

Feasibility Study on the Production of Cellulose Films from Hypochlorite-Bleached Sugarcane Bagasse Pulp

Seyede Soad Taffakh¹, Mearaj Sharari^{2*}, Mohammad Hadi Moradian³,
Bita Moezipour⁴

1- M.Sc. Student of wood industries and cellulosic products, department of Wood Science and Technology, Faculty of agriculture and natural resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

2- Corresponding authors, Associate Prof of Wood Science and Technology, department of Wood Science and Technology, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran. Email: mearaj.sharari@gmail.com

3- Assistant Professor of Wood Science and Technology, Department of Forestry and Cellulosic Industries, Faculty of Natural Resources, Khatam Al-Anbia University of Technology, Behbahan, Iran

4- Assistant prof. of Wood Science and Technology, department of Wood Science and Technology, Faculty of agriculture and natural resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

Received: November 2025

Accepted: December 2025

Abstract

Problem definition and objectives: The excessive consumption of synthetic plastics in the packaging industry poses a major global environmental challenge. Due to their limited biodegradability, these materials contribute significantly to waste accumulation and environmental pollution. Sugarcane bagasse, a by-product of the sugar industry, is an abundant and low-cost resource in Iran that can serve as a sustainable raw material for producing biodegradable films. This study aims to produce and evaluate cellulose films derived from hypochlorite-bleached bagasse pulp obtained from Pars Paper Company (Haft-Tappeh) and to investigate their physical, mechanical, and chemical properties for potential application in sustainable packaging.

Methodology: Hypochlorite-bleached bagasse pulp from Pars Paper Company (Haft-Tappeh), with a freeness of 350 CSF, brightness of 71%, and kappa number of 2, was used. The film production process involved alkalization with 20% sodium hydroxide, etherification with monochloroacetic acid, neutralization and washing with ethanol, preparation of a dope solution with a 6% weight concentration, followed by casting and coagulation in a 10% sulfuric acid bath. The produced films were characterized for mechanical properties, gas permeability, water vapor transmission rate, water contact angle, and degree of substitution according to ASTM standards.

Results: The resulting cellulose film exhibited a tensile strength of 64 MPa and a Young's modulus of 2.8 GPa, indicating adequate mechanical strength for packaging applications. The water vapor transmission rate was 248 g/m²·day, and the moisture absorption was 7.7%. Gas permeability values for CO₂ and O₂ were 0.05 and 0.4 Barrer, respectively, reflecting low gas transmission. The degree of substitution of carboxyl groups in the dope solution was 1.4 mmol/g, and the percentage of undissolved fibers was 0.5%, confirming the quality and homogeneity of the prepared dope. The droplet contact angle of 72° indicates balanced hydrophilicity of the film surface.

Conclusion: Cellulose films produced from sugarcane bagasse present a sustainable and eco-friendly alternative to petroleum-based polymer films for packaging applications. The films demonstrated moderate mechanical strength and barrier performance, making them suitable for various packaging uses. To enhance moisture resistance, surface coating or the incorporation of nanomaterials is recommended. Overall, this study highlights the potential of utilizing agricultural residues as renewable raw materials for developing sustainable packaging solutions, contributing to the reduction of environmental pollution caused by conventional plastics.

Keywords: Cellulose film, Sugarcane bagasse, Hypochlorite-bleached pulp, Packaging.

مطالعه امکان سنجی تولید فیلم سلولزی از خمیر کاغذ باگاس رنگبری شده با هیپوکلریت

سیده سعادت تفتاخ^۱، معراج شرری^{۲*}، محمدهادی مرادیان^۳، بیتا معزی پور^۴

- ۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی صنایع چوب و فراورده‌های سلولزی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.
 ۲- نویسنده مسئول، دانشیار گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران. رایانامه: mearaj.sharari@gmail.com
 ۳- استادیار گروه جنگلداری و صنایع سلولزی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه صنعتی خاتم‌الانبیا بهبهان، بهبهان، ایران.
 ۴- استادیار گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

تاریخ دریافت: آذر ۱۴۰۴

تاریخ پذیرش: دی ۱۴۰۴

چکیده

بیان مساله و اهداف: مصرف بی‌رویه پلاستیک‌های سنتزی در صنایع بسته‌بندی یکی از جدی‌ترین چالش‌های زیست‌محیطی جهان محسوب می‌شود. این مواد به دلیل تجزیه‌ناپذیری در کوتاه‌مدت، موجب انباشت زباله و آلودگی محیط زیست می‌گردند. باگاس نیشکر به‌عنوان محصول جانبی صنایع قند و شکر، منبعی فراوان و کم‌ارزش در ایران محسوب می‌شود که می‌تواند به‌عنوان جایگزین پایدار برای تولید فیلم‌های زیست‌تخریب‌پذیر مورد استفاده قرار گیرد. هدف این پژوهش، تولید و ارزیابی فیلم‌های سلولزی از خمیر رنگ بری شده باگاس نیشکر شرکت کاغذ پارس هفت‌تپه و بررسی خواص فیزیکی، مکانیکی و شیمیایی آن‌ها برای کاربرد در بسته‌بندی پایدار می‌باشد.

مواد و روشها: در این مطالعه از خمیر رنگ بری شده هیپوکلریت باگاس شرکت کاغذ پارس هفت‌تپه با درجه روانی ۳۵۰CSF، درجه روشنی ۷۱ درصد و عدد کاپا ۲ استفاده شد. فرآیند تولید فیلم شامل مراحل قلیایی‌سازی با هیدروکسید سدیم ۲۰ درصد، اتری کردن با مونوکلرواستیک اسید، خنثی‌سازی و شستشو با اتانول، تهیه محلول دوپ با غلظت ۶ درصد وزنی و سپس قالب‌ریزی و انعقاد در حمام اسیدی ۱۰ درصد سولفوریک بود. خواص مکانیکی، نفوذپذیری گازها، عبور بخار آب، زاویه تماس قطره آب و درجه جانشینی فیلم‌های تولیدی مطابق استانداردهای ASTM اندازه‌گیری شد.

نتایج: فیلم سلولزی تولیدشده دارای مقاومت کششی ۶۴ مگاپاسکال و مدول یانگ ۲/۸ گیگاپاسکال می‌باشد که نشان‌دهنده استحکام مکانیکی مناسب برای کاربردهای بسته‌بندی است. میزان عبور بخار آب ۲۴۸ گرم بر مترمربع در روز و جذب رطوبت ۷/۷ درصد اندازه‌گیری شد. نفوذپذیری گازها شامل CO₂ و O₂ به ترتیب معادل ۰/۵ و ۰/۴ Barrer و اندازه‌گیری شد که از این منظر، دارای مقدار پایینی می‌باشد. در دوپ تهیه شده، درجه جانشینی گروه کربوکسیل ۱/۴ میلی مول بر گرم و درصد لیاف حل‌نشده ۰/۵ درصد اندازه‌گیری شده که کیفیت فرآیند تولید و یکنواختی محلول را تأیید می‌کند. میزان زاویه تماس قطره ۷۲ درجه نیز نشان‌دهنده خاصیت آب‌دوستی متعادل فیلم می‌باشد.

نتیجه‌گیری: فیلم سلولزی تولید شده از باگاس نیشکر گزینه‌ای پایدار و دوست‌دار محیط زیست برای جایگزینی با فیلم‌های پلیمری نفتی در کاربردهای بسته‌بندی محسوب می‌شود. خواص مکانیکی و سد کنندگی متوسط آن، امکان استفاده در بسته‌بندی محصولات مختلف را فراهم می‌کند. برای بهبود عملکرد در برابر رطوبت، پوشش دهی یا ترکیب با نانو مواد پیشنهاد می‌شود. این تحقیق نشان داد که بهره‌برداری از پسماندهای کشاورزی می‌تواند نقش مؤثری در توسعه مواد بسته‌بندی پایدار و کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی ناشی از پلاستیک‌های سنتی داشته باشد.

واژه‌های کلیدی: فیلم سلولزی، باگاس نیشکر، خمیر رنگ بری شده با هیپوکلریت، بسته‌بندی.

مقدمه

امروزه ضایعات پلاستیکی در همه جا دیده می‌شوند و اگر طبق روند فعلی تولید شوند تا سال ۲۰۵۰ میلادی، ۱۲ میلیارد متریک تن از آن روی کره زمین انباشته می‌شود [۱]. پلاستیک نه تنها یک بحران آلودگی ایجاد کرده است، بلکه، آن‌ها از نفت و مواد تجدید ناپذیر ساخته شده‌اند. از این‌رو، تحقیقات زیادی برای جایگزینی انواع پلاستیک با مواد دوستدار محیط‌زیست و تجدید پذیر در حال انجام است. سلولز را می‌توان به‌عنوان فراوان‌ترین پلیمر طبیعی و تجدید پذیر بهترین انتخاب دانست [۲،۳].

یکی از منابع فراوان و ارزان سلولز، تفاله نیشکر یا باگاس است که تولید سالانه آن در جهان بیش از ۷۰۰ میلیون تن می‌باشد. باگاس تاکنون به‌عنوان ماده اولیه برای ساخت انواع کاغذ و محصولات لایه‌ای مورد استفاده قرار گرفته است. در استان خوزستان تعدادی کارخانه تولید کاغذ، دستمال کاغذی، امدی‌اف و تخته خرده چوب از باگاس در حال بهره‌برداری هستند؛ اما همچنان سالانه بیش از دو میلیون تن مازاد باگاس وجود دارد که می‌تواند برای تولید انواع محصولات سلولزی مورد استفاده قرار گیرد [۴].

یکی از محصولات قابل تولید از باگاس، فیلم سلولزی است که جایگزین پلاستیک می‌باشد. فیلم سلولزی به روش‌های مختلفی ساخته می‌شود؛ اما تنها روش زانتاسیون تولید سلفون به تولید صنعتی رسیده است که این روش ساخت فیلم سلولزی گازه‌ای سمی تولید می‌کند، بنابراین کارخانه‌های آن طی دو دهه گذشته کاهش یافته است [۲،۳]. برای ساختن فیلم سلولزی، ابتدا باید سلولز را حل کرد و سپس به‌صورت فیلم بازسازی نمود. اخیراً با واکنش کربوکسیلاسیون ملایم خمیر کاغذ الیاف بلند، محلول قلیایی از سلولز حاوی نانوکریستال تهیه شده که با آن، تولید محصولات مقاوم یک، دو و سه‌بعدی مانند نخ، فیلم، نی و لیوان برای جایگزینی با انواع محصولات پلاستیکی گزارش شده است. از آنجایی که باگاس به‌عنوان یک گیاه غیرچوبی، آسان‌تر از خمیر کاغذ الیاف بلند لیگنین‌زدایی می‌شود و حاوی هولوسلولز بیشتر و لیگنین کمتری است، جایگزین مناسبی برای تولید فیلم سلولزی در کشورهای تولیدکننده باگاس محسوب می‌شود [۵-۷].

در پژوهش‌های متعددی در سطح جهان تلاش شده است تا از منابع مختلف لیگنوسلولزی برای تولید فیلم‌های سلولزی استفاده شود. Ghaderi و همکاران (۲۰۱۳) در پژوهشی با عنوان فیلم نانو کامپوزیتی تمام سلولزی ساخته شده از نانو الیاف سلولز باگاس برای کاربرد بسته‌بندی مواد غذایی پرداخته‌اند. نانو کامپوزیت تمام سلولزی به‌طور رضایت‌بخشی با روش انحلال جزئی یا انتخاب سطحی از نانو الیاف باگاس نیشکر تولید شد. این مطالعه نشان داد که از ضایعات کشاورزی بسیار کم‌ارزش می‌توان به نانو کامپوزیت با کارایی زیاد (استحکام کششی: ۱۴۰ مگاپاسکال) دست‌یافت [۸]. Pimenta و همکاران (۲۰۲۱) در پژوهشی به ارزیابی اثرات ترکیب شیمیایی و تیمارهای تصفیه بر خواص لایه‌های سلولزی نانوفیبریل شده از باگاس نیشکر، پرداخته‌اند. در این تحقیق، اثرات ترکیب شیمیایی و درجه فیبریلاسیون خمیر باگاس نیشکر بر روی خواص فیلم‌های سلولز نانوفیبریل شده (NFC) مورد بررسی قرار گرفت. ترکیبی از تصفیه مکانیکی و تیمار آنزیمی برای تولید نانوفیبریل‌های همگن از باگاس نیشکر موفقیت‌آمیز بود. با توجه به آزمون‌های انجام شده بر روی تمام نسبت‌های ترکیبی مناسب‌ترین ترکیب برای بسته‌بندی مواد غذایی بیوپلاستیکی ترکیب ۷۵ درصد سلولز و ۲۵ درصد فیبر بیوپلاستیک است که کمترین درصد جذب آب و نفوذپذیری بخار آب را نشان داده است [۹]. Moradian و همکاران (۲۰۲۱) در پژوهشی به تأثیر چگالی بار کربوکسیل بر خواص اکسترود شده فیلم‌های سلولزی پرداخته‌اند. اثر چگالی بار کربوکسیل مختلف (۰/۹، ۱/۵ و ۲/۵ میلی‌مول بر گرم) بر روی چندین ویژگی لایه‌ها مورد بررسی قرار گرفت. مشخص شد که شفاف‌ترین، کشش پذیرترین، جاذب‌ترین و متراکم‌ترین لایه‌ها با چگالی بار ۲/۵ میلی‌مول بر گرم تولید می‌شوند. ایشان در تحقیق دیگری در خصوص فیلم‌های سلولز بازسازی شده نامحلول ساخته شده از خمیرهای حل شونده کربوکسیله ملایم و کرافت انجام داده و مشخص شد که فیلم‌های خمیر کرافت، متراکم‌تر، قوی‌تر، شفاف‌تر و کریستالی‌تر بودن، سطح صاف‌تری داشتند و به دلیل مقدار همی سلولز زیادتر، نسبت به فیلم‌های خمیر حل شونده، جذب آب بیشتری داشتند [۱۰]. به‌طور کلی، کربوکسی‌متیلاسیون ملایم سلولز به‌عنوان یک روش با قابلیت صنعتی شدن برای ساخت

تهیه^۲ CMF و دوپ (ویسکوز)

برای تهیه CMF و دوپ، خمیر کاغذ به رطوبت ۲۸/۹ درصد رسانده شد و در ادامه تحت شرایط جابجایی حلال قرار گرفت تا بخش عمده‌ای از آب آن حذف شود. برای پیشبرد واکنش شیمیایی از ایزوپروپیل الکل با خلوص ۹۹ درصد و حمام آب با دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد استفاده شد. سپس ۶ گرم هیدروکسید سدیم در ۱۰ گرم آب حل و به صورت قطره‌ای به ترکیب افزوده شد. این مخلوط به مدت یک ساعت تحت همزن مکانیکی نگهداری و پس از این زمان، دما به ۶۰ درجه سانتی‌گراد افزایش یافت و ۵ گرم کلرواستات سدیم در ۱۰ گرم آب حل و به مخلوط اضافه گردید. پس از گذشت ۲ ساعت، سوسپانسیون از طریق قیف بوختر صاف گردید. برای جلوگیری از تشکیل حباب در فرایند تولید فیلم، pH محلول از طریق اسید سولفوریک ۳۳ درصد در حد ۳/۵ تنظیم گردید. در مرحله نهایی، برای حذف نمک‌ها و املاح، سوسپانسیون دوباره با ۲۰۰ میلی‌لیتر اتانول ۶۰ درصد شستشو داده شد. CMF های حاصله را با ۱۰ گرم سود و ۹۰ گرم آب مقطر ترکیب کرده تا یک ماده‌ی ویسکوز به نام دوپ تولید شود (شکل ۱- سمت راست).

ساخت فیلم سلولزی

دوپ تولید شده به منظور حذف حباب‌های هوای ناشی از فرآیند مخلوط‌سازی به مدت ۴ دقیقه با سرعت ۲۰۰۰ دور در دقیقه سانتریفیوژ شد. سپس حدود ۱۰ گرم از این دوپ بر روی قالب ریخته و به طور یکنواخت پخش شد. سپس قالب در حمام اسیدی با غلظت ۱۰ درصد اسید سولفوریک قرار داده شد تا بازآرایی ساختاری سلولز به‌طور مؤثر انجام گیرد. فیلم سلولزی حاصله، یک دقیقه با آب شیر شستشو شده و سپس به مدت ۳۰ دقیقه در آب غوطه‌ور ماند تا فرآیند خنثی‌سازی به‌طور کامل انجام شود. در نهایت، به منظور جلوگیری از جمع‌شدگی و تغییر شکل فیلم در طی فرآیند خشک‌کردن، اقدامات لازم برای مهار فیلم انجام گردید (شکل ۱- سمت چپ).

فیلم‌های زیست‌تخریب‌پذیر، قابل بازیافت، نامحلول، شفاف و قوی که می‌تواند با سلفون و محصولات پلاستیکی مختلف مورد استفاده در بسته‌بندی رقابت کند، امیدوارکننده است. Yuanjian Shi و همکاران (۲۰۲۲) به پژوهشی با عنوان لایه‌های کامپوزیت باگاس سلولز/پلی‌وینیل الکل تقویت شده با اتصال عرضی هیدروکسیلی به‌عنوان بسته‌بندی زیست‌تخریب‌پذیر پرداخته‌اند. در این مطالعه، مجموعه‌ای از لایه‌های متقاطع کامپوزیتی مبتنی بر سلولز زیست‌تخریب‌پذیر از سلولز باگاس و PVA با اتصال عرضی هیدروکسیلی تهیه شد. نتایج FTIR تأیید کرد که ساختار شبکه‌ای در فیلم کامپوزیت با موفقیت ساخته شده است [۱۱]. با توجه به تمرکز اکثر تحقیقات اشاره شده بر تولید فیلم سلولزی به روش کربوکسی متیلاسیون ملایم پودر سلولز خشک، تحقیق حاضر با هدف تولید و ارزیابی فیلم‌های سلولزی از خمیر کاغذ تر باگاس طراحی شده است. بررسی ویژگی‌های فیزیکی، مکانیکی و شیمیایی فیلم‌های به‌دست‌آمده، می‌تواند راه‌گشای توسعه مواد بسته‌بندی پایدار و جایگزین پلاستیک‌های رایج در کشور باشد.

مواد و روش‌ها

مواد

در این تحقیق از خمیر کاغذ باگاس رنگبری شده با هیپوکلریت کارخانه کاغذ پارس هفت‌تپه خوزستان، درجه روشنی ۷۱ درصد، عدد کاپای ۲، درجه روانی^۱ CSF ۳۵۰ و رطوبت ۷۸/۵ درصد استفاده شد. ابتدا شن زدایی و بر روی مش ۲۰۰، آگیری انجام شده و رطوبت خمیر کاغذ به ۲۸/۹ درصد رسانده شد و برای جلوگیری از تغییرات رطوبتی در زیپ کیپ قرار داده و در یخچال نگهداری شد. برای انجام کلیه آزمایش‌های و تولید فیلم سلولزی از محصولات شرکت مرک آلمان استفاده شد و کلیه نمونه‌ها و آزمون‌ها با ۵ تکرار انجام شد.

² -Carboxy Methyl Cellulose

¹ -Canadian Standard of Freness



شکل ۱- قالب‌ریزی دوپ جهت تهیه فیلم (سمت راست) - فیلم سلولزی تولید شده (سمت چپ)

است که مستقیماً با کیفیت مصرف‌کننده و قابلیت اطمینان بسته‌بندی مرتبط است [۱۲]. مقاومت کششی فیلم سلولزی باگاس برابر با ۶۴ MPa و مدول یانگ GPa ۲/۸ به دست آمد. مقاومت کششی مورد قبول برای فیلم‌های بازتولید شده سلولزی برای کاربردهای بسته‌بندی تجاری در بازه ۱۰ تا ۱۰۰ MPa می‌باشد که مقاومت کششی فیلم تولید شده از این نظر قابل قبول است. Li و همکاران (۲۰۲۰)، نشان دادند که درجه پلیمریزاسیون سلولز نقش حیاتی در ایجاد فیلم‌های فوق قوی نانو سلولز دارد و مقاومت کششی این فیلم‌ها می‌تواند به ۳۵۰ MPa برسد. کاربرد فیلم‌های با مقاومت کششی مناسب برای ساخت کیسه‌های حمل، بسته‌بندی محصولات سنگین، برچسب‌های چسبنده و کاربردهای بسته‌بندی که نیاز به تحمل کشش دارند، مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱۳].

مدول یانگ

مدول یانگ نشان‌دهنده سفتی فیلم و مقاومت در برابر تغییر شکل است که برای کاربردهای بسته‌بندی که نیاز به حفظ شکل، ایستادگی و مقاومت در برابر خمیدگی دارند ضروری است. Wang و همکاران (۲۰۲۲)، گزارش کردند که کامپوزیت‌های نانو فیبر سلولزی تقویت شده می‌توانند مدول یانگ بالای ۱۲ GPa داشته باشند. در این تحقیق، مدول یانگ ۸/۲ GPa به دست آمد که در محدوده متوسط برای فیلم‌های سلولزی قرار دارد و می‌تواند برای کاربردهای نیمه سخت مانند ظروف غذایی یک‌بار مصرف، جعبه‌های سخت و کاربردهای ساختاری که نیاز به حفظ شکل دارند مناسب باشد [۱۴]. Chen و همکاران (۲۰۱۱)، نشان دادند که نانو فیبرهای سلولزی جداسازی شده از چوب با استفاده از تکنیک فراصوت شدید می‌توانند خواص مکانیکی بهتری داشته باشند

آنالیز فیزیکی، نوری و مقاومتی فیلم سلولزی

اندازه‌گیری درصد فیبرهای حل نشده دوپ پس از واکنش کربوکسی متیلاسیون و جهت تعیین درجه استخلاف گروه کربوکسیل با هیدروکسیل با استفاده از روش‌های ترکیبی مورد استفاده در تحقیقات پیشین و شاخص مقاومت کششی خشک مطابق با استاندارد TAPPI به شماره T494 om-01 تعیین گردید. به منظور تعیین میزان آب‌گریزی و آب‌دوستی فیلم، زاویه تماس قطره با استفاده از دستگاه قطره گذاری (مدل - JIKAN 20CAG) اندازه‌گیری شد و تصاویر حاصل از این فرآیند با استفاده از نرم‌افزارهای تخصصی پردازش تصویر، تحلیل‌شده و زوایای مربوطه محاسبه شد. به منظور افزایش دقت نتایج، هر نمونه سه بار آزمایش شد و میانگین داده‌ها به عنوان نتیجه نهایی ارائه شد. اندازه‌گیری جذب بخار آب بر اساس استاندارد ASTM D5229 انجام شد. اندازه‌گیری عبور بخار آب طبق استاندارد TAPPI به شماره ASTM-E96/E96-05 انجام شد. میزان عبور گاز اکسیژن و گاز دی‌اکسید کربن طبق استاندارد ASTM D1434-82 با دستگاه عبور گاز، اندازه‌گیری شد. سنجش UV-VIS نمونه فیلم‌ها توسط دستگاه Biochrom Libra S22 در طول موج صفر تا ۸۰۰ نانومتر برای تمام نمونه‌ها انجام شد.

نتایج و بحث

خواص مکانیکی فیلم سلولزی

مقاومت کششی

مقاومت کششی پارامتر کلیدی برای تعیین قابلیت فیلم در تحمل تنش‌های مکانیکی در طول فرآیند بسته‌بندی، حمل و نقل، دست‌کاری و باز کردن بسته

³- ultraviolet visible spectrometer

بسته‌بندی مواد غذایی، کنترل رطوبت برای جلوگیری از رشد میکروارگانیسم‌ها، کپک‌زدگی، نرم شدن محصولات ترد، تبلور شکر و حفظ بافت ضروری است [۱۹]. در این تحقیق، میزان عبور بخار آب برابر با $248 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}$ اندازه‌گیری شد که به‌عنوان یک پارامتر منفی (ضعف فیلم)، نسبتاً بالا است. با توجه به ضخامت ۷۶ میکرومتری فیلم، این مقدار نیازمند بهبود برای کاربردهای حساس به رطوبت می‌باشد. Stenius و همکاران (۲۰۰۹)، گزارش کردند که فیلم‌های MFC دارای میزان عبور بخار آب در محدوده ۲۰۰ تا $600 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}$ بسته به ضخامت و شرایط آماده‌سازی هستند [۲۰]. این مقدار از میزان عبور بخار آب، نسبت به استانداردهای بسته‌بندی مواد غذایی حساس بالا است. همچنین آن‌ها در مطالعه بر روی فیلم‌های ویسکرها و میکروفیبریل‌های سلولز نشان دادند که رفتار جذب آب و خواص سد کنندگی گاز به‌شدت به ساختار و درجه کریستالیت‌ها وابسته است. ایشان تأکید کردند که خواص سد کنندگی فیلم‌های سلولزی می‌تواند با کنترل شرایط فرآوری بهبود یابد. استفاده از عوامل آب‌گریز، پوشش‌های لیپیدی یا ترکیب با پلیمرهای دوست‌دار محیط زیست، می‌تواند میزان عبور بخار آب را کاهش دهد [۲۱].

اثر رطوبت و درجه جانشینی

درجه جانشینی تعیین‌کننده تعادل بین آب‌دوستی و آب‌گریزی فیلم است که مستقیماً بر جذب رطوبت، خواص مکانیکی در شرایط مرطوب و پایداری ابعادی تأثیر می‌گذارد [۱۶]. در این تحقیق میزان درجه جانشینی معادل ۱/۴ به دست آمد که موجب افزایش آب‌دوستی فیلم و جذب رطوبت تا ۷/۷ درصد شد که با مطالعات مشابه همسو است و تأثیر مستقیم بر خواص مکانیکی و سد کنندگی فیلم دارد. Moon و همکاران (۲۰۱۱)، گزارش کردند که جذب رطوبت فیلم‌های نانو سلولز بسته به شرایط محیطی، معمولاً در محدوده ۶ تا ۱۵ درصد قرار دارد. از این منظر، فیلم حاصل از این تحقیق، دارای میزان جذب رطوبت در محدوده مقبول بوده و با یافته‌های این تحقیق، مطابقت دارد [۲۲]. کنترل دقیق‌تر درجه جانشینی و استفاده از عوامل ضد رطوبت می‌تواند این خاصیت را بهبود بخشد.

[۱۵]. Li و همکاران (۲۰۲۰)، تأکید کردند که کنترل درجه پلیمریزاسیون سلولز کلید دستیابی به فیلم‌های فوق قوی است. بهینه‌سازی شرایط فرآوری و خلوص مواد اولیه می‌تواند خواص مکانیکی را به‌طور قابل توجهی بهبود بخشد [۱۶].

نفوذپذیری گاز و بخار (CO_2 , O_2)

نفوذپذیری CO_2 پارامتر حیاتی برای بسته‌بندی نوشابه‌های گازدار و محصولات تخمیری است که حفظ کربناته بودن و طعم اصیل محصول وابسته به کنترل انتقال CO_2 است [۱۶]. نفوذپذیری اکسیژن مستقیماً با کیفیت، ماندگاری، حفظ رنگ، طعم، عطر و ارزش تغذیه‌ای مواد غذایی مرتبط است. اکسیژن باعث اکسیداسیون چربی‌ها، تغییر رنگ و فساد میکروبی می‌شود [۱۶]. در این تحقیق، نتایج حاصل از اندازه‌گیری نفوذپذیری CO_2 و O_2 به ترتیب برابر با ۰/۰۵ و ۰/۴ Barrer به دست آمد. با توجه به ضخامت فیلم ۷۶ میکرونی در این تحقیق، این مقادیر نشان‌دهنده عملکرد سد کنندگی مناسب فیلم است. Vivod و همکاران (۲۰۲۰) (et al. 2020)، گزارش کردند که فیلم‌های شفاف نانو فیبر سلولزی دارای نفوذپذیری اکسیژن بسیار پایین ($\text{cm}^3 \mu\text{m}$) مقدار CO_2 $0.043 \text{ m}^{-2} \text{ day}^{-1} \text{ kPa}^{-1}$ هستند [۱۷]. معادل Barrer ۰/۰۵ به دست آمده در این تحقیق، می‌تواند برای بسته‌بندی بطری‌های نوشابه، بسته‌بندی قهوه تازه و محصولات تخمیری مناسب باشد و مقدار O_2 معادل Barrer ۰/۴ به دست آمده، می‌تواند برای بسته‌بندی آجیل، خشکبار، اسنک‌های روغنی، گوشت فرآوری شده و محصولات حساس به اکسیداسیون مناسب باشد، اما برای محصولات بسیار حساس نیاز به بهبود دارد. بر اساس تحقیقات Zhang و همکاران (۲۰۲۵)، می‌توان از پوشش دهی سطحی با پلی‌اوراتان استفاده کرد. با توجه به مقادیر به دست آمده و در صورت پوشش دهی فیلم باگاس، می‌توان از آن برای کاربردهای بسته‌بندی حساس به گاز استفاده کرد [۱۸].

میزان عبور بخار آب (WVP)

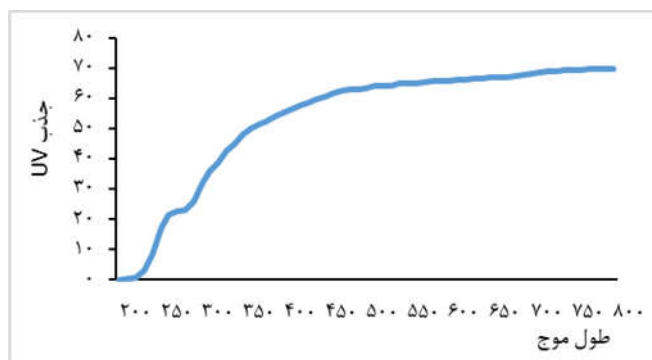
عبور بخار آب شاخص کلیدی برای ارزیابی قابلیت محافظت فیلم در برابر انتقال رطوبت است. در صنعت

یکنواختی فیلم (الیاف حل نشده)

میزان الیاف حل نشده مستقیماً با یکنواختی فیلم، شفافیت، خواص مکانیکی و کیفیت ظاهری مرتبط است. این پارامتر شاخص کیفیت فرآیند تولید و خلوص مواد اولیه است [۱۷]. در محلول دوپ این تحقیق، مقدار ۰/۵ درصد الیاف حل نشده اندازه‌گیری شده که نشان‌دهنده یکنواختی بالا و کیفیت مناسب فرآیند تولید است که با استانداردهای صنعتی مطابقت دارد. Moon و همکاران (۲۰۱۱) در مطالعه مروری خود تأکید کردند که میزان الیاف حل نشده مستقیماً بر کیفیت و خواص نهایی نانو مواد سلولزی تأثیر می‌گذارد. با وجود ۰/۵ درصد الیاف حل نشده در فیلم تولید شده، می‌توان کاربردهای نوری و بسته‌بندی محصولات مرغوب که نیاز به ظاهر یکنواخت دارند، متصور بود [۲۳]؛ بنابراین این میزان نشان از نتیجه مطلوب (کیفیت بالای خمیر و بهینه بودن فرآیند انحلال) داشته، زیرا Chen و همکاران (۲۰۱۱)، نشان دادند که فرآیند جداسازی مناسب نانو فیبرهای سلولز موجب یکنواختی بهتر و کاهش الیاف حل نشده می‌شود [۱۵]. Huber و همکاران (۲۰۱۱)، گزارش کردند که مقادیر الیاف حل نشده بیش از حد استاندارد (بالای یک درصد)، باعث تشکیل نقاط ضعف موضعی، کاهش شفافیت و مقاومت مکانیکی می‌شود [۲۲]. Moradian و همکاران (۲۰۲۱)، سلولز حل نشده در دوپ ساخته شده از خمیر کاغذ کرافت کربوکسیلی شده (۱/۳ mmol/g) را به میزان ۶/۵ درصد اندازه‌گیری کردند اما مقاومت کششی فیلم ساخته شده از آن برابر ۸۱MPa به دست آمد [۲۱].

طیف‌سنجی UV-Vis فیلم سلولزی

طیف‌سنجی UV-Vis مستقیماً با شفافیت فیلم، قابلیت مشاهده محصول، جذابیت بصری و کیفیت ظاهری بسته‌بندی مرتبط است. این پارامتر شاخص کیفی برای خواص نوری و عملکرد فیلم در کاربردهای بسته‌بندی محصولات تازه است [۱۸]. در این تحقیق، مقدار ۷۶ درصد عبور نور در طول موج ۵۵۰ تا ۷۰۰ نانومتر (شکل ۲)، نشان‌دهنده شفافیت قابل قبول و یکنواختی ساختاری مناسب فیلم است که با استانداردهای صنعتی مطابقت دارد. Jali و همکاران (۲۰۲۲) در مطالعه مروری خود تأکید کردند که شفافیت مستقیماً بر کیفیت و قابلیت کاربرد نهایی فیلم‌های ترکیبی سلولز تأثیر می‌گذارد [۲۳]. با وجود ۷۶ درصد عبور نور در این فیلم‌ها، می‌توان کاربردهای بسته‌بندی شفاف محصولات غذایی، لبنیات، کاربردهای الکترونیک انعطاف‌پذیر (نیازمند مشاهده محتویات و حفاظت UV)، متصور بود؛ بنابراین این میزان نشان از نتیجه مطلوب (کیفیت بهینه فرآیند رنگ‌بری و حذف مؤثر مواد رنگ‌زا) داشته، زیرا Dong و همکاران (۲۰۲۱)، نشان دادند که فرآیند تولید مناسب نانو سلولز موجب شفافیت بهتر و خواص نوری مطلوب می‌شود [۲۴]. Guzmán-Puyol و همکاران (۲۰۲۴)، گزارش کردند که مقادیر عبور نور پایین‌تر از حد استاندارد (کمتر از ۷۰ درصد)، باعث کاهش جذابیت بصری، محدودیت کاربرد و عدم انطباق با نیازهای صنایع بسته‌بندی و اپتوالکترونیک می‌شود [۲۵].



شکل ۲- آنالیز طیف‌سنجی مرئی - فرابنفش (UV-Vis) بر روی فیلم سلولزی

مقاومت رطوبت و قابلیت پردازش)، متصور بود. این میزان زاویه قطره، نشان از نتیجه مطلوب (کیفیت بهینه سطح و تطابق با نیازهای صنعتی) داشته، زیرا Moon و همکاران (۲۰۱۱)، نشان دادند که کنترل مناسب زاویه تماس موجب بهبود خواص عملکردی و قابلیت کاربرد فیلم‌های نانو سلولز می‌شود [۱۶]. Ghasemlou و همکاران (۲۰۲۱)، گزارش کردند که زاویه‌های تماس خارج از محدوده استاندارد (کمتر از ۶۰ یا بیشتر از ۹۰ درجه)، باعث کاهش کیفیت چاپ، مشکلات چسبندگی و عدم انطباق با استانداردهای تجاری می‌شود [۲۶].

زاویه تماس قطره

زاویه تماس آب با فیلم (زاویه قطره)، مستقیماً با آب‌دوستی سطح، قابلیت چاپ، مقاومت به رطوبت و عملکرد بسته‌بندی فیلم مرتبط است. این پارامتر شاخص کیفیت سطح و تعادل بین خصوصیات آب‌دوستی طبیعی سلولز و مقاومت عملکردی است [۲۶]. مقدار ۷۵/۸ درجه زاویه تماس آب (شکل ۳) در این تحقیق، نشان‌دهنده خصوصیات آب‌دوستی متوسط و کیفیت مناسب سطح فیلم است که با استانداردهای صنعتی مطابقت دارد و می‌توان کاربردهای بسته‌بندی محصولات نیمه‌خشک، چاپ آفست و فلکسوگرافی (نیاز به تعادل مطلوب بین



شکل ۳- زاویه قطره فیلم سلولزی

نانو کامپوزیت تقویت‌شده با ویسکرها سلولزی توانستند استحکام کششی تا ۱۵۷ مگاپاسکال و مدول ۵ گیگاپاسکال داشته باشند [۳۰] که ظرفیت بالای سلولز را در رقابت با پلیمرهای مصنوعی آشکار می‌سازد. در این راستا، نتایج تحقیق حاضر که بر پایه تولید فیلم سلولزی از خمیر رنگبری شده هیپوکلریت باگاس هفت‌تپه طراحی شده است، نشان داد که فیلم‌های حاصل دارای مقاومت کششی ۶۴ مگاپاسکال، مدول ۲/۸ یانگ گیگاپاسکال و ضخامت ۷۶ میکرومتر هستند. این مقادیر در محدوده گزارش شده برای فیلم‌های سلولزی بازسازی شده قرار دارند و از نظر مکانیکی با فیلم‌های تجاری سلفون (۲۰-۱۰۰ مگاپاسکال) و لیوسل (۵۰-۳۰۰ مگاپاسکال) قابل مقایسه‌اند. از منظر خواص سد کنندگی نیز نفوذپذیری CO_2 و O_2 به ترتیب ۰/۰۵ و ۰/۴ Barrer و میزان عبور بخار آب برابر با $24 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}$ اندازه‌گیری شد. این

نتیجه‌گیری

یافته‌های پژوهش حاضر در امتداد مطالعات گسترده بر روی فیلم‌های سلولزی بازسازی‌شده، جایگاه ویژه‌ای برای بهره‌گیری از منابع لیگنوسلولزی بومی در توسعه مواد بسته‌بندی پایدار ترسیم می‌کند. تحقیقات پیشین نشان داده‌اند که فیلم‌های سلولزی حاصل از حلال‌های دمای پایین مانند اوره / هیدروکسید سدیم و اوره / هیدروکسید لیتیوم و همچنین نانوکامپوزیت‌های تمام سلولزی، خواص مکانیکی و سد کنندگی چشمگیری دارند. برای نمونه، Zhang و همکارانش فیلم‌هایی با استحکام کششی حدود ۱۰۰ مگاپاسکال و عبور دهی نوری ۹۰ درصد تولید کردند که امکان تجزیه در خاک، طی یک ماه را دارند [۲۸]. Cai و همکارانش نیز نفوذپذیری اکسیژن در محدوده ۰/۰۳ تا ۰/۳۰ Barrer گزارش کردند که نشان‌دهنده قابلیت بالای این مواد در بسته‌بندی‌های حساس است [۲۹]. افزون بر این، فیلم‌های

- [7] Islam, M. S., Alam, M. N. and van de Ven, T. G. M., 2021. Production of textile filaments from carboxymethylated cellulosic pulps. *Cellulose*, 28, 9475–9488. DOI:10.1007/s10570-021-04073-5
- [8] Ghaderi, M., Mousavi, M., Yousefi, H. and Labbafi, M., 2014. All-cellulose nanocomposite film made from bagasse cellulose nanofibers for food packaging applications. *Carbohydrate Polymers*, 92(1), 254–259. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2014.01.013>
- [9] Pimenta, M. T. B., Curvelo, A. A. S. and Belgacem, N. M., 2016. Evaluation of the effects of chemical composition and refining treatments on the properties of nanofibrillated cellulose films from sugarcane bagasse. *Industrial Crops and Products*, 91, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.07.017>
- [10] Shi, Y., Zhang, Y., Liu, Y. and Chen, W., 2022. Crosslinked hydroxyl-reinforced sugarcane bagasse cellulose/PVA composite films for biodegradable packaging. *International Journal of Biological Macromolecules*, 213, 332–342. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.114381>
- [11] Azmin, S. N., Wahid, Z. A. and Ariffin, H., 2020. Development and characterization of bioplastic film from cocoa pod husk cellulose combined with sugarcane bagasse fiber for food packaging. *Journal of Polymers and the Environment*, 28(8), 2200–2212. <https://doi.org/10.1016/j.jobab.2020.10.003>
- [12] Li, T., Chen, C., Brozena, A. H., Zhu, J. Y., Xu, L., Driemeier, C., Dai, J., Rojas, O. J., Isogai, A., Wågberg, L. and Hu, L., 2021. Developing fibrillated cellulose as a sustainable technological material. *Nature*, 590(7844), 47–56. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-03167-7>
- [13] Wang, Z., Chen, W., Yu, H., Liu, Y. and others. 2022. A cellulose-based self-healing composite eutectogel with reversibility and recyclability for multi-sensing. *Composites Science and Technology*, 229, 109696. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2022.109696>
- [14] Chen, W., Yu, H. and Liu, Y., 2011. Individualization of cellulose nanofibers from wood using high-intensity ultrasonication combined with chemical pretreatments. *Carbohydrate Polymers* 83(4):1804–1811. DOI:10.1016/j.carbpol.2010.10.040
- [15] Xhi, Y., Zhang, Y., Liu, Y. and Chen, W., 2022. Hydroxyl crosslinking reinforced bagasse cellulose/polyvinyl alcohol composite films as biodegradable packaging. *Industrial Crops and Products* 176:114381. DOI:10.1016/j.indcrop.2021.114381
- [16] Moon, R. J., Martini, A., Nairn, J., Simonsen, J. and Youngblood, J., 2011. Cellulose nanomaterials review: Structure, properties and nanocomposites. *Chemical Society Reviews*, 40(7), 3941–3994. <https://doi.org/10.1039/C0CS00108B>
- [17] Vivod, V., Jancar, J., Kokol, V. and Gorgieva, S., 2021. Transparent oxygen barrier nanocellulose

نتایج نشان می‌دهند که فیلم‌های تولیدشده از باگاس عملکردی قابل قبول در برابر گازها داشته، هرچند کاهش عبور بخار آب برای کاربردهای حساس به رطوبت ضروری است.

به طور خاص، اهمیت این پژوهش در آن است که با بهره‌گیری از خمیرکاغذ تر باگاس به‌عنوان یک پسماند کشاورزی فراوان و کم‌هزینه، مسیر تازه‌ای برای تولید فیلم‌های سلولزی با هزینه و انرژی کمتر گشوده می‌شود. این رویکرد نه تنها هم‌راستا با مطالعات پیشین است، بلکه نوآوری آن در استفاده از منابع بومی و حذف مراحل پرهزینه تولید نانو فیبر سلولزی، مزیت‌های اقتصادی و زیست‌محیطی قابل توجهی را به همراه دارد. بدین ترتیب، فیلم‌های سلولزی حاصل از باگاس می‌توانند به‌عنوان جایگزینی کارآمد برای پلاستیک‌های نفت‌پایه در صنعت بسته‌بندی تجاری مطرح شوند و گامی مؤثر در تحقق اهداف توسعه پایدار و اقتصاد چرخشی باشند.

منابع

- [1] Geyer, R., Jambeck, J. R. and Law, K. L., 2017. Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances*, 3(7), e1700782. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782>
- [2] Dasgupta, D., Suman, S. K., Pandey, D., Ghosh, D., Khan, R., Agrawal, D., Jain, R. K., Vadde, V. T. and Adhikari, D. K., 2013. Design and optimization of ethanol production from bagasse pith hydrolysate by a thermotolerant yeast *Kluyveromyces sp. IPE453* using response surface methodology. *SpringerPlus*, 2, 159. <https://doi.org/10.1186/2193-1801-2-159>
- [3] Woodings, C., 2001. A brief history of regenerated cellulosic fibers. In *Regenerated Cellulose Fibres* (pp. 1–21). <https://doi.org/10.1533/9781855737587>
- [4] Jiang, X., Bai, Y., Chen, X. and Liu, W., 2020. A review on raw materials, commercial production and properties of lyocell fiber. *Journal of Bioresources and Bioproducts*, 5(1), 16–25. <https://doi.org/10.1016/j.jobab.2020.03.002>
- [5] Moradian, M., Islam, M. S. and van de Ven, T. G. M., 2021. Insoluble regenerated cellulose films made from mildly carboxylated dissolving and kraft pulps. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 60(15), 5385–5393. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.0c05730>
- [6] Moradian, M., Alam, M. N. and van de Ven, T. G. M., 2021. Influence of carboxyl charge density on properties of extruded cellulose films. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 60(38), 13756–13763. <https://DOI:10.1021/acs.iecr.1c01716>

- properties of transparent regenerated cellulose films via esterification with folic acid. *Cellulose*, <https://doi.org/10.1007/s10570-025-06855-7>
- [25] Guzmán-Puyol, S., Benítez, J. J. and Heredia-Guerrero, J. A., 2022. Transparency of polymeric food packaging materials. *Food Research International*, 161, 111792. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.111792>
- [26] Klemm, D., Heublein, B., Fink, H. P. and Bohn, A., 2005. Cellulose: Fascinating biopolymer and sustainable raw material. *Angewandte Chemie International Edition*, 44(22), 3358–3393. <https://doi.org/10.1002/anie.200460587>
- [27] Ghasemlou, M., Daver, F. and Ivanova, E. P., 2021. Surface modifications of nanocellulose: From synthesis to high-performance nanocomposites. *Progress in Polymer Science*, 119, 101418. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2021.101418>
- [28] Qi, H., Chang, C. and Zhang, L., 2009. Properties and applications of biodegradable transparent and photoluminescent cellulose films prepared via a green process. *Green Chem*, 11:177–84. <https://doi.org/10.1039/B814721C>
- [29] Qi, H., Cai, J., Zhang, L. and Kuga, S., 2009. Properties of films composed of cellulose nanowhiskers and a cellulose matrix regenerated from alkali/urea solution. *Biomacromolecules*, 10:1597–602. DOI: 10.1021/bm9001975
- [30] Yang, Q., Fukuzumi, H., Saito, T., Isogai, A. and Zhang, L., 2011. Transparent cellulose films with high gas barrier properties fabricated from aqueous alkali/urea solutions. *Biomacromolecules*, 12:2766–71. DOI: 10.1021/bm200766v
- composite films with a sandwich structure. *Carbohydrate Polymers*, 27(4), 2343–2355. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2021.118206>
- [18] Zhang, Y., Xia, J., Liu, W., Li, Y. and Chen, H., 2025. Improving gas barrier properties of cellulose-based films by polyurethane surface coating. *Polymers*, 14(3), 480; <https://doi.org/10.3390/polym14030480>
- [19] Moradian, M. H., Alam, M. N., Islam, M. S. and van de Ven, T. G. M., 2021. Regenerated insoluble cellulose films from mildly carboxylated and kraft dissolving pulps. *Carbohydrate Polymers*, 267, 118208. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.1c00485>
- [20] Stenius, P., Syverud, K. and Chinga-Carrasco, G., 2009. Barrier and moisture properties of cellulose whisker films. *Cellulose*, 16(6), 1033–1045. <https://doi.org/10.1007/s10570-008-9244-2>
- [21] Moradian, M. H., Alam, M. N., Islam, M. S. and van de Ven, T. G. M., 2021. Regenerated insoluble cellulose films from mildly carboxylated and kraft dissolving pulps. *Carbohydrate Polymers*, 267, 118208. DOI:10.1021/acs.iecr.1c00485
- [22] Huber, T., Müssig, J., Curnow, O., Pang, S., Bickerton, S. and Staiger, M. P., 2011. Flexural and impact properties of all-cellulose composite laminates. *Journal of Applied Polymer Science*, 121(4), 2312–2321. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2013.08.040>
- [23] Jali, S., Mohan, T. P., Mwangi, F. M. and Kanny, K., 2024. A review on barrier properties of cellulose/clay nanocomposite polymers for packaging applications. *Polymers*, 16 (1), 51. <https://doi.org/10.3390/polym16010051>
- [24] Dong, X., Ci, Y., Li, Y., Wang, L., Wang, J. and Tang, Y., 2025. Enhancing the UV shielding