهت رسیدن به وزن ثابت، به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد، در داخل دسیکاتور حاوی نمک کلرید کلسیم (رطوبت صفر درصد) نگهداری شدند. سپس، نمونه‌ها به محفظه با رطوبت نسبی ۹۸ درصد و دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد انتقال یافته و در فواصل زمانی منظم از محفظه خارج شده و با استفاده از ترازو با دقت ۰/۰۰۰۱ گرم توزین شدند. محتوای رطوبتی فیلم‌ها در بازه‌های زمانی مختلف، با استفاده از رابطه ۲ محاسبه شد:

$$M_t = \left( \frac{W_t - W_0}{W_0} \right) \times 100 \quad \text{(رابطه ۲)}$$

در این رابطه،  $M_t$ : مقدار رطوبت براساس وزن خشک در زمان  $t$ ؛  $W_0$ : وزن اولیه نمونه‌ها و  $W_t$ : وزن نمونه‌ها در زمان  $t$  است.

## ۲-۸. آزمون مقاومت به کشش استاتیک

خواص کششی نمونه‌ها با انجام آزمون کشش مطابق استاندارد ASTM D882-18 اندازه‌گیری شد [۲۶]. نمونه‌ها به ابعاد ۱۰×۱۰ میلی‌متر برش داده شدند و قبل از آزمون در شرایط محیطی متعارف دمای ۲۳ درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی ۵۰ درصد متعادل‌سازی شدند. برای انجام آزمون از دستگاه کشش STM-20 ساخت شرکت SANTAM استفاده شد. آزمون با طول اولیه فک دستگاه ۵۰ میلی‌متر و سرعت کرنش ۱۰ میلی‌متر بر دقیقه و مقدار بار ۵ کیلو نیوتون انجام شد. پارامترهای مقاومت به کشش (TS)، ازدیاد طول در نقطه شکست (EA) و مدول یانگ (YM) برای نمونه تحت آزمون گزارش شدند.

## ۳. یافته‌های پژوهش و بحث

### ۳-۱. بررسی ریز ساختار لایه پوشش با میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FE-SEM)

مورفولوژی سطح و سطح مقطع کاغذهای فاقد پوشش و پوشش‌دهی شده با نانوالیاف سلولز عمل‌آوری شده با اتصال‌دهنده آمونیوم زیرکونیوم کربنات و نرم‌کننده سوربیتول به‌وسیله میکروسکوپ الکترونی نشر میدانی (FE-SEM) مدل MIRA3 ساخت شرکت TESCAN مورد بررسی قرار گرفت. این بررسی‌ها شامل مشاهده سطح تازه شکسته نمونه‌ها در دمای نیتروژن مایع است. این روش به قضاوت درباره یکنواختی لایه پوشش، وجود منافذ و فضاهای خالی در بافت پوشش کمک شایانی می‌کند [۲]. میکروگراف‌های شکل یک سطوح شکست نمونه پوشش‌دهی شده را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، لایه پوشش نانوالیاف سلولزی عمل‌آوری شده با آمونیوم زیرکونیوم کربنات و سوربیتول به‌راحتی قابل شناسایی هستند. پوشش نانوالیاف سلولز یک ساختار لایه‌ای یکپارچه را روی کاغذ پایه شکل داده است که برای پوشش‌های نانوالیاف سلولزی یک ساختار معمول و شناخته شده است. سلولز تمایل شدیدی به خود تجمعی<sup>۲</sup> دارد و این ویژگی تشکیل ساختارهای فیلم مانند را آسان می‌کند. این آرایش متراکم نانوسلولزها نیز در گذشته توسط پژوهشگران متعددی گزارش شده است [۳۰-۲۷]. با اضافه شدن لایه پوشش حفرات و فضاهای خالی بین الیاف کاغذ پایه پر و سبب بهبود صافی سطح شده و به بهبود خواص مقاومتی و ممانعتی کاغذ پوشش‌دهی شده می‌انجامد. همچنین تشکیل پیوندهای هیدروژنی بیشتر بین ماتریس پوشش و عملکرد بالای اتصال‌دهنده عرضی آمونیوم زیرکونیوم کربنات به بهبود این شرایط کمک می‌کند [۱۶].

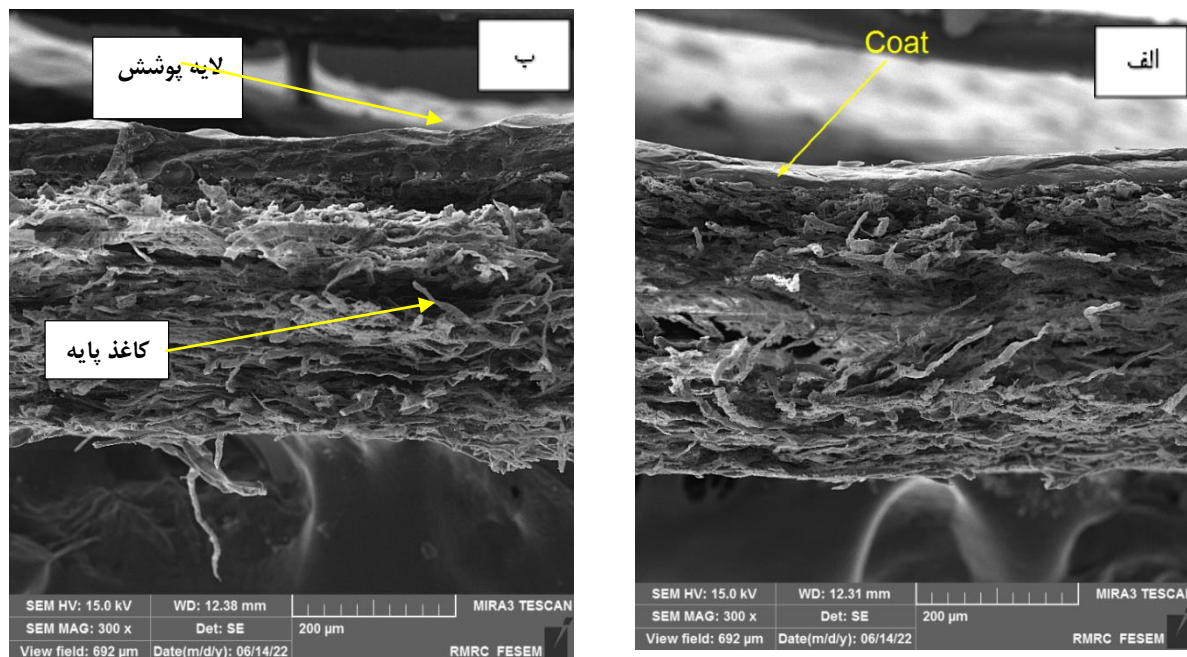
### ۳-۲. آنالیز طیف‌سنجی مادون قرمز تبدیل فوریه

طیف‌سنجی ATR-FTIR به‌منظور بررسی احتمال تشکیل و نوع پیوند بین نانو الیاف سلولزی با اتصال‌دهنده عرضی (آمونیوم

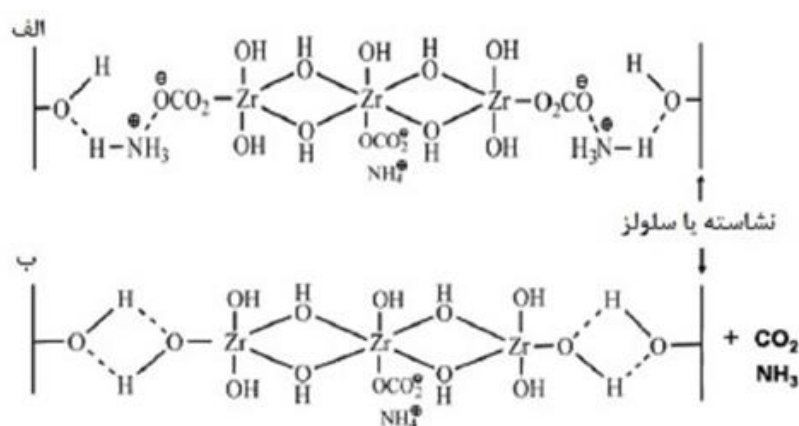
<sup>۱</sup>Gurley

<sup>۲</sup>Self-association

زیرکونیوم کربنات) و سوربیتول در لایه پوشش انجام گرفت. مکانیسم احتمالی برهمکنش بین پلیمرهای دارای گروه هیدروکسیل مانند نشاسته یا سلولز و AZC در شکل ۲ نشان داده شده است. این مکانیسم در ابتدا شامل تشکیل پیوند هیدروژنی بین نشاسته یا سلولز و یون‌های آمونیوم در محلول AZC (شکل ۲-الف) و سپس تشکیل پیوندهای هیدروژنی جدید بین گروه‌های هیدروکسیل نشاسته یا سلولز (CNF) و مواضع فعال AZC (شکل ۲-ب) پس از آزاد شدن دی‌اکسید کربن و آمونیاک در حین فرآیند خشک شدن است [۳۱].



شکل ۱. تصاویر میکروسکوپ الکترونی از سطوح شکست کاغذ پوشش‌دهی شده با نانوالیاف سلولز (S-100%-AZC-15%-CNF).

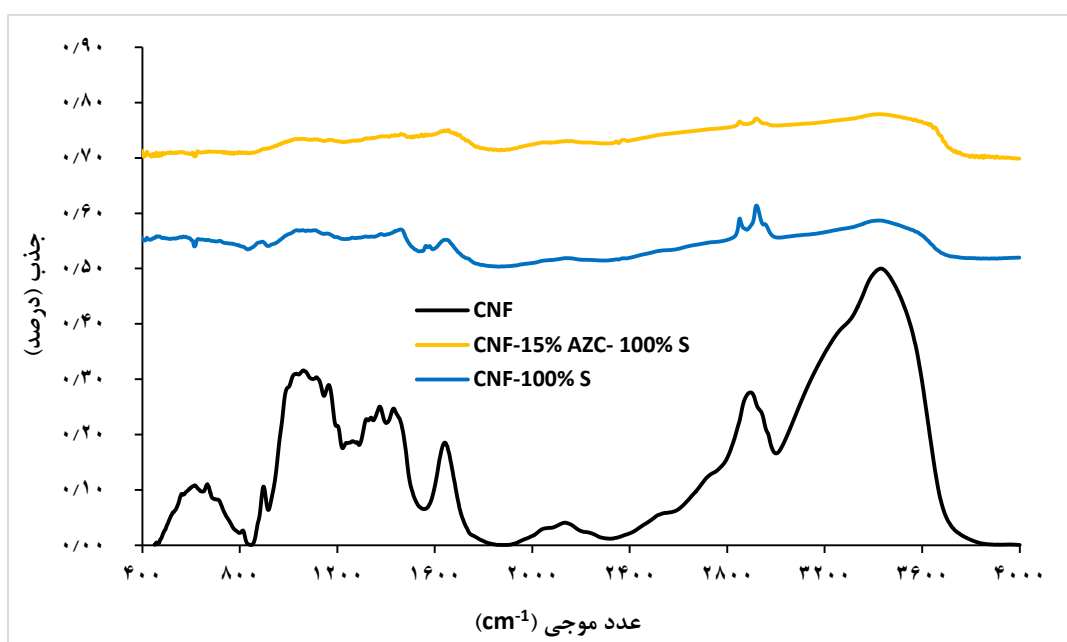


شکل ۲. تشکیل اتصال عرضی بین مولکول‌های نشاسته یا سلولز توسط AZC [۳۱]

در طیف‌های FTIR مربوط به نانوالیاف سلولز، سوربیتول و ترکیب آنها با AZC (شکل ۳) باندهای قوی پهن بین ۳۰۰۰ عکس سانتی‌متر تا ۳۵۰۰ عکس سانتی‌متر مربوط به ارتعاش کششی پیوندهای OH می‌باشد. شدت این باند به دلیل نقش اتصال‌دهنده عرضی (آمونیوم زیرکونیوم کربنات) به واسطه پیوند هیدروژنی بین مواضع فعال و واکنش‌پذیر AZC و گروه‌های هیدروکسیل متأثر شده است [۲۲]. پیک جذب ۱۶۴۰ عکس سانتی‌متر را می‌توان به ارتعاش کششی پیوندهای هیدروژنی درون

مولکولی در سلولز نسبت داد. همان‌طور که گزارش شده است، واکنش متقابل بین سایر گروه‌های عاملی واکنش‌پذیر و گروه هیدروکسیل می‌تواند مقدار پیوندهای هیدروژنی درون مولکولی را کاهش داده و بر شدت پیک در  $1640$  عکس سانتی‌متر تأثیر بگذارد [۲۲، ۳۲].

در مورد سوربیتول باندهای واقع در  $1046$  عکس سانتی‌متر و  $1084$  عکس سانتی‌متر به ارتعاشات کششی C-OH نسبت داده می‌شوند، در حالی که باندهای با حداکثر در  $950-890$  عکس سانتی‌متر و  $1415-1411$  عکس سانتی‌متر به ترتیب به دلیل ارتعاشات خمشی درون صفحه‌ای و خارج از صفحه‌ای O-H ظاهر می‌شوند [۳۳]. همچنین نوار در ناحیه  $2956-2895$  عکس سانتی‌متر مربوط به ارتعاش CH- است [۳]. این نوار جذبی شاخص حضور قندها و سوربیتول می‌باشد که با افزودن سوربیتول شدت آن افزایش می‌یابد. علاوه بر این، رخدادهای ثبت شده حکایت از پیوندزنی بین ماتریس پوشش نانوالیاف سلولز عمل‌آوری شده با آمونیوم زیرکونیوم کربنات و سوربیتول با الیاف کاغذ پایه از طریق برقراری پیوند هیدروژنی دارد.



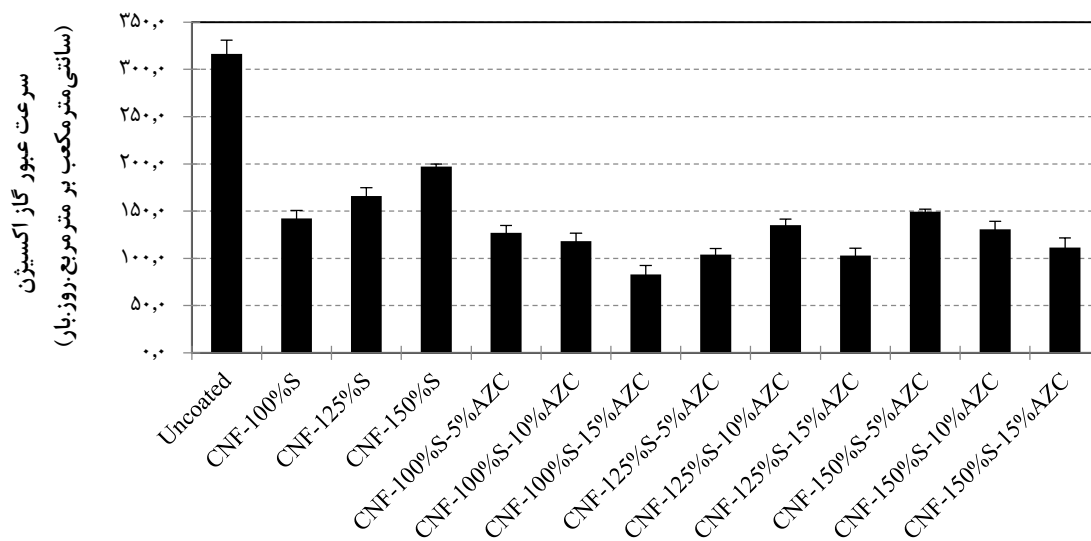
شکل ۳. طیف‌های FTIR مربوط به نانوالیاف سلولز (CNF)، کاغذ پایه پوشش‌دهی شده با نانوالیاف سلولز حاوی سوربیتول (CNF-100%S) و نانوالیاف سلولز اصلاح شده با آمونیوم زیرکونیوم کربنات و سوربیتول (CNF-15% AZC-100%S).

### ۳-۳. خواص مانعیتی

#### ۳-۳-۱. سرعت عبور اکسیژن

نفوذپذیری نسبت به گاز و ترکیبات فرار در کاغذ، مقوا و فیلم‌های پلیمری تحت تأثیر عوامل مختلفی همچون نسبت نواحی کریستالی به نواحی آمورف، میزان تحرک زنجیره‌های پلیمری و میزان برهمکنش بین گروه‌های عاملی پلیمر و مولکول‌های گاز و ترکیبات فرار در نواحی آمورف قرار دارد. فیلم‌های زیست‌پلیمری به دلیل وجود تراکم و فشردگی بالا بین زنجیره‌ها، وجود مقدار زیاد پیوندهای هیدروژنی، وجود حالت نیمه کریستالی بازدارندگی عالی در مقابل اکسیژن دارند و استفاده از آنها در بسته‌بندی با کاهش سرعت تبادل اکسیژن با محیط، افزایش ماندگاری محصول را میسر می‌سازد [۲]. نتایج حاصل از آزمون نفوذپذیری نسبت به اکسیژن در شکل ۴ ارائه شده است. در تمامی تیمارها، نفوذپذیری نسبت به اکسیژن با حضور لایه پوشش نانوالیاف سلولزی عمل‌آوری شده با آمونیوم زیرکونیوم کربنات و سوربیتول کاهش یافت. به طوری که بیشترین مقدار نفوذپذیری در کاغذ فاقد پوشش به میزان (سانتی‌مترمکعب بر مترمربع.روز.بار)  $3/316$  و کمترین مقدار به میزان (سانتی‌مترمکعب بر مترمربع.روز.بار)  $1/83$  در کاغذ پوشش‌دهی شده با نانوالیاف سلولز تیمار شده با ۱۵ درصد آمونیوم زیرکونیوم کربنات و ۱۰۰ درصد سوربیتول مشاهده شد.





شکل ۴. سرعت انتقال گاز اکسیژن (OTR) از مقوای پوشش‌دهی شده با CNF و بدون پوشش.

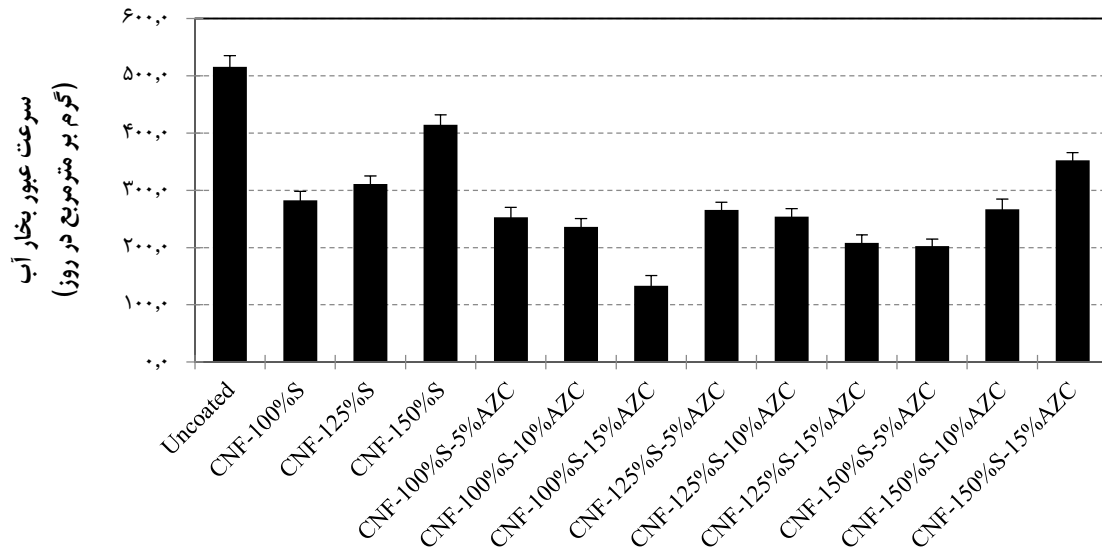
### ۳-۳-۲. سرعت انتقال بخار آب (WVTR)

کنترل نفوذپذیری به بخار آب فیلم بر کیفیت محصول نهایی مؤثر است. زمانی که هدف بسته‌بندی مواد غذایی است، انتقال رطوبت بین مواد غذایی و محیط خارج بسته‌بندی باید به حداقل رسانده شود. خاصیت نفوذپذیری پلیمرها، ارتباط مستقیمی با خاصیت آبدوست یا آبگریز بودن ترکیبات تشکیل‌دهنده آنها، فرآیند و نحوه تولید ماتریس پوشش، نوع و مقدار افزودنی‌ها به پلیمر، وجود منافذ و ترک‌خوردگی و در نهایت ساختار ماتریس پوشش دارد [۲]. نتایج حاصل از آزمون سرعت عبور بخار آب در شکل ۵ ارائه شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود کاغذ فاقد پوشش بیشترین مقدار سرعت عبور بخار آب به میزان ۵۱۵/۸ و کاغذ پوشش‌دهی شده با ماتریس نانوالیاف سلولز به همراه ۱۵ درصد آمونیوم زیرکونیوم کربنات و ۱۰۰ درصد سوربیتول کمترین میزان سرعت عبور بخار آب به میزان ۱۳۳/۳ (گرم بر مترمربع در روز) را به خود اختصاص داده‌اند. در همه نمونه‌ها با اضافه شدن لایه پوشش روی کاغذ، 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. حضور آمونیوم زیرکونیوم کربنات، شدت این کاهش را بیشتر می‌کند. این موضوع را می‌توان به مقاومت به آب بالاتر آمونیوم زیرکونیوم کربنات نسبت به ماتریس پوشش (نانوالیاف سلولزی و سوربیتول) و کاغذ مرتبط دانست [۱۶]. در حقیقت وارد کردن آمونیوم زیرکونیوم کربنات به ساختار ماتریس پوشش (نانوالیاف سلولز و سوربیتول) و لایه پوشش‌دهنده کاغذ، مسیر عبور مولکول‌های آب را پریچ و خم‌تر و طولانی‌تر می‌کند. مقایسه نتایج حاصل از اندازه‌گیری نفوذپذیری به بخار آب با نتایج حاصل از مطالعات پیشین مطابقت داشت [۱۶، ۱۷]. این محققان نشان دادند که افزایش غلظت آمونیوم زیرکونیوم کربنات به پلیمرهای مختلف سبب کاهش تراوایی بخار آب گردید. این کاهش نفوذ در اثر حضور آمونیوم زیرکونیوم کربنات را می‌توان به مسیرهای پیچشی و غیرمستقیم عبور مولکول‌های آب مرتبط دانست. ابعاد بسیار ریز نانو سلولز فضاهای خالی بستر پلیمر متخلخل را پر می‌نماید که در نتیجه این امر، پوشش تولیدی، رطوبت یا آب را به‌سختی منتقل می‌کند.

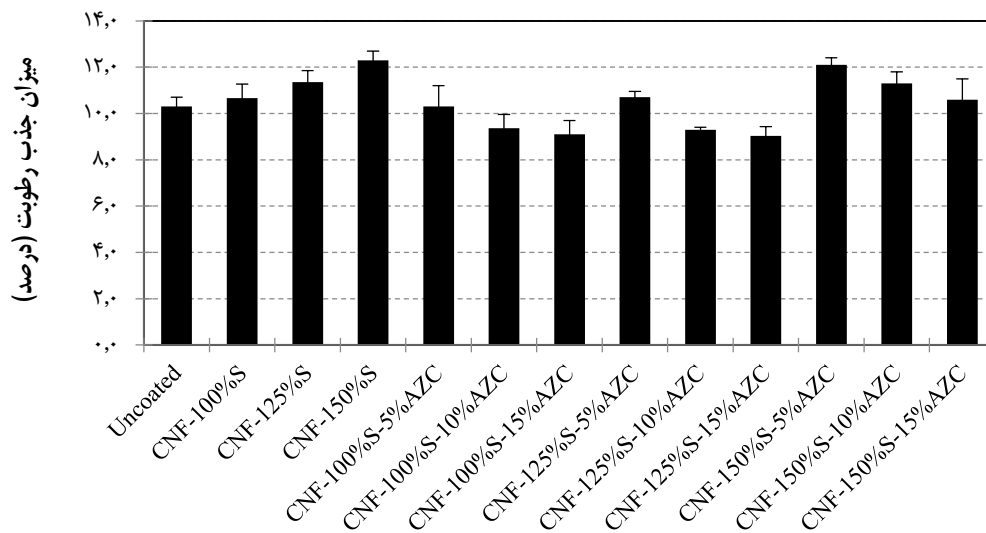
### ۳-۳-۳. میزان جذب رطوبت

همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، با افزایش عامل اتصال‌دهنده عرضی آمونیوم زیرکونیوم کربنات به ماتریس نانوالیاف سلولز به دلیل داشتن خاصیت آبگریزی این ماده، میزان جذب رطوبت پوشش‌ها کاهش نشان داد. این موضوع را می‌توان با افزایش گروه‌های آبگریز توضیح داد که به دلیل واکنش گروه‌های هیدروکسیل نانوالیاف سلولز با آمونیوم زیرکونیوم کربنات بود

[۱۶]. افزودن ترکیب پلاستیسیزر سوربیتول به ماتریس نانوالیاف سلولز و اتصال دهندهٔ عرضی آمونیوم زیرکونیوم کربنات، سبب افزایش میزان نفوذپذیری به رطوبت پوشش می‌گردد [۱۷]. هر اندازه به میزان سوربیتول در محلول سازندهٔ فیلم افزوده شود، رطوبت در فیلم افزایش می‌یابد. علت این افزایش را می‌توان به خاصیت آبدوست بودن سوربیتول نسبت داد که باعث ایجاد یک رابطهٔ مستقیم بین درصد سوربیتول و رطوبت فیلم می‌شود [۱۷].



شکل ۵. سرعت عبور بخار آب از مقوای پوشش دهی شده با CNF و بدون پوشش.

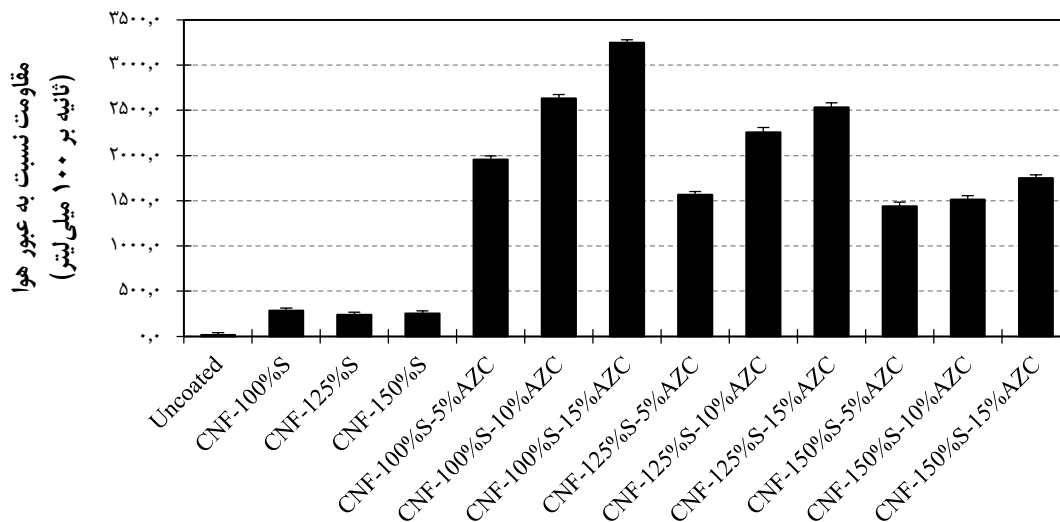


شکل ۶. میزان جذب رطوبت مقوای پوشش دهی شده با CNF و بدون پوشش.

### ۳-۳-۴. مقاومت در برابر عبور هوا

مقاومت در برابر عبور هوا یکی از مهم‌ترین شاخص‌های کاغذ و مقوای بسته‌بندی است که نقش به‌سزایی در حفظ کیفیت و سلامت مواد بسته‌بندی شده دارد [۲]. نتایج حاصل از آزمون مقاومت کاغذ در برابر عبور هوا در شکل ۷ نشان داده شده است.

همان‌گونه که مشاهده می‌شود در اثر پوشش کاغذ با نانوالیاف سلولز مقاومت در برابر عبور هوا به شدت افزایش می‌یابد به طوری که کمترین مقاومت در برابر عبور هوا مربوط به کاغذ فاقد پوشش ۱۷/۸ (ثانیه بر ۱۰۰ میلی‌لیتر) و بیشترین میزان مقاومت در برابر عبور هوا مربوط به کاغذ پوشش‌دهی شده با مخلوط نانوالیاف سلولز، ۱۵ درصد آمونیم زیرکونیوم کربنات و ۱۰۰ درصد سوربیتول به اندازه ۳۲۴۶/۷ (ثانیه بر ۱۰۰ میلی‌لیتر) مشاهده شد. در اثر افزودن لایه پوشش بر سطح کاغذ و انسداد خلل و فرج ساختار آن مسیرهای عبور و انتقال مولکول‌های هوا کمتر شده و با کاهش تخلخل کاغذ، مقاومت در برابر عبور هوای آن افزایش می‌یابد. نتایج مشابه در سایر پژوهش‌ها گزارش شده است [۱۷-۱۵].



شکل ۷. مقاومت در برابر عبور هوا در مقوای پوشش‌دهی شده با CNF و بدون پوشش.

### ۳-۴. خواص فیزیکی و مکانیکی

#### ۳-۴-۱. آزمون کشش استاتیک

آزمون کشش یکی از آزمون‌های مکانیکی است که در آن نمونه تحت نیروی کششی تا نقطه شکست قرار می‌گیرد و این درحالی است که ازدیاد طول نیز به صورت همزمان با بار اعمالی ثبت می‌شود. منحنی تنش-کرنش مهندسی براساس مقادیر بار-ازدیاد طول رسم می‌شود و خروجی آزمون یک منحنی تنش-کرنش می‌باشد که نشان‌دهنده رفتار ماده تحت کشش است [۲]. داده‌های به دست آمده در این آزمون برای تعیین خواص مکانیکی ماده استفاده می‌شود. استحکام کششی یا استحکام نهایی کشش (UTS)، بیشینه تنش کششی است که نمونه قبل از شکست تحمل می‌کند و بصورت نسبت بار بیشینه به سطح مقطع اولیه نمونه تعریف می‌شود. این شاخص مقاومت کششی نیز نامیده می‌شود [۲]. استحکام نهایی کششی نمونه‌ها در جدول ۲ ارائه شده است. مشاهده می‌شود که با افزودن لایه پوشش روی سطح کاغذ مقاومت کششی کاغذ افزایش یافته است. به طوری که کمترین مقدار مقاومت کششی به اندازه ۱۲/۵ مگاپاسکال (MPa) در کاغذ فاقد پوشش و بیشترین مقادیر آن به ترتیب در نمونه پوشش‌دهی شده با ماتریس نانوالیاف سلولز به همراه ۱۵ درصد آمونیم زیرکونیوم کربنات و ۱۰۰ درصد سوربیتول به اندازه ۲۴/۳ مگاپاسکال مشاهده می‌شود.

شیب بخش خطی منحنی تنش-کرنش مدول الاستیسیته می‌باشد [۲]. این پارامتر معیاری برای سفتی ماده است که همان مقاومت در برابر تغییر فرم می‌باشد. مدول الاستیسیته کاغذهای پوشش‌دهی شده و فاقد پوشش در جدول ۲ ارائه شده است. مشاهده می‌شود که با افزودن لایه پوشش مدول الاستیسیته یا صلبیت نمونه‌ها افزایش یافته است. با این وجود حضور نرم‌کننده سوربیتول با افزایش قابلیت تحرک مولکولی اثر منفی بر روی مدول الاستیسیته نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌گردد،

کمترین مقدار مدول الاستیسیته در نمونه فاقد پوشش به اندازه ۴۶۰/۱۲ مگاپاسکال و بیشترین مقدار مدول الاستیسیته در نمونه کاغذ پوشش دهی شده با ماتریس نانوالیاف سلولز، ۱۵ درصد آمونیوم زیرکونیوم کربنات و ۱۰۰ درصد سوربیتول به اندازه ۹۲۹/۲ مگاپاسکال دیده شد.

جدول ۲. خواص مکانیکی مقوای اندود شده و فاقد اندود.

کد تیمار	مقاومت کششی (مگاپاسکال)	مدول یانگ (مگاپاسکال)	(ازدیاد طول در مرحله شکست) (درصد)
Uncoated	۱۲/۵±۱/۱	۴۶۰/۱۲±۳۵/۱	۵/۲±۰/۷
CNF-100%S	۱۵/۲±۱/۶	۶۸۱/۱±۳۶/۲	۶/۱±۱/۲
CNF-125%S	۲۰/۳±۲	۶۷۸/۸±۴۶/۱	۱۰/۱±۰/۸
CNF-150%S	۱۴/۲±۱/۱	۶۰۶/۳±۳۵/۸	۱۱/۳±۰/۷
CNF-100%S-5%AZC	۱۳/۰±۱/۶	۶۵۰/۷±۴۰/۶	۵/۴±۱/۴
CNF-100%S-10%AZC	۲۲/۴±۲/۲	۷۷۵/۴±۵۷/۲	۶/۲±۱/۴
CNF-100%S-15%AZC	۲۴/۳±۲/۸	۹۲۹/۲±۵۴/۱	۷/۶±۱/۴
CNF-125%S-5%AZC	۲۳/۱±۲/۱	۶۳۴/۸±۶۰/۱	۸/۲±۱/۳
CNF-125%S-10%AZC	۱۵/۱±۲/۱	۶۲۹/۲±۴۵/۸	۶/۴±۱/۹
CNF-125%S-15%AZC	۱۷/۳±۳/۳	۷۸۹/۲±۶۰/۶	۸/۳±۱/۱
CNF-150%S-5%AZC	۱۶/۲±۲/۱	۶۳۳/۱±۵۱/۱	۹/۱±۱/۶
CNF-150%S-10%AZC	۱۳/۲±۲/۴	۶۵۸/۱±۴۳/۳	۹/۳±۱/۱
CNF-150%S-15%AZC	۱۸/۱±۲/۸	۶۸۷/۹±۶۲/۸	۹/۲±۱/۴

درصد ازدیاد طول یا میزان قابلیت تغییر فرم پلاستیک، عموماً تغییر طول است که کرنش شکست یا درصد افزایش طول و کاهش سطح مقطع نیز تعریف می‌شود. نتایج تعیین درصد ازدیاد طول یا تغییر طول در مرحله شکست نمونه‌های کاغذهای پوشش دهی شده و فاقد پوشش در جدول ۲ مشاهده می‌شود. تغییر طول در مرحله شکست برخی نمونه‌ها با اضافه شدن لایه پوشش افزایش و در بعضی نمونه‌ها کاهش نشان می‌دهد. در کاغذ فاقد پوشش، تغییر طول در مرحله شکست به اندازه ۵/۳ درصد مشاهده شد. در نمونه کاغذ پوشش دهی شده با ماتریس نانوالیاف سلولز به همراه ۵ درصد آمونیوم زیرکونیوم کربنات و ۱۰۰ درصد سوربیتول تغییر طول در مرحله شکست به مقدار ۵/۱ درصد کاهش نشان داد. با افزایش حضور پلاستیسایزر و در شرایط عدم حضور عامل برقراری اتصال عرضی، تغییر طول در مرحله شکست افزایش یافت به طوری که در نمونه پوشش دهی شده با ماتریس نانوالیاف سلولز و ۱۵۰ درصد سوربیتول به اندازه ۱۱/۱ رسید.

#### ۴. نتیجه گیری

به منظور بهبود خواص کاغذ بسته بندی، پوشش نانوالیاف سلولزی با اتصال دهنده عرضی آمونیوم زیرکونیوم کربنات و نرم کننده سوربیتول اصلاح و به مقدار ۱۰ گرم بر متر مربع بر روی مقوا اعمال شد. سپس خواص ممانعتی کاغذ بسته بندی پوشش دهی شده نظیر نفوذپذیری نسبت به هوا، نفوذپذیری نسبت به بخار آب (WVTR) و نفوذپذیری نسبت به اکسیژن (OTR) و خواص مکانیکی آن اندازه گیری و با کاغذ فاقد پوشش مقایسه شد. نتایج نشان داد پوشش دهی کاغذ با ماتریس نانوالیاف سلولز فرموله شده با اتصال دهنده آمونیوم زیرکونیوم کربنات و نرم کننده سوربیتول موجب بهبود خواص ممانعتی شد. همچنین خواص مکانیکی نمونه‌ها در اثر پوشش دهی افزایش یافت به طوری که کاغذ پوشش دهی شده با ماتریس نانوالیاف سلولز و اتصال دهنده آمونیوم زیرکونیوم کربنات ۱۵ درصد و نرم کننده سوربیتول ۱۰۰ درصد بهترین نتایج را نشان داد. نتایج آنالیز انجام شده توسط طیف سنجی FTIR از پوشش‌های نانوالیاف سلولزی خالص و پوشش‌های نانوالیاف سلولزی عمل آوری شده نشان داد که پیک جذبی جدید و به عبارتی گروه عاملی متفاوت به ویژه در اثر تشکیل اتصال عرضی توسط AZC تشکیل نشده است. با این وجود از شدت برخی از

پیک‌های جذبی مرتبط کاسته شده است که خود تاییدی بر تشکیل اتصالات عرضی فیزیکی از طریق پیوندهای هیدروژنی است. یافته‌ها با نتایج سایر پژوهش‌ها با پوشش‌های بر پایه نشاسته همخوانی داشت [۳۱].

## ۵. منابع

- [1] Dehghani Firoozabadi, M.R., & Kolaei Moakhar, F. (2019). Investigation and comparison of mechanical and barrier properties of stone paper and glossy paper. *Journal of Wood and Paper Industries of Iran*, 10(3), 373-384. (In Persian)
- [2] Roohani, M., Movahedi, F., Kord, B., & 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.
- [3] Armand, K., & Ghasemiyan, A. (2020). Effect of coating of packaging paper using chitosan and modified polylactic acid. *Iranian Journal of Wood and Paper Science Research*, 35(4), 321-331. (In Persian)
- [4] El-Sakhawy, M., & Hassan, M.L. (2007). Physical and mechanical properties of microcrystalline cellulose prepared from agricultural residues. *Carbohydrate Polymers*, 67(1), 1-10.
- [5] Li, H., Qi, Y., Zhao, Y., Chi, J., & Cheng, S. (2019). Starch and its derivatives for paper coatings: A review. *Prog. Org. Coatings*, 135(2), 213-227.
- [6] Basak, S., Dangate, M.S. & Samy, S. (2024). Oil-and water-resistant paper coatings: A review. *Progress in Organic Coatings*, 186(3), 107938.
- [7] Xia, Y., Wang, S., Meng, F., Xu, Z., Fang, Q., Gu, Z., Zhang, C., Li, P., & Kong, F. (2024). Eco-friendly food packaging based on paper coated with a bio-based antibacterial coating composed of carbamate starch, calcium lignosulfonate, cellulose nanofibrils, and silver nanoparticles. *International Journal of Biological Macromolecules*, 254(3), 127659.
- [8] Panahirad, S., Dadpour, M., Peighambardoust, S.H., Soltanzadeh, M., Gullón, B., Alirezalu, K., & Lorenzo, J.M. (2021). Applications of carboxymethyl cellulose-and pectin-based active edible coatings in preservation of fruits and vegetables: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 110(4), 663- 673.
- [9] Shimizu, M., Saito, T., & Isogai, A. (2016). Water-resistant and high oxygen-barrier nanocellulose films with interfibrillar cross-linkages formed through multivalent metal ions. *Journal of Membrane Science (J. Memb. Sci)*, 550(51), 1-7.
- [10] Barbash, V., & Yaschenko, O. (2020). Preparation, properties and use of nanocellulose from non-wood plant materials. *Novel nanomaterials*, DOI: 10.5772/intechopen.94272
- [11] Trache, D., Tarchoun, A.F., Derradji, M., Hamidon, T.S., Masruchin, N., Brosse, N., & Hussin, M.H. (2020). Nanocellulose: from fundamentals to advanced applications. *Cellulose*, 8(1), 392.
- [12] Isogai, A. (2021). Emerging nanocellulose technologies: recent developments. *Advanced Materials*, 33: 2000630.
- [13] Perumal, S., Lee, H., & Jeon, S. (2021). Synthesis of hybrid nanocellulose aerogels for the removal of heavy metal ions. *Journal of Polymer Research*, 28 (8), 325.
- [14] Curvello, R., Singh, Vikram., & Gil, R. (2019). GarnierEngineering nanocellulose hydrogels for biomedical applications. *Advances in Colloid and Interface Science*, 267(1), 47-61
- [15] Mikkonen, K.S., Schmidt, J., Vesterinen, A.-H., & Tenkanen, M. (2013). Crosslinking with ammonium zirconium carbonate improves the formation and properties of spruce galactoglucomannan films. *Journal of Materials Science*, 48(12), 4205-4213.
- [16] Chen, X., Ren, J., & Meng, L. (2015). Influence of ammonium zirconium carbonate on properties of poly (vinyl alcohol)/xylan composite films. *Journal of Nanomaterials*, 2015(1), 1-8.
- [17] Queirós, L.C.C., Sousa, S.C.L., Duarte, A.F.S., Domingues, F.C., & Ramos, A.M.M. (2017). Development of carboxymethyl xylan films with functional properties. *Journal of Food Science and Technology*, 54(1), 9-17.

- [18] Ni, S., Wang, B., Zhang, H., Zhang, Y., Liu, Zh., Wu, W., Xiao, H., & Dai, H., (2019). Glyoxal improved functionalization of starch with AZC enhances the hydrophobicity, strength and UV blocking capacities of co-crosslinked polymer. *European Polymer Journal*, 110(1), 385-393
- [19] Liu, M., Zhou, Y., Zhang, Y., Yu, C., & Cao, S. (2014). Physicochemical, mechanical and thermal properties of chitosan films with and without sorbitol, *International Journal of Biological Macromolecules*, 70(2), 340-346.
- [20] Harussani, M.M., Sapuan, S.M., Firdaus, A.H.M., El-Badry, Y.A., Hussein, E.E., & El-Bahy, Z.M. (2021). Determination of the tensile properties and biodegradability of cornstarch-based biopolymers plasticized with sorbitol and glycerol. *Polymers (Basel)*, 13(21), 3709.
- [21] Yadav, R.B. (2024). Biodegradable Packaging: Recent Advances and Applications in Food Industry, *Food Process Engineering and Technology: Safety, Packaging, Nanotechnologies Human Health*, pp. 189-213.
- [22] Shuzhen, N., Liang, J., Hui, Z., Yongchao, Z., Guigan, F., Huining, X., & Hongqi, D. (2018). Enhancing hydrophobicity, strength and UV shielding capacity of starch film via novel co-cross-linking in neutral conditions. *Royal Society Open Science*, 5(11), 181206.
- [23] ISO 15105-1:2007, Plastics - Film and sheeting - Determination of gas-transmission rate - Part 1: Differential-pressure methods.
- [24] ISO 2528:2017, Sheet materials - Determination of water vapour transmission rate (WVTR) - Gravimetric (dish) method.
- [25] TAPPI T 460, Air resistance of paper (Gurley method).
- [26] ASTM D882-18, Standard Test Method for Tensile Properties of Thin Plastic Sheeting.
- [27] Li, F., Biagioni, P., Bollani, M., Maccagnan, A., & Piergiovanni, L. (2013). Multi-functional coating of cellulose nanocrystals for flexible packaging applications. *Cellulose*, 20(5), 2491-2504.
- [28] Herrera, M. A., Sirviö, J. A., Mathew, A. P., & Oksman, K. (2016). Environmental friendly and sustainable gas barrier on porous materials: Nanocellulose coatings prepared using spin-and dip-coating. *Materials & Design*, 93(5), 19-25.
- [29] Amini, E., Azadfallah, M., Layeghi, M., & Talaei-Hassanloui, R. (2016). Silver-nanoparticle-impregnated cellulose nanofiber coating for packaging paper. *Cellulose*, 23(1), 1-14.
- [30] Aulin, C., Gällstedt, M., & Lindström, T. (2010). Oxygen and oil barrier properties of microfibrillated cellulose films and coatings. *Cellulose*, 17(3), 559-574.
- [31] Song, D. (2011). Starch crosslinking for cellulose fiber modification and starch nanoparticle formation. Doctor of Philosophy in the School of Chemical and Biomolecular Engineering Georgia Institute of Technology.
- [32] Wang, S., Zhang, F., Chen, F., & Pang, Z. (2013). Preparation of a crosslinking cassava starch adhesive and its application in coating paper. *BioResources*, 8(3), 3574-3589.
- [33] de Castro, E.D.S., & Cassella, R.J. (2016). Direct determination of sorbitol and sodium glutamate by attenuated total reflectance Fourier transform infrared spectroscopy (ATR-FTIR) in the thermostabilizer employed in the production of yellow-fever vaccine. *Talanta*, 152(1), 33-38.