Research Article

Iranian Journal of Wood and Paper Industries
Vol. 16, No. 1, Page 29 - 42 (2025)

DOI: 10.22034/ijwp.2024.2042838.1684

Addition and retention of cellulose nanofibers to wet paper web without retention aids and dewatering reduction

Mohammadhadi Moradian[1*], Mozhgan Fathi Imanloo[2], Pejman Rezayati Charani[3]

1- Corresponding author, Assistant Prof., Department of Cellulose Technology Engineering, Natural Resources Faculty, Behbahan Khatam Alanbia University of Technology, Behbahan, Iran. Email: moradian@bkatu.ac.ir
2- Graduated Master of pulp and paper technology, Department of cellulose technology engineering, natural resources faculty, Behbahan Khatam Alanbia university of technology, Behbahan
3- Assistant Prof., Department of Cellulose Technology Engineering, Natural Resources Faculty, Behbahan Khatam Alanbia University of Technology, Behbahan, Iran

Received: October 2024 Accepted: December 2024

Abstract

Problem definition and objectives: Cellulose nanofibers (CNF) have primarily been utilized in papermaking to enhance both the dry and wet strengths of paper. This is achieved by adding CNF to the pulp suspension along with a retention aid, as well as by applying it as a coating in the dry end of the paper machine to improve barrier properties. However, incorporating CNF into the pulp can lead to challenges such as reduced dewatering speed, decreased production rates, partial loss of nanoparticles from the paper machine wire, adhesion to equipment, and increased drying energy consumption. This research investigates the addition of CNF to both the surface and middle layers of the wet paper web at varying pulp consistencies to address these issues.

Methodology: Initially, 2% CNF was added to a bagasse pulp suspension, and the drainage time, along with the rate of CNF exit from the papermaking wire, was assessed at different temperatures (5, 15, 25, 35, and 45 degrees Celsius). Subsequently, the feasibility of adding CNF to the surface of the wet paper web and between two layers of the web—without any retention aids—was examined at the laboratory level. For this purpose, 1% and 2% CNF were sprayed onto the surface of the web at four levels of web consistency (5%, 10%, 20%, and 35%) using a device manufactured in the university's pulp and paper laboratory. The goal was to produce papers with a final grammage of 80 ± 2 g/m². During the spraying process, some CNFs adhered to laboratory blotter papers, raising concerns that similar sticking could occur in industrial settings with felt press or drying cylinders. To mitigate this issue, spraying 1% and 2% CNF between two web layers (each with a grammage of 40 ± 1 g/m²) at a consistency of 20% was performed. During the spraying phase, the vacuum was applied for two minutes from beneath the laboratory paper-making mesh for all treatments, ensuring complete CNF retention.

Results: The findings indicated that as temperature increased from 5 to 45 degrees Celsius, drainage time decreased by 30%, while CNF exit from the papermaking wire rose from 20% to 41%. Overall, the addition of cellulose nanofibers reduced paper thickness, and scanning electron microscopy (SEM) images confirmed enhanced bonding between fiber layers and greater

compressibility in multilayer paper. However, higher web consistencies resulted in decreased CNF penetration into the thickness of the paper, leading to less impact on the fibers in lower layers and, consequently, less reduction in final paper thickness. Treatments involving spraying CNF on the surface and middle of the pulp web yielded greater tensile strength compared to adding the same amount of CNF directly to the pulp suspension. Nevertheless, no statistically significant difference was observed in the tear index in all treatments. Notably, spraying 2% CNF between two layers of the web at a 20% consistency produced the highest tensile index among all treatments.

Conclusion: The method of spraying cellulose nanofibers onto the surface of pulp webs with consistencies exceeding 10% can eliminate CNF loss without requiring additional retention aids and does not adversely affect drainage speed. Furthermore, adding CNF between two web layers at approximately 20% consistency ensures complete retention without compromising dewatering speed or production rates while preventing adhesion to papermaking equipment and enhancing mechanical properties. Therefore, this approach is suitable for industrial units capable of producing multilayer papers.

Keywords: Cellulose nanofibers (CNF), Coating, Wet paper web, Bagasse pulp, Paper tensile strength, Retention.

افزودن و نگهداری نانو الیاف سلولز به نمد تر کاغذ بدون کمک نگهدارنده و کاهش سرعت آب‌گیری

محمدهادی مرادیان[۱*]، مژگان فتحی ایمانلو[۲]، پژمان رضایتی چرانی[۳]

۱- نویسنده مسئول، استادیار گروه جنگلداری و صنایع سلولزی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه صنعتی خاتم‌الانبیاء بهبهان، بهبهان، ایران. پست الکترونیک: Moradian@bkatu.ac.ir

۲- دانش‌آموخته مهندسی صنایع سلولزی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه صنعتی خاتم‌الانبیاء بهبهان، بهبهان، ایران.

۳- دانشیار گروه جنگلداری و صنایع سلولزی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه صنعتی خاتم‌الانبیاء بهبهان، بهبهان، ایران.

تاریخ دریافت: مهر ۱۴۰۳ تاریخ پذیرش: دی ۱۴۰۳

چکیده

بیان مساله و اهداف: نانو الیاف سلولز (CNF) در کاغذسازی بیشتر به‌عنوان عامل افزایش مقاومت خشک و تر کاغذ به روش افزودن به سوسپانسیون خمیرکاغذ همراه با کمک نگهدارنده و نیز به‌عنوان پوشش برای بهبود ویژگی‌های ممانعتی در پایانه خشک استفاده شده است. با این وجود افزودن نانو الیاف سلولز به خمیرکاغذ مشکلاتی از قبیل کاهش سرعت آب‌گیری و سرعت تولید، هدر رفت بخشی از نانو ذرات از زیر توری ماشین کاغذسازی، چسبندگی به تجهیزات و افزایش انرژی خشک‌کردن را در پی دارد. در این پژوهش افزودن نانو الیاف سلولز به سطح و لایه میانی نمد تر با درصد خشکی مختلف خمیرکاغذ برای غلبه بر این مشکلات بررسی‌شده است.

مواد و روشها: ابتدا ۲ درصد CNF به سوسپانسیون خمیرکاغذ باگاس اضافه شد و زمان آب‌گیری و میزان خروج CNF از توری کاغذسازی در دماهای مختلف (۵، ۱۵، ۲۵، ۳۵ و ۴۵ درجه سانتی‌گراد) مورد بررسی قرار گرفت. سپس امکان افزودن CNF به سطح نمد تر و همچنین به میان دو لایه نمد تر بدون کمک نگهدارنده در سطح آزمایشگاهی بررسی شد. بدین منظور ۱ و ۲ درصد CNF روی سطح نمد تر با ۴ سطح خشکی (۵، ۱۰، ۲۰ و ۳۵ درصد) توسط دستگاه ساخته شده در آزمایشگاه خمیر و کاغذ دانشگاه پاشیده شد تا کاغذهایی با گراماژ نهایی g/m^2 ۲±۸۰ به دست‌آید. روش پاشش CNF بر سطح نمد تر باعث چسبندگی بخشی از آن با کاغذ خشک‌کن آزمایشگاهی شد که در صورت به‌کارگیری در صنعت امکان چسبندگی CNF به فلت پرس یا سیلندرهای خشک‌کن وجود دارد؛ بنابراین پاشش ۱ و ۲ درصد CNF به وسط دو لایه نمد تر (هر یک با گراماژ g/m^2 ۱±۴۰) با خشکی ۲۰ درصد انجام تا این مشکل برطرف شد. در مرحله پاشش، خلأ به مدت ۲ دقیقه از زیر توری برای تمام تیمارها اعمال شد در عین حال ماندگاری CNF به‌طور کامل صورت گرفت.

نتایج: نتایج افزودن CNF به سوسپانسیون خمیرکاغذ نشان داد که با زیاد شدن دما از ۵ به ۴۵ درجه سانتی‌گراد زمان آب‌گیری ۳۰ درصد کاهش اما خروج CNF از توری کاغذسازی از ۲۰ به ۴۱ درصد افزایش می‌یابد. به‌طور کلی افزودن نانو الیاف سلولز موجب کاهش ضخامت کاغذها شد و تصاویر SEM اتصال بیشتر بین لایه‌های الیاف و فشردگی بیشتر کاغذ چندلایه را تأیید کرد. با این وجود هرچه درصد خشکی نمد تر بیشتر باشد نفوذ نانو الیاف سلولز در ضخامت آن کمتر شده و تأثیر کمتری بر الیاف لایه‌های زیرین و در نتیجه بر کاهش ضخامت کاغذ نهایی داشت. تیمارهای پاشش CNF به سطح و میان نمد نسبت به افزودن همان مقدار CNF به سوسپانسیون خمیرکاغذ مقاومت کششی بیشتری برای کاغذ ایجاد کرد؛ اما شاخص پارگی کلیه تیمارها از نظر آماری اختلاف معنی‌دار نداشت. همچنین تیمار پاشش ۲ درصد CNF بین دو لایه نمد با خشکی ۲۰ درصد، بیشترین مقدار شاخص کشش را در بین تمام تیمارها ایجاد کرد.

نتیجه‌گیری: روش پاشش نانو الیاف سلولز به سطح نمد تر با درصد خشکی بیش از ۱۰ درصد می‌تواند بدون کمک نگهدارنده، هدر رفت نانو الیاف سلولز را به صفر برساند و تأثیری نیز در سرعت آب‌گیری سوسپانسیون خمیرکاغذ ایجاد

نکند. همچنین افزودن نانو الیاف سلولز بین دو لایه نمد تر با خشکی حدود ۲۰ درصد باعث ماندگاری کامل آن بدون کاهش سرعت آب‌گیری و تولید و عدم چسبندگی با تجهیزات کاغذسازی باشد و ویژگی‌های مکانیکی کاغذ را بهبود دهد؛ بنابراین می‌تواند مورد بهره‌برداری واحدهای صنعتی با قابلیت تولید کاغذ چندلایه قرار گیرد.

واژه های کلیدی: نانو الیاف سلولز، پوشش‌دهی، نمد تر، خمیرکاغذ باگاس، مقاومت کششی کاغذ، ماندگاری.

مقدمه

محصولات کاغذ و مقوا در همه جای زندگی روزانه ما استفاده می‌شوند. گروه زیادی از کاغذها در سراسر جهان وجود دارند که برای هدف‌های مختلف مثل بسته‌بندی، چاپ و تحریر و انواع محصولات بهداشتی مصرف می‌شوند. برای پایداری رشد سودآور، صنعت کاغذ باید محصولات خود را با توسعه دادن تنوع آن‌ها بر اساس تکنولوژی برای کاربردهای با ارزش افزوده جدید و متناسب با محیط زیست بهبود دهد [۱]. در حال حاضر، استفاده از پلیمرهای مصنوعی عمدتاً بر پایه نفت تهدیدهای عمومی از قبیل گرم شدن کره زمین و تهدیدهای بومی چون آلودگی ناشی از پلاستیک ایجاد می‌کند. این موضوع سبب توجه ویژه به مواد تجدیدپذیر و زیست‌تخریب‌پذیر مانند سلولز شده است. سلولز فراوان‌ترین پلیمر طبیعی جهان محسوب می‌شود که قابلیت جایگزینی آن با پلیمرهای مصنوعی همواره مورد توجه تحقیقات و صنایع بوده است [۲]. نانو الیاف سلولز همچنین الیاف سلولز تبدیل شده به صورت رشته‌هایی با حداقل یک بعد کمتر از ۱۰۰ نانومتر است. این نانو ماده در سال ۱۹۸۳، با نام سلولز میکروفیبریله شده[۱] معرفی شده است [۳] که در کاغذسازی به‌عنوان یک مقاومت دهنده خشک و تر در بخش پایانه تر و به‌عنوان یک پوشش در بهبود ویژگی‌های ممانعتی در بخش پایانه خشک توجه زیادی را در صنعت کاغذسازی به خود جلب کرده است [۴]. با توجه به روش تولید، این نانو ماده استخراجی از منابع لیگنوسلولزی به دو دسته بزرگ نانو الیاف سلولز (CNF)[۲]و نانوکریستال سلولز (CNC)[۳]رده‌بندی می‌شود [۵]. نانو الیاف سلولز ابتدا به روش همگن‌سازی توسط توربک[۴] و اشنایدر[۵] تولید شد و به‌عنوان ماده‌ای شگفت‌انگیز برای آینده مواد - زیستی در نظر گرفته می‌شود [۶]. روش‌های مکانیکی گوناگونی نیز برای تولید نانو الیاف سلولز به کار برده شده است اما به دلیل مصرف انرژی زیاد، سود تجاری آن‌ها کم م؛ باشد [۷]. بنابراین تعدادی پیش‌تیمار شیمیایی یا آنزیمی برای کاهش نیاز به انرژی در محدوده یکسان برای تولید خمیر گرمایی-مکانیکی به‌وسیله پالایش با موفقیت اجرا شده است [۸]. در طول دو دهه گذشته علاقه به پژوهش در زمینه تولید، اصلاح و استفاده از نانوالیاف سلولز به دلیل دسترس‌پذیری، تجدید پذیری، زیست-تخریب‌پذیری، زیست سازگاری، ثبا ابعادی، سطح ژه وسیع، ضر لاغری بالا، و قابلیت استفاده در زمینه‌های مختلف گسترش یافته است [۹]. طی بررسی‌هایی توسط گروهی از محققان بیشترین فیت استفاده از و الیاف سلولز در صنعت کاغذ است [۱۰]. در کاغذسازی انو الیاف سلولز بیشتر به‌عنوان افزودنی استفاده می‌شود. با افزودن نانو الیاف سلولز معمولاً در بیشتر وی ی‌های کاغذ بهبو جاد می‌شود [۱۱]. البته اثرگذاری علاوه بر نوع و م نانو الیاف سلولز اضافه شده به نوع خمیرکاغذ مورد استفاده نیز وابسته عیین درصد استف نانو الیاف ز معمولاً بر اساس دست‌یابی اقتصادی به ویژگی‌های کاغذ نهایی انجام می‌شود [۱۲]. افرا و همکاران در سال ۲۰۱۶ مشاهده کردند که پوشش‌دهی نانوالیاف سلولز روی کاغذ موجب صافی سطح کاغذ، استحکام سطحی، افزایش مقاومت به کشش، سفتی و مقاومت به عبور هوا می‌شود [۱۳]. کومار[۶](۲۰۱۸) در پژوهشی پوشش‌دهی نانو الیاف سلولز را به روش غلتک به غلتک[۷]روی سطح کاغذ انجام داد و نتیجه پوشش‌دهی به‌طور قابل ملاحظه‌ای موجب بهبود ویژگی‌های ممانعتی (هوا، چربی و مواد معدنی روغنی و شیمیایی) و همچنین افزایش خواص کششی

[۱] Microfibrillated cellulose
[۲] Cellulose nanofiber
[۳] Cellulose nanocrystal
[۴] Turbak
[۵] Snyder
[۶] Kumar
[۷] Roll-to-roll

گردید [۱۴]. افزودن نانو الیاف سلولزی باعث افزایش مقاومت نمدتر کاغذ شده و تعداد پارگی کاغذ حین تولید کاهش می‌یابد. همچنین قابلیت پرس شدن کاغذ افزا ی-یابد و قابلیت عبور[8] بهبود پیدا می‌کند [۱۵]. با این وجود به دلیل ویسکوزیته و تنش تسلیم بسیار زیاد سوسپانسیون نانو الیاف سلولز، پوشش‌دهی آن روی کاغذ ساده نیست [۱۶]. همچنین با توجه به اینکه بعد از پوشش دادن سوسپانسیون نانو الیاف سلولز روی سطح کاغذ نیاز به خشک‌کردن مجدد کاغذ است و به دلیل قدرت جذب زیاد آب به‌وسیله نانو الیاف سلولز، انرژی زیادی برای خشک‌کردن کاغذ نیاز می‌باشد [۴].

یکی دیگر از مشکلاتی که با افزودن نانو الیاف سلولز به سوسپانسیون خمیرکاغذ هنگام کاغذسازی ایجاد می-شود افزایش زمان آب‌گیری است، اگر چه با به‌کارگیری کمک نگه‌دارنده‌ها تا حدی کنترل می‌شود. برای نمونه هی و همکاران (۲۰۱۶)، ۲/۵ درصد نانوالیاف سلولز به همراه کمک نگهدارنده (نشاسته کاتیونی) به سوسپانسیون خمیرکاغذ گرمایی- مکانیکی افزودند و زمان آب‌گیری ۵۰-۱۰ درصد طولانی شد [۱۲]. همچنین مرادیان و همکاران (۲۰۱۶) نانو الیاف سلولز را به‌تنهایی و نیز به همراه کمک نگه‌دارنده‌های نشاسته یا پلی اکریل آمید کاتیونی به خمیرکاغذ شیمیایی باگاس اضافه کردند و درنتیجه افت ۳۶ درصدی درجه روانی تا ۱۹ درصد جبران شد [۱۷]. چنانچه افزودن نانو الیاف سلولز روی نمد تر یا ورق کاغذ خشک صورت بگیرد مشکل آب‌گیری می‌تواند به‌طور کامل برطرف شود. با وجود این، قدرت نگهداری آب زیاد توسط نانو الیاف سلولز موجب می‌شود که انرژی و هزینه زیادی برای خشک‌کردن کاغذ پوشش داده شده با آن نیاز باشد. درصورت افزودن نانوسلولز به لایه میانی کاغذ، در اثر پدیده آب‌گیری تماسی[9]بخش زیادی از آب می‌تواند به صورت آنی از سوسپانسیون CNF جدا شود و در نتیجه انرژی مصرفی خشک‌کردن کاهش می‌یابد [۱۸]. رودی و همکاران (۲۰۱۸) نشان دادند با پاشش نانو الیاف سلولزی روی نمد تر کاغذ و ساخت کاغذ چند لایه از الیاف بازیافتی مشکل آب‌گیری برطرف شد همچنین مقاومت کششی کاغذ نهایی ۳۴ درصد افزایش پیدا کرد [۱۹].

هدف از این پژوهش بررسی امکان افزودن نانو الیاف سلولز به نمد تر برای اجتناب از بروز مشکلات ناشی از افزودن آن به سوسپانسیون خمیرکاغذ در بخش تر و انرژی مصرفی زیاد و سایر مشکلات هنگام پوشش‌دهی در بخش خشک بود. در این صورت فقط یک بار نیاز به خشک‌کردن کاغذ است و از طرفی نانو الیاف سلولز بدون کمک نگهدارنده و پیچیده شدن سیستم و بدون مشکل آب‌گیری در کاغذ می‌ماند و موجب افزایش ویژگی‌های استحکامی کاغذ می‌شود. در این پژوهش امکان افزودن CNF به میان دو لایه نمد تر نیز بررسی و با سایر تیمارها مقایسه شد. با توجه به مزیت‌های زیاد نانو الیاف سلولزی به عنوان افزودنی به خمیرکاغذ و تولید روزافزون آن، فائق آمدن بر مشکلاتی از قبیل کاهش سرعت آب‌گیری و سرعت تولید، هدر رفت بخشی از نانو ذرات از زیر توری ماشین کاغذسازی، چسبندگی به تجهیزات و افزایش انرژی خشک‌کردن بسیار حائز اهمیت و ضروری می‌باشد که در این تحقیق به آن پرداخته شده است.

مواد و روش‌ها

مواد

در این پژوهش خمیرکاغذ رنگبری شده باگاس از کارخانه کاغذ پارس واقع در ۱۵ کیلومتری شوش تهیه گردید. درجه روانی این خمیرکاغذ ml.CSF ۴۶۲، pH ۶/۶ و هدایت الکتریکی آن ۷۴۱µs/cm اندازه‌گیری شد. نانو الیاف سلولز تهیه شده به روش آسیاب مکانیکی از شرکت نانو نوین پلیمر مازندران به‌صورت ژل سفید رنگ و غلظت ۲/۶۲ درصد خریداری شد. از این نانوالیاف سلولز، محلول با خشکی ۰/۵ درصد تهیه شد و برای تیمار نمونه‌ها مورد استفاده قرار گرفت. محلول حاصل در یخچال با دمای تقریبی ۶ درجه سانتی‌گراد نگهداری شد.

روش‌ها

زمان آب‌گیری خمیرکاغذ از ستون دستگاه کاغذ-سازی[10]آزمایشگاهی با استفاده از زمان‌سنج با دقت صدم ثانیه در ۵ سطح دمای ۵، ۱۵، ۲۵، ۳۵ و ۴۵ درجه سانتی‌گراد با و بدون افزودن ۲ درصد نانو الیاف سلولز اندازه‌گیری شد. سطح آب در استوانه دستگاه کاغذسازی

[1] Runnability
[9] Contact dewatering
[10] Hand sheet maker

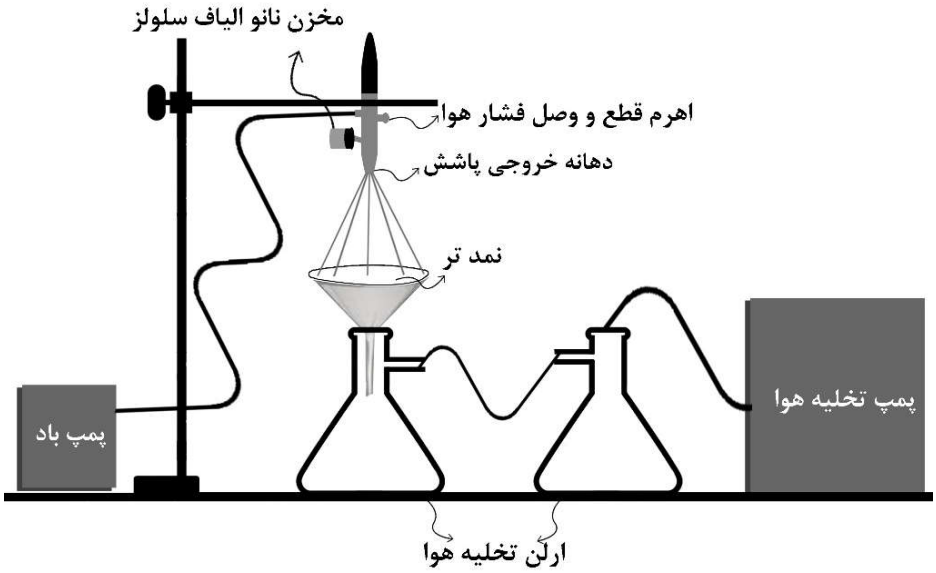
در همه تیمارها با دقت و به صورت یکسان تنظیم شد. کلیه کاغذها پس از ساخت به مدت ۲۴ ساعت هوا خشک و سپس متعادل‌سازی شدند و در نهایت با اندازه‌گیری وزن آن‌ها با دانستن مقدار وزنی نانو الیاف سلولز اضافه شده و وزن دقیق کاغذ بدون افزودنی، مقدار هدر رفت نانو الیاف سلولز با حداقل ۳ تکرار اندازه‌گیری شد.

برای ساخت کاغذ با گراماژ g/m^2 ۲±۸۰ طبق روش استاندارد تاپی[1]شماره T 205sp-02مراحل کار انجام شد [۲۰]. برای نمونه‌های حاوی ۱ و ۲ درصد نانو الیاف سلولز، به ترتیب ۱ و ۲ درصد الیاف کمتری استفاده شد تا نانو الیاف سلولز جایگزین الیاف شود. برای ساخت نمد تر با درصدهای خشکی متفاوت (۵، ۱۰، ۲۰، ۳۵) به‌منظور پاشش ۱ و ۲ درصد CNF به آن از چهار روش زیر استفاده شد که در نهایت نمدهای ساخته شده تر برای استفاده در مراحل بعد در کیسه زیپ‌دار پلاستیکی نگه‌داشته شد: ۱- برای ساخت نمد تر با خشکی ۵ درصد هنگام آب‌گیری ستون آب، اندکی قبل از رسیدن سطح آب به توری، دسته دستگاه کاغذساز رها می‌شد تا آب باقی‌مانده بدون مکش و تنها با وزن خود از توری خارج شود. سپس توری را به همراه نمد تر برداشته و بعد از کشیدن دستمال به زیر توری برای جدا کردن آب آزاد چسبیده به آن، کل مجموعه نمد-توری وزن می‌شد. سپس از اختلاف این عدد با وزن خام توری، وزن نمد تر به‌دست آمد که درصد خشکی آن ۱± ۵ حاصل شد؛ ۲- برای ساخت نمد تر با خشکی ۱۰ درصد در هنگام آب‌گیری دسته دستگاه کاغذساز را بعد از خروج کامل آب از محفظه دستگاه به مدت ۱۰ ثانیه بیشتر نگه داشته شد و بعد با قرار دادن یک عدد کاغذ خشک‌کن روی نمد تر به مدت چند ثانیه، درصد خشکی ۱۰±۱ حاصل شد؛ ۳- برای ساخت نمد تر با خشکی ۲۰ درصد بعد از آب‌گیری کامل، روی نمد تر ۲ عدد بالاتر و ۱ عدد پلیت گذاشته و به مدت ۲ دقیقه روی آن وردنه کشیده شد تا آب آن بیشتر خارج شود و به درصد خشکی ۱±۲۰ حاصل شود؛ ۴- برای رسیدن به خشکی ۳۵ درصد نیز مثل خشکی ۲۰ درصد عمل شد با این تفاوت که یک مرحله پرس ۵ دقیقه‌ای نیز به آن اضافه شد تا درصد خشکی مورد نظر حاصل شود.

برای پاشش نانو الیاف سلولز روی نمد تر از دستگاه پیستوله ظریف مخصوص پاشش مواد رنگی خوراکی در قنادی فروشی‌ها به همراه سیستم فشار و پمپ خلأ استفاده شد (شکل ۱). همچنین نمد تر همراه توری حامل آن در دهانه یک قیف پلاستیکی در زیر پیستوله قرار گرفت. برای مطمئن شدن از نداشتن درز در حاشیه قیف از چسب آکواریوم استفاده شد به‌طوری‌که هنگام ایجاد مکش، هوا فقط از سطح نمد عبور کند. سپس پاشش نانو الیاف سلولز به‌وسیله پیستوله از سمت بالا با فاصله ۳۵ سانتی‌متر از سطح نمد تر با فشار خروجی ۶ بار[2]انجام شد. فاصله کمتر موجب پاشش بیشتر نانو الیاف در مرکز نمد و فاصله بیشتر موجب پخش شدن نانو الیاف از اطراف نمد می‌شد. در آزمون‌های مقدماتی با فاصله کمتر از ۳۵ سانتیمتر، مقاومت کششی نمونه‌های مرکز نمد بیش از نمونه‌های حاشیه به دست آمد. هم‌زمان مکش به مقدار تقریبی منفی ۱ بار از زیر توری اعمال شد. همه کاغذها پس از تیمار با نانو الیاف سلولز به مدت ۵ دقیقه با هوای گرم تیمار شدند تا نانو الیاف سلولز در مراحل بعد به کاغذ خشک‌کن نچسبد. هوای گرم با استفاده از جریان ملایم سشوار که بجای پیستوله در مجموعه محکم شده بود، به طور یکسان برای همه تیمارها اعمال شد. نمدهای تیمار شده طبق استاندارد تاپی T 205sp-02 پرس و هوا خشک شدند [۲۰].

[1] TAPPI

[2] Bar



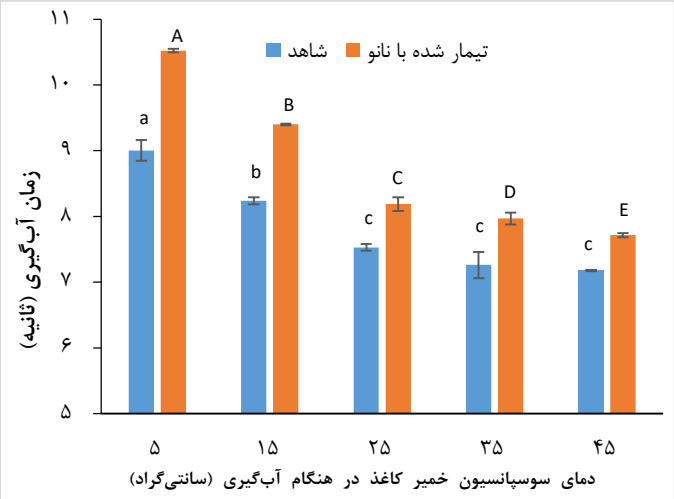
شکل۱- شماتیک دستگاه پاشش نانو الیاف سلولز به سطح نمد

ویژگی‌های کاغذ ساخته شده شامل ضخامت، شاخص مقاومت به کشش، مقاومت به تا شدگی و مقاومت به پارگی کاغذ با دستگاه اندازه‌گیری مربوطه به ترتیب بر اساس استانداردهای تاپی با شماره‌های T411om-05، T494 om-01، T 511 om-02، T 414om-98اندازه‌گیری شد [۲۱-۲۴]. به منظور مقایسه میانگین‌ها از آزمون F (کاملاً تصادفی) استفاده شد. برای گروه‌بندی نیز از روش دانکن استفاده شد. برای این منظور از نرم‌افزار SPSS استفاده شد.

نتایج و بحث

زمان آب‌گیری

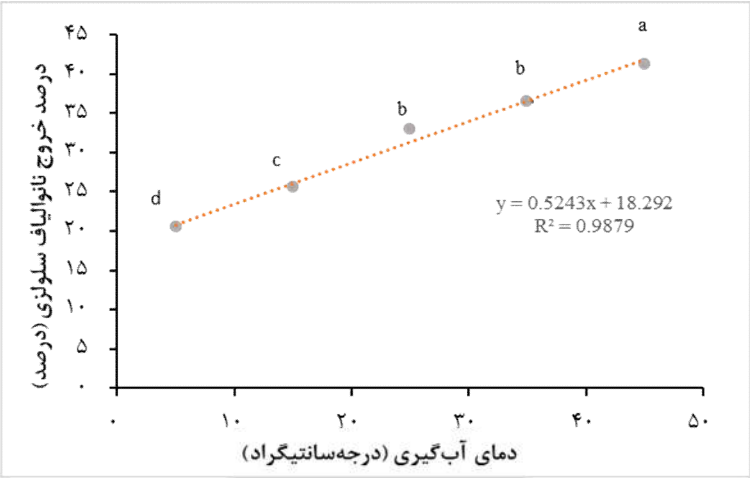
با توجه به شکل ۲، دمای سوسپانسیون خمیرکاغذ، زمان آب‌گیری را به‌طور معنی‌دار تحت تأثیر قرار می‌دهد [۲۵]. گزارش شده است با افزایش دما، معمولاً گرانروی آب کاهش می‌یابد و در نتیجه آب‌گیری بهبود می‌یابد [۲۶]. بر اساس این نتایج همان‌طور که انتظار می‌رفت زمان آب‌گیری نمونه‌های شاهد کمتر از زمان آب‌گیری نمونه‌های تیمارشده با نانو الیاف سلولز است [۲۷]. همچنین در خصوص نمونه‌های تیمار شده با نانو الیاف سلولز، با افزایش دما، زمان آب‌گیری کاهش یافته است [۲۸]. گزارش شده است با افزایش دما از ۳۰ به ۶۰ درجه سانتی‌گراد خروج آب از نمد در حال ساخت کاغذ سریع‌تر شده است [۲۹]. با توجه به شکل ۲ بیشترین زمان آب‌گیری مربوط به نمونه تیمار شده با نانو الیاف سلولز در دمای ۵ درجه سانت است (۱۰/۵۲ ثانیه). البته زمان آب‌گیری تا دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد به‌طور محسوس کاهش یافت و در دماهای بالاتر این مقدار تقریباً ثابت ماند.



شکل ۲- تأثیر افزودن نانو الیاف سلولز بر زمان آب‌گیری سوسپانسیون خمیرکاغذ در دماهای مختلف

مقدار هدر رفت نانو الیاف سلولز

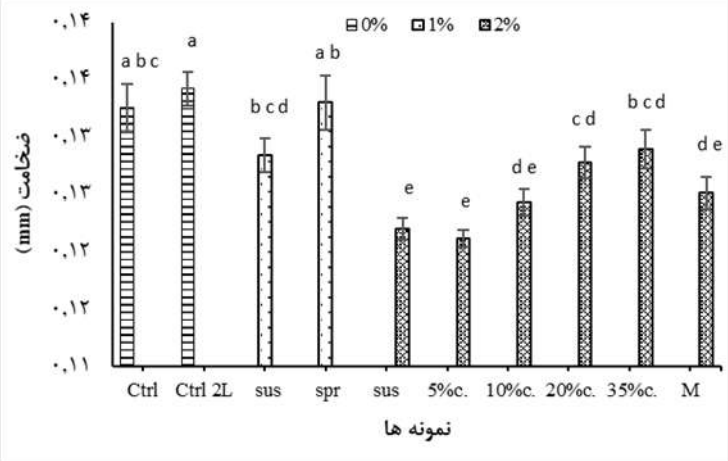
نتایج بررسی مقدار خروج یا هدر رفت نانو الیاف سلولز از توری دستگاه کاغذ دست‌ساز (در پنج سطح دما ۵، ۱۵، ۲۵، ۳۵ و ۴۵ درجه سانتی‌گراد) در شکل ۳ ارائه شده است. بر اساس این نتایج، با افزایش دما مقدار خروج نانو الیاف سلولز نیز افزایش یافت. بیشترین مقدار خروج نانو الیاف سلولز با ۴۱/۲۶ درصد در ۴۵ درجه سانتی‌گراد در گروه a قرار گرفت. مقدار هدر رفت نانو الیاف سلولز در ۲۵ و ۳۵ درجه سانتی‌گراد به ترتیب با ۳۳ و ۳۶/۵۶ درصد در گروه b قرار گرفت. کمترین مقدار هدر رفت نانو الیاف سلولز در ۵ درجه سانتی‌گراد مشاهده گردید. به نظر می‌رسد مقدار هدر رفت نانو الیاف سلولز در دمای بیشتر با انعطاف‌پذیر شدن بیشتر ذرات و تسهیل رهاسازی آب از سطح الیاف در اثر کاهش گرانروی آب افزایش یافته است [۲۶] و در دمای کمتر حرکت کندتر ذرات در هنگام آب‌گیری سوسپانسیون خمیرکاغذ، خروج آن‌ها از توری دستگاه کاغذ دست‌ساز را کم می‌کند. در این شکل نمودار رگرسیون خطی مقدار هدر رفت نانو الیاف سلولز (در پنج دمای مورد مطالعه ۵، ۱۵، ۲۵، ۳۵ و ۴۵ درجه سانتی‌گراد) تعیین شد که با همبستگی حدود ۹۹ درصد مقدار هدر رفت در محدوده ۵ تا ۴۵ درجه سانتی‌گراد قابل محاسبه است. با این رابطه تعیین مقدار نانو الیاف سلولز مورد نیاز به‌منظور افزودن به سوسپانسیون را که درصد معینی از آن در هنگام آب‌گیری در کاغذ باقی بماند به‌دست می‌آید.



شکل ۳. درصد هدر رفت نانو الیاف سلولز در دماهای مختلف

ضخامت

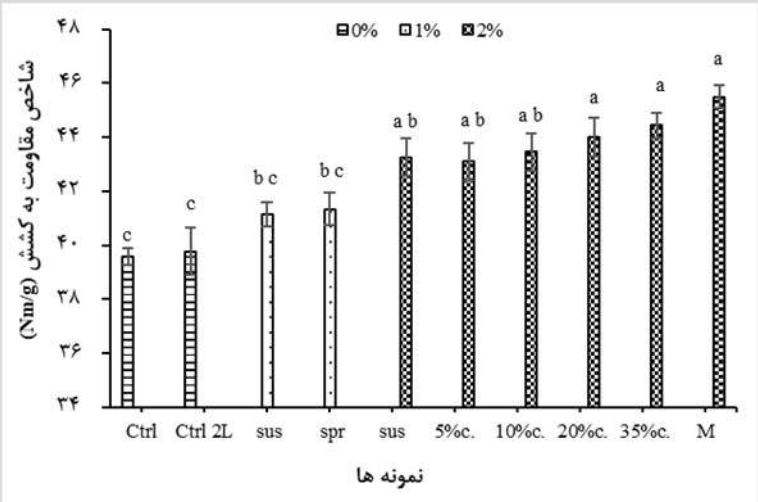
با توجه به شکل ۴ ضخامت نمونه‌های شاهد دولایه (دو عدد g/m2 ۴۰) و تک لایه (g/m2 ۸۰) و نمونه‌ای که با پاشش ۱ درصد نانو الیاف سلولز تیمار شده بود همگی در یک گروه قرار گرفته و بیشترین ضخامت را نشان دادند. همچنین افزودن ۱ درصد نانو الیاف سلولز به سوسپانسیون خمیرکاغذ ناچیز بوده و تأثیری بر ضخامت کاغذ نشان نداده است. با توجه به شکل ۴ افزودن ۲ درصد نانو الیاف سلولز در سه روش مختلف ذکر شده در پژوهش موجب کاهش معنی‌دار ضخامت کاغذها شده است. افزودن نانو الیاف سلولز به سوسپانسیون خمیرکاغذ و پس از خشک شدن کاغذ معمولاً موجب کاهش ضخامت کاغذ می‌شود [۳۰]. به دلیل اینکه نانو الیاف سلولز به صورت رشته‌هایی در ابعاد نانو با سطح ویژه زیاد است و این نانوذرات بین الیاف خمیرکاغذ و در درون خلل و فرج شبکه الیاف سلولزی در نمد کاغذ قرار گرفته و در نتیجه نقش پل بین الیاف سلولزی بازی می‌کند. به این ترتیب افزودن ۲ درصد نانو الیاف به سوسپانسیون خمیرکاغذ باعث کاهش معنی‌دار در ضخامت کاغذ نهایی گردید. همچنین افزودن ۲ درصد نانو الیاف به سطح نمد تر با درصد خشکی کمتر، باعث نفوذ بیشتر نانو الیاف سلولز در ضخامت نمد شده و درنتیجه با نزدیک کردن شبکه الیاف به یکدیگر در جهت ضخامت به‌طور معنی‌داری موجب کمتر شدن ضخامت کاغذ نهایی شده است. به‌طوری‌که افزودن ۲ درصد نانوسلولز به نمد با ۵ درصد خشکی، ضخامت را از ۰/۱۴ به ۰/۱۲ میلی‌متر رسانده است که ۱۴ درصد تغییرات ضخامت را نشان می‌دهد. درصورتی که با افزایش درصد خشکی نمد نفوذ نانو الیاف سلولز در ضخامت آن کمتر شده و اثر چندانی بر ضخامت کاغذ حاصل نداشت. بنابراین بین تیمارهای افزودن ۲ درصد نانو الیاف به نمد تر بیشترین ضخامت مربوط به پاشش آن به سطح نمد تر با خشکی ۳۵ درصد به‌دست‌آمده است. تیمار پاشش ۲ درصد نانو الیاف سلولز بین دو لایه نمد تر، به دلیل نفوذ نانو الیاف سلولز از دو سمت در جهت ضخامت نمد، موجب نزدیک کردن بیشتر دو لایه نمد نازک ۳۹ گرمی به یکدیگر شده و تأثیر بیشتری بر کاهش ضخامت کاغذ در مقایسه با پاشش آن به خشکی یکسان اما در یک سطح کاغذ داشته است. به‌طور کلی با توجه به نتایج شکل ۴ به نظر می‌رسد هرچه درصد خشکی نمدها بیشتر باشد نفوذ نانو الیاف سلولز در جهت ضخامت آن‌ها کمتر شده و با تشکیل لایه نازک در سطح نمد تأثیر ناچیزی در کاهش ضخامت دارد و برعکس هرچه درصد خشکی نمدها کمتر باشد نانو الیاف سلولز بیشتر در ضخامت کاغذ نفوذ می‌کند که موجب کاهش چشمگیری در ضخامت کاغذ نهایی می‌شود.



شکل ۴- تیمار نمد تر کاغذ در درصدهای خشکی مختلف و اثر آن بر ضخامت کاغذ نهایی (Ctrl: کاغذ شاهد، Ctrl 2L: کاغذ شاهد دولایه، Sus: افزودن نانو الیاف سلولز به سوسپانسیون خمیرکاغذ، Spr: پاشش نانو الیاف سلولز به سطح نمد با خشکی ۲۰ درصد، .5%C: پاشش نانو الیاف سلولز به سطح نمد با خشکی ۵ درصد، .10%C: پاشش نانو الیاف سلولز به سطح نمد با خشکی ۱۰ درصد، .20%C: پاشش نانو الیاف سلولز به سطح نمد با خشکی ۲۰ درصد، .35%C: پاشش نانو الیاف سلولز به سطح نمد با خشکی ۳۵ درصد، M: پاشش نانو الیاف سلولز بین دولایه نمد ۳۹ گرمی با خشکی ۲۰ درصد)

شاخص مقاومت به کشش

افرایش مقاومت کششی با افزودن نانو الیاف سلولزی به خمیرکاغذ قبلاً گزارش شده است [۳۰-۳۲]. همچنین افزودن نانو الیاف سلولزی به نمد تر کاغذ به صورت اسپری موجب افزایش مقاومت به کشش کاغذ نهایی شده است [۳۳]. در تحقیق حاضر نتایج حاصل از شکل ۵ نشان می‌دهد که افزودن ۱ درصد نانو الیاف سلولز به سوسپانسیون و پاشش همین مقدار از آن به سطح نمد تر کاغذ هر دو سبب رشد ناچیزی در شاخص مقاومت به کشش کاغذ حاصل گردیده است؛ اما افزودن ۲ درصد نانو الیاف سلولز به سوسپانسیون خمیرکاغذ و پاشش همین مقدار نانو الیاف سلولز به نمد تر کاغذ در درصدهای خشکی مورد بررسی و بین دو لایه نمد تر با خشکی ۲۰ درصد رشد چشمگیری را در شاخص مقاومت به کشش کاغذهای حاصل نشان داد. همچنین تیمار با ۲ درصد نانو الیاف سلولز در درصدهای خشکی بیشتر نسبت به افزودن همان مقدار از آن به سوسپانسیون خمیرکاغذ و پاشش آن به سطوح با درصد خشکی کمتر، سبب افزایش قابل ملاحظه‌تری در شاخص مقاومت به کشش کاغذ نهایی گردیده است. همچنین پاشش ۲ درصد نانو الیاف سلولز بین دو لایه نمد با خشکی ۲۰ درصد بیشترین مقدار شاخص مقاومت به کشش را داشت. نمونه‌های شاهد و شاهد دو لایه (۴۰×۲) با کمترین شاخص مقاومت به کشش در گروه c قرار گرفتند. به نظر می‌رسد در صورت استفاده از مقادیر محدود نانو الیاف سلولزی (حدود ۱ درصد) چه در سوسپانسیون و چه در حالت پاشش، به دلیل اینکه حضور مقدار کم نانو الیاف سلولزی نمی‌تواند امکان تشکیل شبکه به هم پیوسته‌ای را فراهم نماید، نتوانسته است نقش برجسته‌ای در بهبود مقاومت‌ها ایفا نماید ولی وقتی درصد نانو الیاف سلولزی بیشتر می‌شود، چه در حالت سوسپانسیون و چه در حالت پاشش روی سطح کاغذ توانسته است به تشکیل شبکه به هم پیوسته مستحکم‌تر کمک نماید ضمن اینکه در حالت اسپری روی سطح کاغذ با درصد خشکی بیشتر، نفوذ در عمق ضخامت کاغذ کمتر شده و نانو الیاف سلولزی توانسته‌اند شبکه پیوسته‌تری روی سطح کاغذ تشکیل دهد بنابراین مقاومت به کشش بیشتر شده است.

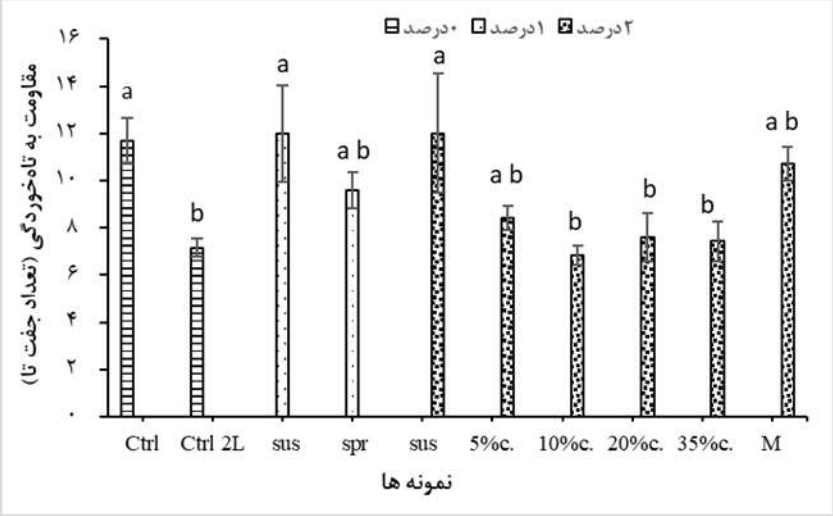


شکل ۵. تیمار نمد تر کاغذ با نانو الیاف سلولز و تأثیر آن بر شاخص مقاومت به کشش کاغذ نهایی (Ctrl: کاغذ شاهد، Ctrl 2L: کاغذ شاهد دولایه، Sus: افزودن نانو الیاف سلولز به سوسپانسیون خمیرکاغذ، Spr: پاشش نانو الیاف سلولز به سطح نمد با خشکی ۲۰ درصد، 5%C.: پاشش نانو الیاف سلولز به سطح نمد با خشکی ۵ درصد، 10%C.: پاشش نانو الیاف سلولز به سطح نمد با خشکی ۱۰ درصد، 20%C.: پاشش نانو الیاف سلولز به سطح نمد با خشکی ۲۰ درصد، 35%C.: پاشش نانو الیاف سلولز به سطح نمد با خشکی ۳۵ درصد، M: پاشش نانو الیاف سلولز بین دولایه نمد ۳۹ گرمی با خشکی ۲۰ درصد)

مقاومت به تاخوردگی

مقاومت به تاخوردگی یکی از پیچیده‌ترین خواص مکانیکی عمومی کاغذ است [۳۴]. با توجه به شکل ۶ افزودن ۱ درصد نانو الیاف سلولز به سوسپانسیون خمیرکاغذ و پاشش ۱ درصد از آن به سطح نمد تر با خشکی ۲۰ درصد روی مقاومت به تاه‌شدن کاغذهای حاصل اثر

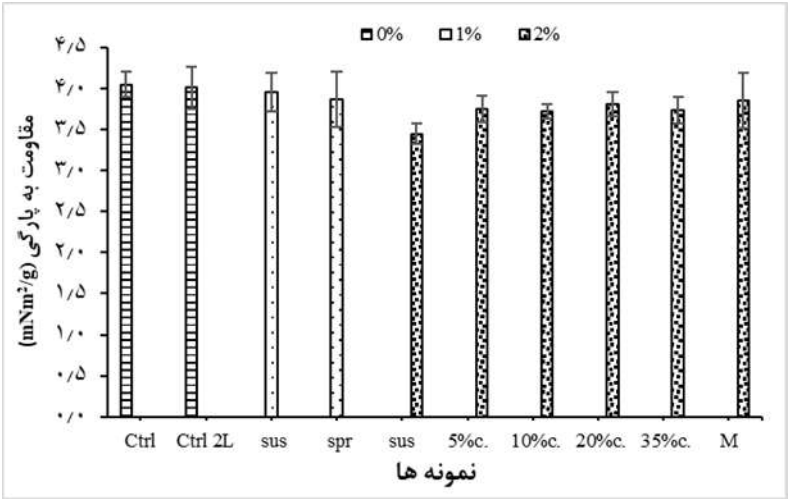
معنی‌داری نداشت. تیمار مربوط به افزودن نانو الیاف به سوسپانسیون خمیر با پاره شدن بعد از ۱۲ جفت تاه، بیشترین مقاومت و کاغذ شاهد ۸۰ گرمی پاره شدن بعد از ۶۸/ جفتفت تاه هر دو در گروه a قرار گرفتند. با توجه به نتایج حاصل از آزمون نمونه‌ها تیمارهای افزودن ۱ و ۲ درصد نانو الیاف سلولز به سوسپانسیون خمیرکاغذ و تیمار پاشش ۲ درصد نانو الیاف سلولز بین دو لایه نمد با خشکی ۲۰ درصد به همراه نمونه شاهد بیشترین مقاومت به تعداد جفت تاه را نشان دادند. مقاومت به تعداد جفت تاه در دیگر تیمارها کمتر از نمونه شاهد ا.



شکل۶. تیمار نمد تر کاغذ با نانو الیاف سلولز و تأثیر آن بر مقاومت به تاه‌شدن کاغذ نهایی (Ctrl: کاغذ شاهد، Ctrl 2L: کاغذ شاهد دولایه، Sus: افزودن نانو الیاف سلولز به سوسپانسیون خمیرکاغذ، Spr: پاشش نانو الیاف سلولز به سطح نمد با خشکی ۲۰ درصد، .5%C: پاشش نانو الیاف سلولز به سطح نمد با خشکی ۵ درصد، .10%C: پاشش نانو الیاف سلولز به سطح نمد با خشکی ۱۰ درصد، .20%C: پاشش نانو الیاف سلولز به سطح نمد با خشکی ۲۰ درصد، .35%C: پاشش نانو الیاف سلولز به سطح نمد با خشکی ۳۵ درصد، M: پاشش نانو الیاف سلولز بین دولایه نمد ۳۹ گرمی با خشکی ۲۰ درصد)

مقاومت به پارگی

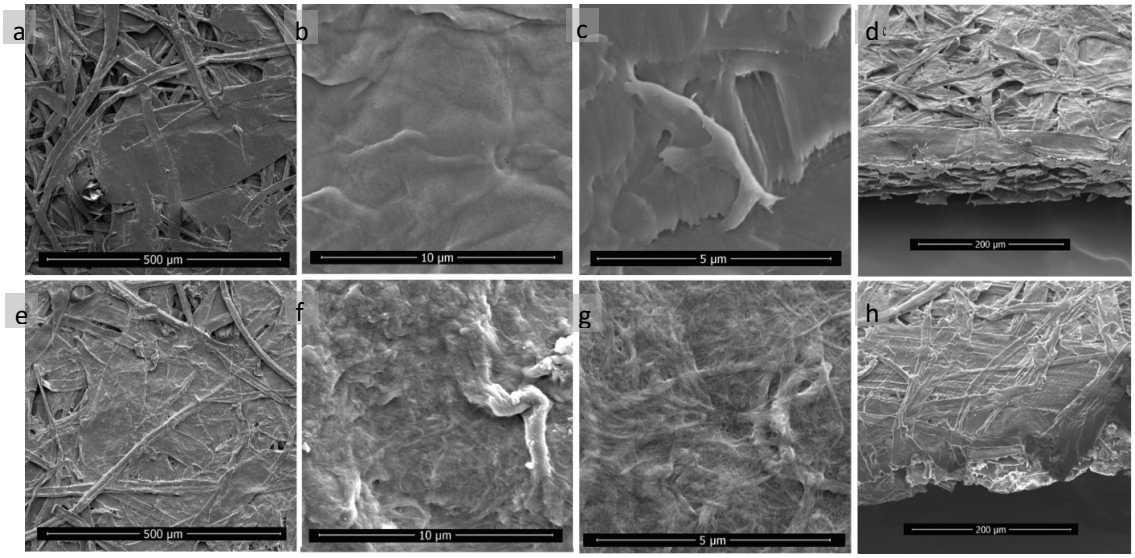
با توجه به نتایج ارائه شده در شکل ۷ مقاومت به پارگی همه کاغذها در یک گروه (a) قرار گرفت و از نظر آماری اختلاف آن‌ها معنی‌دار نبود. مقاومت به پارگی کاغذ بیشتر تحت تأثیر طول الیاف، مقاومت تک‌تک الیاف و پیوندهای بین آن‌هاست [۳] و متغیرهای این پژوهش تأثیری بر این ویژگی کاغذ نداشته است.



شکل۷. تیمار نمد تر کاغذ با استفاده از نانو الیاف سلولزی و تأثیر آن بر شاخص مقاومت به پارگی کاغذ نهایی (Ctrl: کاغذ شاهد، Ctrl 2L: کاغذ شاهد دولایه، Sus: افزودن نانو الیاف سلولز به سوسپانسیون خمیرکاغذ، Spr: پاشش نانو الیاف سلولز به سطح نمد با خشکی ۲۰ درصد، .5%C: پاشش نانو الیاف سلولز به سطح نمد با خشکی ۵ درصد، .10%C: پاشش نانو الیاف سلولز به سطح نمد با خشکی ۱۰ درصد، .20%C: پاشش نانو الیاف سلولز به سطح نمد با خشکی ۲۰ درصد، .35%C: پاشش نانو الیاف سلولز به سطح نمد با خشکی ۳۵ درصد، M: پاشش نانو الیاف سلولز بین دولایه نمد ۳۹ گرمی با خشکی ۲۰ درصد)

SEM

شکل ۸ تصاویر SEM از نمونه کاغذ شاهد (ردیف بالا) و کاغذهای تیمار شده با نانو الیاف سلولز (ردیف پایین) با بزرگنمایی مختلف را نشان می‌دهد. بخش e، f و g سطح نمونه کاغذ آغشته شده به نانو الیاف سلولزی و بخش h ضخامت نمونه کاغذ دولایه دارای دو درصد نانو الیاف سلولز در مرکز آن را به تصویر می‌کشد. با توجه به تصاویر ارائه شده بافت سطحی متفاوت کاغذ کنترل و کاغذ آغشته شده به نانو الیاف سلولزی قابل مشاهده است. نانو الیاف سلولز همچنین موجب انسجام بیشتر الیاف و فشرده کردن بافت کاغذ از طریق ایجاد پل و پر کردن فضای خالی بین الیاف شده، به‌طوری‌که ضخامت کاغذ را کاهش داده است. تصویر d لایه‌لایه قرار گرفتن الیاف در ضخامت کاغذ شاهد را نشان می‌دهد درصورتی‌که تصویر h لایه‌های منسجم‌تر و فشرده‌تر الیاف در ضخامت کاغذ را نشان می‌دهد.



شکل ۸. عکس SEM نمونه کاغذ شاهد (ردیف بالا) و نمونه کاغذهای دارای نانو الیاف سلولزی در سطح (e، f، g) با بزرگنمایی‌های مختلف. d: ضخامت کاغذ کنترل و h: ضخامت نمونه کاغذ با دو درصد نانوسلولز در مرکز

نتیجه‌گیری

در بخش اندازه‌گیری زمان آب‌گیری در دماهای مورد مطالعه نتایج نشان داد با افزایش دما زمان آب‌گیری کاهش اما مقدار هدر رفت نانو الیاف سلولز افزایش می‌یابد. هنگام پاشش نانو الیاف سلولز به سطح نمد تر هرچه درصد خشکی نمد بیشتر باشد نفوذ نانو الیاف سلولز در ضخامت آن کمتر شده و تأثیر کمی بر الیاف لایه‌های زیرین و در نتیجه بر کاهش ضخامت کاغذ نهایی دارد. در مورد نتایج ویژگی‌های مکانیکی (مقاومت به کشش، تاه‌شدن و پارگی) کاغذهای حاصل از تیمارهای افزودن ۲ درصد نانو الیاف سلولز به سوسپانسیون خمیرکاغذ باگاس و همچنین پاشش همین مقدار به سطح نمد تر کاغذ باگاس با درصدهای خشکی مختلف، پاشش ۲ درصد نانو الیاف سلولز بر سطح یا میان نمد تر مقاومت کششی کاغذ را به طور معنی‌دار افزایش می‌دهد و هر چه سطح نمد هنگام پاشش خشک‌تر باشد مقاومت کششی بیشتر خواهد بود. البته کاغذ سه لایه با لایه میانی نانو الیاف سلولز بیشترین شاخص کشش را در میان همه تیمارها نشان داد. افزودن ۲ درصد نانو الیاف سلولز به سوسپانسیون خمیرکاغذ باگاس سبب افزایش معنی‌داری در ویژگی مقاومت به تاه‌شدن نسبت به پاشش همین مقدار نانو الیاف سلولز به سطح نمد تر کاغذ باگاس شد. به‌طور کلی استفاده از روش پاشش نانو الیاف سلولز به سطح نمد تر با درصد خشکی بیش از ۱۰ درصد می‌تواند بدون کمک نگهدارنده، هدر رفت نانو الیاف سلولز را به صفر برساند و تأثیری نیز در آب‌گیری سوسپانسیون خمیرکاغذ ایجاد نکند. همچنین پاشش نانو الیاف سلولز به‌عنوان لایه میانی کاغذ با درصد خشکی بیشتر، ضمن تأثیر قابل توجه بر شاخص کششی کاغذ و کم نکردن زمان آب‌گیری، لایه نانو الیاف سلولز هیچ‌گونه تماسی با سطوح حامل و خشک‌کن نداشته باشد. بنابراین به‌کار گیری روش اخیر در صنعت می‌تواند بسیار مفید باشد.

منابع

[1] Hetemäki, L., Hänninen, R., Moiseyev, A., 2013. Markets and market forces for pulp and paper products. In: The Global Forest Sector: Changes, Practices, and Prospects. https://doi.org/10.1201/b16186.

[2] Mondéjar-López, M., García-Simarro, M.P., Navarro-Simarro, P., Gómez-Gómez, L., Ahrazem, O., Niza, E., 2024. A review on the encapsulation of “eco-friendly” compounds in natural polymer-based nanoparticles as next generation nano-agrochemicals for sustainable agriculture and crop management, Int J Biol Macromol, 136030.

[3] Xu, J., Krietemeyer, E.F., Boddu, V.M., Liu, S.X., Liu, W.C., 2018. Production and characterization of cellulose nanofibril (CNF) from agricultural waste corn stover. Carbohydrate Polymers, 192. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.03.017.

[4] Bardet, R., Bras, J., 2014. Cellulose nanofibers and their use in paper industry. HANDBOOK OF GREEN MATERIALS: 1 Bionanomaterials: separation processes, characterization and properties, World Scientific, pp.207–32.

[5] Deng, Y., Zhu, T., Cheng, Y., Zhao, K., Meng, Z., Huang, J., 2024. Recent advances in functional cellulose-based materials: Classification, properties, and applications, Advanced Fiber Materials, 1–26.

[6] Sandquist, D., 2013. New horizons for microfibrillated cellulose. Appita Journal: Journal of the Technical Association of the Australian and New Zealand pulp and paper Industry, 66(2), 156.

[7] Einchhorn, S.J., Dufresne, A., Aranguren, M.M., Capadona, J.R., Rowan, S.J., Weder, C., Veigel, S., 2010. Review: current international research into cellulose nanofibres and composites. J. Mater. Sci. 45, pp. 1–33.

[8] Cowie, J., Bilek, E.M.T., Wegner, T.H., Shatkin, J.A., 2014. Market projections of cellulose nanomaterial-enabled products - part 2: Volume estimates. Tappi J. https://doi.org/10.32964/tj13.6.57.

[9] Qin, Z., Ng, W., Ede, J., Shatkin, J.A., Feng, J., Udo, T., 2024. Nanocellulose and its modified forms in the food industry: Applications, safety, and regulatory perspectives, Compr Rev Food Sci Food Saf, 23: e70049.

[10] Ämmälä, A., Sirviö, J.A., Liimatainen, H., 2021. Energy consumption, physical properties and reinforcing ability of microfibrillated cellulose with high lignin content made from non-delignified spruce and pine sawdust, Ind Crops Prod, 170: 113738.

[11] Boufi, S., González, I., Delgado-Aguilar, M., Tarrès, Q., Pèlach, M.À., Mutjé, P., 2016. Nanofibrillated cellulose as an additive in papermaking process: A review. Carbohydrate Polymers, 154. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2016.07.117.

[12] Kumar, V., Elfving, A., Koivula, H., Bousfield, D., Toivakka, M., 2016. Roll-to-Roll Processed Cellulose Nanofiber Coatings. Ind Eng Chem Res. 55.

[13] Afra, E., Mohammadnejad, S., Saraeyan, A., 2016. Cellulose nanofibils as coating material and its effects on paper properties. Prog Org Coat, 101, pp.455–460.

[14] Kumar, V., 2018. Roll-to-roll processing of nanocellulose into coatings.

[15] Lu, Z., An, X., Zhang, H., Guan, M., Liu, J., Sun, Y., Nie, S., Cao, H., Lu, B., Liu, H., 2019. Study on the wet-web strength and pressability of paper sheet during the press process with the addition of nano-fibrillated cellulose (NFC). Carbohydrate Polymers, 210, 332-338. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.01.083.

[16] Jarabo, R., Fuente, E., Monte, M.C., Savastano, H., Mutjé, P., Negro, C., 2012. Use of cellulose fibers from hemp core in fiber-cement production. Effect on flocculation, retention, drainage and product properties. Ind Crops Prod. 39. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2012.02.017.

[17] Moradian, M.H., Rezayati Charani, P., Saadat Niya, M., 2016. Improving paper breaking length using cellulosic nanofibers in bagasse pulp. Forest and Wood Products, 69, pp. 603–614.

[18] Amini, E. (Nima), Tajvidi, M., Bousfield, D.W., Gardner, D.J., Shaler, S.M., 2019. Dewatering Behavior of a Wood-Cellulose Nanofibril Particulate System. Sci Rep 9. https://doi.org/10.1038/s41598-019-51177-x.

[19] Rudi, H., Atun, D., Jalali Torshizi, H., Djafari Petroudy, S.R., 2018. Effect of Applying Cellulose Nanofibers on the Properties of Multiply Paper Made from Recycled Fibers. Iranian Journal of Wood and Paper Industries 9, pp. 359–369.

[20] TAPPI., 2006. Forming handsheets for physical tests of pulp. TAPPI Test Method T 205 sp-18, Tappi J, 1–9.

[21]TAPPI., 2006. Thickness (caliper) of paper, paperboard, and combined board. Test TAPPI Test Method T411 om-05, Tappi J, 1–4.

[22] TAPPI., 2006. Tensile properties of towel and tissue products (using constant rate of elongation apparatus). TAPPI Test Method T494 om-01., Tappi J, 1–14.

[23] TAPPI., 2006. TAPPI Internal tearing resistance of paper (Elmendorf-type method. TAPPI Test Method T 414 om 04, Tappi J, 1–7.

[24] TAPPI., 2006. Folding endurance of paper (MIT tester). TAPPI Test Method T 511 om-02, Tappi J, 3–7.

[25] TAPPI., 2006. Freeness of pulp (Canadian standard method), Tappi Press, Atlanta, GA, 1–9.

[26] Ramaswamy, S., 2003. Vacuum dewatering during paper manufacturing, Drying Technology, 21: 685–717.

[27] Rezayati Charani, P., 2019. Comparison of the Effect of Using Cellulose Nanofibers and Cationic Starch instead of Refining on the Physical and Mechanical Properties of Manufacture Paper from OCC pulp, Iranian Journal of Wood and Paper Science Research, 33: 593–605.

[28] Sethi, J., Oksman, K., Illikainen, M., Sirviö, J.A., 2018. Sonication-assisted surface modification method to expedite the water removal from cellulose nanofibers for use in nanopapers and paper making, Carbohydrate Polymers, 197: 92–9.

[29] Kalliokoski, J., 2011. Models of filtration curve as a part of pulp drainage analyzers.

[30] Khalilian Shalamzari, M., Moradian, M.H., Rezayati Charani, P., 2018. Improving wet tensile strength of paper glass using PAE, CNF and CMC. Iranian Journal of Wood and Paper Industries 9, pp. 163–173.

[31] Kajanto, I., Kosonen, M., 2012. The potential use of micro-and nanofibrillated cellulose as a reinforcing element in paper, Journal of Science & Technology for Forest Products and Processes, 2: 42–8.

[32] Rezayati Charani, P., Moradian, M.H., Mousavi, S.F., 2020. Strengthening tensile strength of wet and dry layer of paper from chemical-mechanical pulp by cellulose nanofibers and PAE, Journal of Environmental Science Studies, 5: 2458–65.

[33] Shanmugam, K., 2022. Spray coated cellulose nanofiber laminates on the paper to enhance its barrier and mechanical properties, Journal of Sustainability and Environmental Management, 1: 10–7.

[34] Young, R.A., 1994. Comparison of the properties of chemical cellulose pulps. Cellulose 1, pp. 107–130.

[35] Chen, Z., Zhang, H., Song, Z., Qian, X., 2013. Preparation and Application of Maleic Anhydride-Acylated Chitosan for Wet Strength Improvement of Paper. Bioresources, 8(3).