Research Article

Iranian Journal of Wood and Paper Industries
Vol. 15, No. 3, Page 325 - 341 (2024)

DOI: 10.22034/ijwp.2024.2027525.1659

Comparison of durable papers made from cotton pulp and bottom combers pulp with a combination of cellulose nanofibers and lignocellulosic nanofibers

Jafar Ebrahimpour-Kasmani[1*], Ahmad Samariha[2]

1- Corresponding author, Associate Prof, Department of Wood and Paper Science and Technology, Savadkooh Branch, Islamic Azad University, Savadkooh, Iran. Email: jafar_kasmani@yahoo.com
2- Department of Wood Industry, National University of Skills (NUS), Tehran, Iran

Received: April 2024 Accepted: October 2024

Abstract

Problem definition and objectives: The use of modern technologies, such as the application of nanoparticles in improving the quality of durable paper production, has opened up a new horizon. This study investigates and compares durable papers made from cotton and bottom combers pulp with a combination of nanocellulose fibers and lignocellulosic nanofibers. The main objective of this research is to evaluate the impact of nanofibers on the physical and mechanical properties of the papers made from cotton and bottom combers pulp, as well as to identify the potential for enhancing their quality and performance.

Methodology: In this study, refined paper pulp of cotton fibers, bottom combers fibers, cellulose nanofibers, lignocellulosic nanofibers was obtained from a durable paper factory and then 60 gm-2 grams handsheets paper was made. Finally, the morphology of the fibers and the physical and mechanical properties of the manufactured papers were evaluated.

Results: The obtained results showed that the tensile strength index of the paper prepared from the combination of 5% cellulose nanofibers and 1% starch was about 83% higher than the paper prepared from 100% bottom combers pulp. Burst strength index of in the combination of 5% cellulose nanofibers and 1% starch was 75% higher than the combination of 100% bottom combers pulp. Tear strength index of the paper prepared from the combination of 5% cellulose nanofibers and 1.0% polyacrylamide was 17% higher than the combination of 5% cellulose nanofibers and 0.1% polyacrylamide pulp. The surface smoothness of the paper prepared from the combination of 5% lignocellulosic nanofibers and 0.1% polyacrylamide of the bottom combers pulp was about 28% higher than the combination of 5% lignocellulosic nanofibers and 1% starch. The porosity of the paper prepared from the combination of 100% paper pulp obtained from bottom combers cotton fibers was about 433% higher than the combination of 5% lignocellulosic nanofibers and 1% starch. The opacity of the paper prepared from the combination of 5% of lignocellulosic nano fibers and 0.1% of polyacrylamide was 6% higher than the combination of 100% paper pulp obtained from cotton fibers. The brightness of the paper prepared from the combination of 5% cellulose nanofibers and 1% starch was 18% higher than the combination of 5% lignocellulosic nanofibers and 1% starch.

Conclusion: This study showed that the combination of nanofibers with cotton and bottom combers pulps can significantly improve the physical and mechanical properties of durable papers. The results indicate that the tensile strength and burst resistance in papers containing cellulose nanofibers were notably higher than those made solely from bottom combers pulp. Additionally, the tear resistance improved with the use of a combination of cellulose nanofibers and polyacrylamide, demonstrating the effectiveness of this mixture in enhancing paper strength. On the other hand, the surface smoothness and opacity of papers containing lignocellulosic nanofibers were improved compared to other combinations, which could enhance the aesthetic quality and printability of the paper. The porosity of papers produced from bottom combers pulps was significantly higher than that of the nanofiber combinations, potentially affecting ink absorption and other functional characteristics. Furthermore, the brightness of the papers increased with the use of cellulose nanofibers, which could impact specific applications such as printing and packaging. Overall, this research emphasizes that integrating nanofibers in paper production can lead to the creation of higher quality and more durable papers. In general, this research emphasizes that the durable paper made from underfelt possesses suitable characteristics, and its use as a complete or significant portion of the pulp needed for the production of various types of durable papers is recommended.

Keywords: Durable paper, lignocellulosic nanofibers, cotton fibers, bottom combers pulp, fiber morphology, physical strength properties of paper.

مقایسه کاغذهای بادوام ساخته شده از خمیرکاغذ پنبه و زیرشانه با ترکیبی از نانو الیاف سلولزی و نانو الیاف لیگنوسلولزی

جعفر ابراهیم پور کاسمانی[1*]، احمد ثمریها[2]

۱ نویسنده مسئول، دانشیار، گروه مهندسی چوب و کاغذ، واحد سوادکوه، دانشگاه آزاد اسلامی، سوادکوه، ایران، پست الکترونیک: jafar_kasmani@yahoo.com
۲- استادیار، گروه صنایع چوب، دانشگاه ملی مهارت، تهران، ایران

تاریخ دریافت: خرداد ۱۴۰۳ تاریخ پذیرش: مهر ۱۴۰۳

چکیده

بیان مساله و اهداف: استفاده از فناوری‌های نوین مانند به کارگیری نانو ذرات در بهبود کیفیت تولید کاغذ بادوام، افق جدیدی به وجود آورده است. به این منظور در این تحقیق، به بررسی و مقایسه کاغذهای بادوام ساخته شده از خمیرکاغذ پنبه و زیرشانه با ترکیبی از نانو الیاف سلولزی و نانو الیاف لیگنوسلولزی پرداخته شده است. هدف اصلی این مطالعه، ارزیابی تأثیر نانو الیاف بر خواص فیزیکی و مکانیکی کاغذهای ساخته شده از پنبه و زیرشانه و شناسایی پتانسیل‌های بهبود کیفیت و عملکرد آنهاست.

مواد و روشها: در این بررسی خمیرکاغذ پالایش شده الیاف پنبه، الیاف زیرشانه، نانو الیاف سلولزی، نانو الیاف لیگنوسلولزی از یک کارخانه‌ی تولید کاغذ بادوام تهیه و سپس کاغذهای دست‌ساز ۶۰ گرمی ساخته شد. در نهایت، ریخت_شناسی الیاف و خواص فیزیکی و مکانیکی کاغذهای ساخته شده مطابق با استاندارد مورد ارزیابی قرار گرفتند..

نتایج: نتایج به¬دست آمده نشان داد شاخص مقاومت به کشش کاغذ تهیه شده از ترکیب ۵ درصد نانو الیاف سلولزی و ۱ درصد نشاسته حدود ۸۳ درصد بیشتر از کاغذ تهیه شده از ۱۰۰ درصد خمیرکاغذ زیرشانه بوده است. شاخص مقاومت به ترکیدن کاغذ در ترکیب ۵ درصد نانو الیاف سلولزی و ۱ درصد نشاسته نسبت به ترکیب ۱۰۰ درصد خمیرکاغذ زیر شانه ۷۵ درصد بیشتر بود. شاخص مقاومت به پاره شدن کاغذ تهیه شده از ترکیب ۵ درصد نانو الیاف سلولزی و ۰/۱ درصد پلی‌آکریلامید نسبت به ترکیب ۵ درصد نانو الیاف سلولزی و ۰/۱ درصد پلی‌آکریلامید خمیرکاغذ زیر شانه ۱۷ درصد بیشتر بود. صافی سطح کاغذ تهیه شده از ترکیب ۵ درصد نانو الیاف لیگنوسلولزی و ۰/۱ درصد پلی‌آکریلامید خمیرکاغذ زیرشانه نسبت به ترکیب ۵ درصد نانو الیاف لیگنوسلولزی و ۱ درصد نشاسته حدود ۲۸ درصد بیشتر بود. تخلخل کاغذ تهیه شده از ترکیب ۱۰۰ درصد خمیرکاغذ حاصل از الیاف پنبه زیر شانه نسبت به ترکیب ۵ درصد نانو الیاف لیگنوسلولزی و ۱ درصد نشاسته حدود ۴۳۳ درصد بیشتر بود. ماتی کاغذ تهیه شده از ترکیب ۵ درصد نانو الیاف لیگنوسلولزی و ۰/۱ درصد پلی‌آکریلامید نسبت به ترکیب ۱۰۰ درصد خمیرکاغذ حاصل از الیاف پنبه زیر شانه ۶ درصد بیشتر بود. روشنی کاغذ تهیه شده از ترکیب ۵ درصد نانو الیاف سلولزی و ۱ درصد نشاسته نسبت به ترکیب ۵ درصد نانو الیاف لیگنوسلولزی و ۱ درصد نشاسته ۱۸ درصد بیشتر بود.

نتیجه‌گیری: این مطالعه نشان داد که ترکیب نانو الیاف با خمیرکاغذهای حاصل از پنبه و زیرشانه می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی خواص فیزیکی و مکانیکی کاغذهای بادوام را بهبود بخشد. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که مقاومت به کشش و مقاومت به ترکیدن در کاغذهایی که حاوی نانو الیاف سلولزی بودند، به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای بالاتر از کاغذهای ساخته‌شده تنها از خمیرکاغذ زیرشانه است. همچنین، مقاومت به پاره شدن با استفاده از ترکیب نانو الیاف سلولزی و پلی‌آکریلامید بهبود یافته که نشان‌دهنده افزایش کارایی این ترکیب در افزایش استحکام کاغذ است.از سوی دیگر، صافی سطح و ماتی کاغذهای حاوی نانو الیاف لیگنوسلولزی نسبت به ترکیب‌های دیگر بهبود یافته بود که می‌تواند به کیفیت

ظاهری و چاپ‌پذیری کاغذ کمک کند. تخلخل کاغذهای تولیدشده از الیاف پنبه زیرشانه به‌طور قابل‌توجهی بیشتر از ترکیب‌های نانو الیاف بود، که ممکن است بر روی جذب جوهر و سایر ویژگی‌های عملکردی تأثیر بگذارد. همچنین، روشنی کاغذها نیز با استفاده از نانو الیاف سلولزی افزایش یافت که می‌تواند بر روی استفاده‌های خاص مانند چاپ و بسته‌بندی تأثیرگذار باشد. به‌طور کلی، این تحقیق تأکید می‌کند، کاغذ بادوام تهیه شده از زیر شانه دارای ویژگی¬های مناسبی بوده است، استفاده از آن به صورت کامل یا بخش زیادی از خمیرکاغذ مورد نیاز در تولید انواع کاغذهای بادوام توصیه می‌گردد.

واژه های کلیدی: کاغذ بادوام، نانو الیاف لیگنوسلولزی، الیاف پنبه، الیاف زیرشانه، ریخت‌شناسی الیاف، خواص فیزیکی- مقاومتی کاغذ.

مقدمه

کاغذ بادوام، کاغذی است که در شرایط استفاده، کیفیت اولیه‌اش را تا حدود زیادی حفظ نماید. نانو فناوری یکی از مهم‌ترین عوامل رشد و پیشرفت اقتصاد جهانی طی سال‌های اخیر است و قابلیت‌های جدیدی را برای مواد، ابزار و سامانه‌ها به وجود آورده و انقلابی را در فناوری و صنایع ایجاد کرده است [۱]. از نانو مواد افزودنی می‌توان برای بهبود خواص خمیرکاغذ و کاغذ تهیه شده از الیاف ضعیف‌تر استفاده کرد. ایده استفاده از نانو مواد به منظور افزایش عملکرد کاغذ و مقوا، تمام محدوده خواص ویژگی‌های کاربردی کاغذ، یعنی از بهبود خواص نوری تا تقویت خواص ممانعتی نسبت به آب و هوا و تقویت خواص مکانیکی و مقاومتی را پوشش می‌دهد [۲]. افزودن نانو فیبر به کاغذ و مقواهای معمول، امکان تولید محصولاتی لایه‌ای و همچنین پوشش‌دهی کاغذ با مواد نانو ساختار را فراهم می‌آورد. در این میان، نانو مواد زیست‌پایه، به‌ویژه نانو مواد پایه سلولزی، به دلیل خواص مقاومتی و ایمنی ویژه‌ای که دارند و همچنین به خاطر قابلیت زیست‌تخریب‌پذیری‌شان، اهمیت خاصی پیدا کرده‌اند [۳]. Henriksson و همکاران از نانو فیبر یل‌های سلولزی چوب برای تولید نانو کاغذهای سلولزی متخلخل با سختی زیاد استفاده کردند. آن‌ها موفق به ساخت نوعی نانو کاغذ با مقاومت کششی ۲۱۴Mpa شدند که این مقاومت از مقاومت کششی چدن بیشتر و در حد مقاومت کششی فولاد است [۴]. کاربرد فناوری نانو در صنایع سلولزی یک زمینه تحقیقاتی نوظهور است. به دلیل خواص ویژه و زیست‌تخریب‌پذیر بودن نانو مواد، در سال‌های اخیر به‌صورت خالص یا به‌عنوان تقویت‌کننده ویژگی‌های مقاومت، ویژگی‌های ممانعتی ویژگی‌های فیزیکی و اندودها در کاغذ استفاده شده‌اند [۵]. نانو الیاف سلولزی در واقع همان واحدهای ساختاری سلولز متشکل از نانوفیبریل و فیبر یل‌های اولیه‌اند که طی فرآیندهای مختلف به‌صورت منفرد یا چسبیده به هم نانو ساختارهایی به قطر کمتر از ۱۰۰ نانومتر را تشکیل می‌دهند [۶]. این ذرات پس از افزوده شدن به کاغذ سبب کاهش خلل و فرج آن شده و می‌تواند مقاومت کاغذ را افزایش دهد. البته توسعه اتصالات و تشکیل پیوندهای هیدروژن بیشتر به هنگام خشک‌کردن کاغذها می‌تواند عامل بروز این نتایج باشد [۷]. افزودن نانو سلولز به کاغذ و مقواهای معمول، تولید محصول لایه‌ای و پوشش دهی کاغذ با مواد نانو ساختار قابل انجام است. نانو مواد زیست‌پایه در این بین به‌ویژه نانو مواد سلولزی به سبب خواص ویژه مقاومتی و ایمنی در کاربرد به‌واسطه زیست‌تخریب‌پذیر بودن اهمیت خاصی دارند [۸]. جداسازی و حذف الیاف بلند ذرات NFC و تأثیر آن بر مقاومت کششی کاغذ تولیدی از خمیرکاغذ شیمیایی رنگ‌بری شده مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج آزمایش‌های به‌عمل‌آمده نشان داد که افزودن ذرات NFC بدون الیاف بلند در مقایسه با افزودن ذرات بدون تیمار NFC، مقاومت کششی کاغذ تولیدی را به میزان قابل‌توجهی افزایش می‌دهد [۹]. یوسفی و همکاران (۲۰۱۱) اثر نانو فیبر سلولزی را بر مقاومت مکانیکی کاغذ ساخته شده از ساقه کلزا موردبررسی قرار دادند. نتایج

نشان داد که خصوصیات مکانیکی نانو کاغذ در مقایسه با میکرو کاغذ توسعه یافت. علاوه بر این مقدار پیوند هیدروژنی و درگیری فیبرها با یکدیگر نیز افزایش یافتند [۱۰].

الیاف پنبه در مقایسه با سایر الیاف طبیعی از استحکام خوبی برخوردارند و در حالت مرطوب نیز حدوداً ۲۰ تا ۳۰ درصد به این مقدار افزوده می‌شود. تجربه نشان داده که در صنعت کاغذسازی با الیاف پنبه، هر چه متوسط طول الیاف پنبه کوتاه‌تر و قطر آن بیشتر باشد در فرآیند تولید از لحاظ (تمیز سازی، فرآوری الیاف، پالایش، رنگ‌بری، مصرف مواد شیمیایی و...) مناسب‌تر است. ازاین‌رو الیاف پنبه زیرشانه کارخانه‌های نساجی (برای پنبه‌های الیاف بلند شانه کشی انجام می‌شود) کارایی بهتری نسبت به پنبه خام (الیاف بدون شانه کشی) دارند. به دلیل مصرف کم مواد شیمیایی در رنگ‌بری این الیاف، ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی کاغذهای ساخته شده با الیاف زیر شانه اغلب برابر و بعضی موارد بیشتر از کاغذهای بادوام ساخته شده از پنبه خام است؛ که این فاکتور در ساخت کاغذهای با دوام فوق العاده اهمیت دارد [۱۱].

آنچه مسلم است برای تولید کاغذهای بادوام باید از مواد اولیه‌ی مرغوب استفاده نمود. در کارخانه‌های ریسندگی بعد از باز کردن عدل‌های پنبه و جدا نمودن دانه‌های آن، پنبه‌هایی که دارای طول الیاف بلند هستند معمولاً برای تهیه نخ‌های مرغوب به کار می‌روند به همین جهت آن را از مسیر چنگک‌های سوزنی عبور می‌دهند تا الیاف کوتاه و زبر از آن جدا شوند به این عمل شانه کردن الیاف پنبه گویند. این الیاف در صنعت نساجی به دلیل کوتاهی الیاف و زبری آن چندان مناسب نیستند و در مقایسه با الیاف بلند ارزش اقتصادی کمی دارند. ولی از نظر طول و قطر در محدوده‌ای قرار دارند که در صنایع خمیرکاغذ و به‌خصوص ساخت خمیرکاغذهای بادوام به‌عنوان ماده اولیه مناسب می‌توان استفاده نمود. استفاده از الیاف زیرشانه علاوه بر اینکه اثرات مخرب برداشت بی-رویه چوب را از جنگل‌ها کاهش می‌دهد، ولی با توجه به مقاومت ذاتی و تمیزی ظاهری الیاف آن موجب شده تا مورد توجه تولیدکنندگان کاغذهای خاص قرار گیرد؛ بنابراین هدف اصلی این پژوهش ساخت کاغذ بادوام از الیاف پنبه و الیاف زیرشانه با استفاده از نانو الیاف سلولزی و نانو الیاف لیگنوسلولزی و در نهایت مقایسه ویژگی‌های کاغذهای ساخته شده از آن‌ها است.

مواد و روش‌ها

مواد

در این بررسی خمیرکاغذ پالایش شده الیاف پنبه، الیاف زیرشانه و خمیرکاغذ شیمیایی پالایش شده (الیاف بلند و الیاف کوتاه) از یک کارخانه‌ی تولید کاغذ بادوام تهیه و به آزمایشگاه انتقال یافت. خمیرکاغذهای حاصل تا غلظت ۱۵-۱۰ درصد آب‌گیری شد و سپس درون کیسه-های پلاستیکی در بسته قرارگرفته و تا زمان مصرف در داخل یخچال نگهداری شد. نانو سلولز از شرکت نانو نوین پلیمر تهیه شد. نانو سلولز این شرکت با استفاده از نیروهای مکانیکی (مکانیسم بالا به پایین) از طیف وسیعی از مواد اولیه تولید گردید. متوسط قطری نانو مواد کمتر از ۵۰ نانومتر است .نانو الیاف لیگنوسلولزی (NLCF) از شرکت نانو نوین پلیمر تهیه شد. نانو الیاف لیگنوسلولزی این شرکت با استفاده از روش مکانیکی سوپر آسیاب از خمیرکاغذ شیمیایی – مکانیکی (CMP) رنگ‌بری نشده کارخانه چوب و کاغذ مازندران تهیه شد. میانگین قطری نانو الیاف لیگنوسلولزی ۴۸ نانومتر گزارش‌شده است. نشاسته کاتیونی مورد استفاده در این پژوهش دارای pH حدود ۶، درجه استخلاف (D.S) حدود mol/mol ۰/۰۳۵، میزان پروتئین ۱/۵ درصد، نیتروژن ۰/۲۵ درصد و رطوبت نیز ۱۰ درصد بر اساس وزن مرطوب بود. برای تهیه محلول نشاسته با غلظت gr/c ۰/۵ درصد (یعنی ۰/۵ گرم نشاسته خالص در ۱۰۰ سی‌سی محلول آب و نشاسته)، مقدار نشاسته ناخالص مورد نیاز با در نظر گرفتن درصد رطوبت تعیین شد. مقدار ناخالص تعیین شده در یک ارلن ریخته و حجم آن با آب مقطر به ۱۰۰ رسید. دمای داخل ارلن طی هم زدن توسط دماسنج کنترل و بر روی درب ارلن نیز یک ورقه فویل برای جلوگیری از تبخیر آب قرار داده شد. با قرار دادن ارلن روی هیتر در مدت ۳۰ دقیقه دما به‌آرامی به ۹۰ درجه سانتی‌گراد رسیده و سپس به مدت ۳۰ دقیقه در این دما نگهداری گردید. محلول نشاسته حاصل هر روز به صورت تازه آماده و مورد مصرف قرار

گرفت تا از تغییرات ویسکوزیته و غلظت ناشی از اثرات محیطی جلوگیری شود.

پلی‌آکریلامید کاتیونی با وزن مولکولی g/mol ۳۵۹۱۸۸ در آزمایشگاه سنتر و استفاده شد. با توجه به نسبت بسیار کم مصرف پلی‌آکریلامید و دشواری نمونه-گیری از این ماده نیز محلول یک درصد تهیه شد. مقدار ۰/۳ درصد بر مبنای وزن خشک خمیر از محلول یک درصدی پلی‌آکریلامید به خمیرکاغذ آماده شده اضافه گردید.

روش‌ها

پس از تهیه خمیرکاغذ، کاغذ با شرایط مندرج در جدول ۱ تهیه گردید.

جدول ۱- کدها و شرایط تیمارها

کد تیمار	خمیرکاغذ پنبه	خمیرکاغذ حاصل از الیاف پنبه زیر شانه	نانو الیاف سلولزی	نانو الیاف لیگنوسلولزی	نشاسته کاتیونی	پلی‌آکریلامید کاتیونی
C	۱۰۰	۰	۰	۰	۰	۰
CNS	۹۴	۰	۵	۰	۱	۰
CNP	۹۴/۹	۰	۵	۰	۰	۰/۱
CNLS	۹۴	۰	۰	۵	۱	۰
CNLP	۹۴/۹	۰	۰	۵	۰	۰/۱
BC	۰	۱۰۰	۰	۰	۰	۰
BCNS	۰	۹۴	۵	۰	۱	۰
BCNP	۰	۹۴/۹	۵	۰	۰	۰/۱
BCNLS	۰	۹۴	۰	۵	۱	۰
BCNLP	۰	۹۴/۹	۰	۵	۰	۰/۱

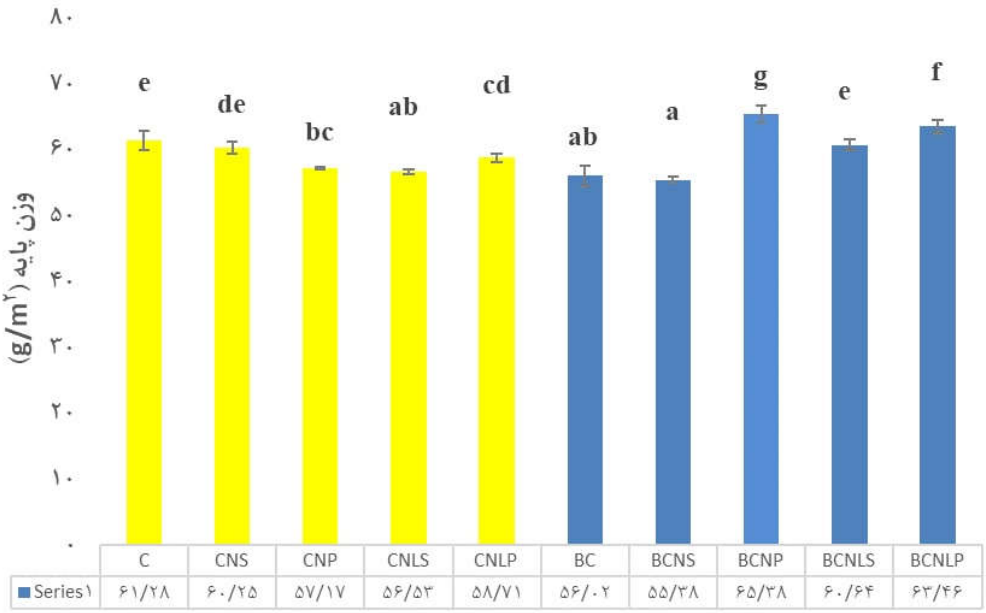
در مجموع در این پژوهش، ۱۰ تیمار با فرمول‌بندی متفاوت و هرکدام با ۱۰ تکرار نمونه ساخته شدند.

اندازه‌گیری و ارزیابی خواص کاغذ

خواص فیزیکی (گراماژ، ضخامت، تخلخل، صافی سطح)، خواص مکانیکی (شاخص مقاومت به کشش، مقاومت به تا خوردگی، شاخص مقاومت به ترکیدن، شاخص مقاومت به پاره شدن) و خواص نوری شامل (روشنی، ماتی) کاغذ ساخته شده مطابق با استانداردهای TAPPI، اندازه‌گیری شدند. تصاویر میکروسکوپی FESEM در مرکز پژوهش متالورژی رازی از سطح نمونه‌های شاهد و پوشش داده شده به‌وسیله دستگاه میکروسکوپ الکترونی گسیل میدانی مدل Mira 3-XMU انجام گردید . طرح آزمایشی مورد استفاده در این تحقیق، از نوع کاملاً تصادفی بوده و جهت پردازش نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌ها از نرم‌افزار SPSS (نسخه ۲۳) استفاده شد. به‌منظور تجزیه‌وتحلیل داده‌ها از تجزیه واریانس یک‌طرفه و جهت مقایسه میانگین‌ها از آزمون دانکن در سطح اعتماد آماری ۹۹ درصد استفاده شد.

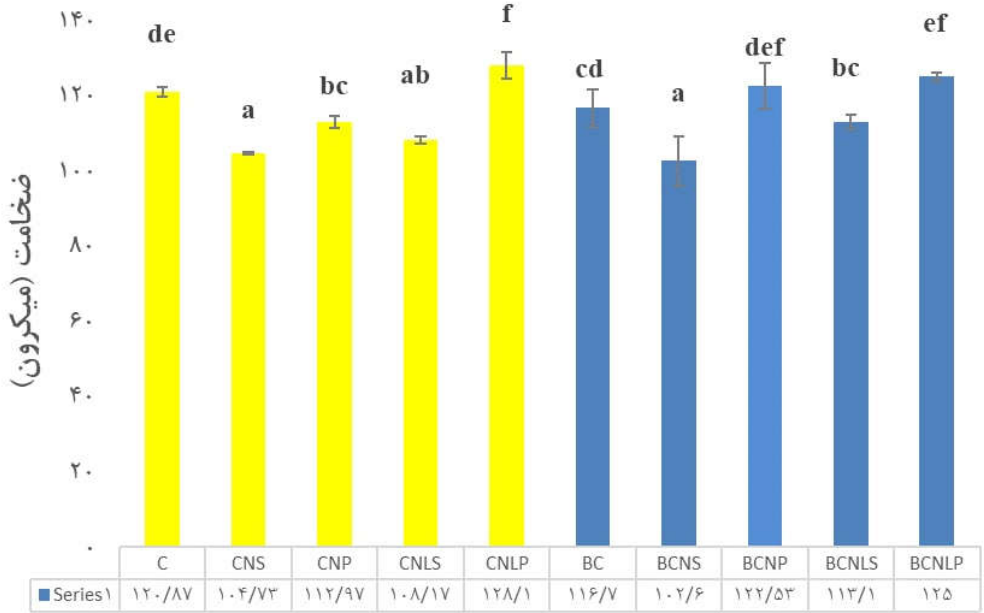
نتایج و بحث

نتایج آزمون تجزیه واریانس نشان داد که بین مقادیر وزن پایه، ضخامت، صافی سطح، تخلخل، شاخص مقاومت کششی، شاخص مقاومت به ترکیدن، شاخص مقاومت به پارگی، مقاومت به تاخوردگی، ماتی و روشنی در سطح اعتماد ۹۵ و ۹۹ درصد از نظر آماری اختلاف معنی‌دار وجود دارد. آزمون گروه‌بندی دانکن، سطوح مختلف مقادیر میانگین وزن پایه کاغذ را در ۷ گروه مختلف قرار داد (شکل ۱). بیش‌ترین وزن پایه مربوط به ۵ درصد نانو الیاف سلولزی و ۰/۱ درصد پلی‌آکریلامید برابر ۶۵/۳۸ گرم بر متر مربع و کمترین مقدار آن مربوط به ۵ درصد الیاف سلولزی و ۱ درصد نشاسته برابر ۵۵/۳۸ گرم بر متر مربع می‌باشد.



شکل ۱- مقایسه میانگین وزن پایه کاغذهای مختلف

آزمون گروه‌بندی دانکن، سطوح مختلف مقادیر میانگین ضخامت کاغذ را در ۶ گروه مختلف قرار داد. بیش‌ترین ضخامت مربوط به ۵ درصد الیاف لیگنوسلولزی و ۰/۱ درصد پلی‌آکریلامید برابر ۱۲۸/۱ میکرون و کمترین مقدار آن مربوط به ۵ درصد الیاف سلولزی و ۱ درصد نشاسته برابر ۱۰۲/۶ میکرون می‌باشد (شکل ۲).

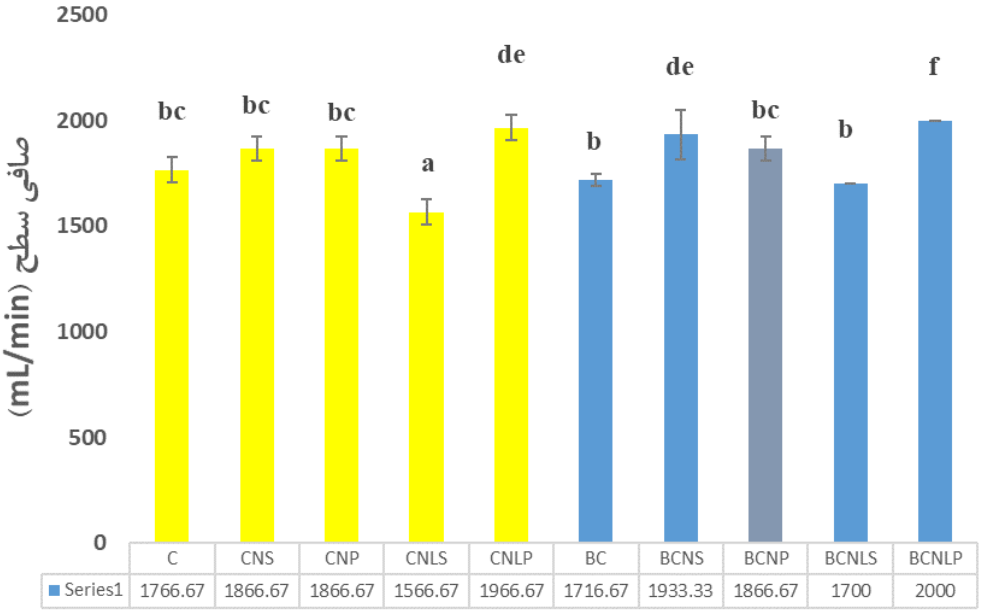


شکل ۲- مقایسه میانگین ضخامت کاغذهای مختلف

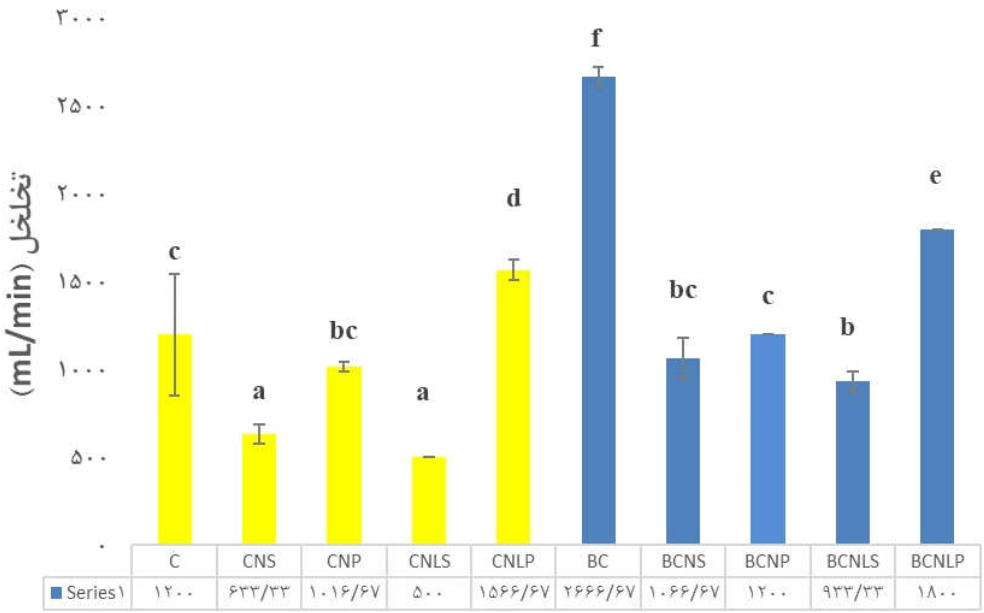
آزمون گروه‌بندی دانکن، سطوح مختلف مقادیر میانگین صافی سطح و تخلخل کاغذ را در ۶ گروه مختلف قرار داد (شکل ۳). بیش‌ترین صافی سطح مربوط به ۵ درصد الیاف لیگنوسلولزی و ۰/۱ درصد پلی‌آکریلامید برابر

۲۰۰۰ میلی‌لیتر بر دقیقه و کمترین مقدار آن مربوط به ۵ درصد الیاف لیگنوسلولزی و ۰/۱ درصد نشاسته برابر ۱۵۶۶/۶۷ میلی‌لیتر بر دقیقه می‌باشد (شکل ۳ الف). کمترین تخلخل مربوط به ۵ درصد الیاف لیگنوسلولزی و ۱ درصد نشاسته برابر ۵۰۰ میلی‌لیتر بر دقیقه و بیشترین مقدار آن مربوط به ۱۰۰ درصد خمیرکاغذ زیرشانه برابر ۲۶۶۶/۶۷ میلی‌لیتر بر دقیقه می‌باشد (شکل ۳ ب).

در کاغذ تهیه شده از الیاف پنبه، منافذ و ناهمواری کمتری مشاهده گردید که صافی سطح بیشتر و تخلخل کمتر مؤید این امر می‌باشد. کاغذهای تهیه شده به همراه نشاسته کاتیونی نیز دارای صافی سطح بیشتر و تخلخل کمتر بود. کاغذ تهیه شده از الیاف زیرشانه خلل و فرج بیشتری داشت که نشان دهنده صافی سطح کمتر و تخلخل بیشتر بود. تخلخل یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های مؤثر در جذب مرکب است. مرکب با نیروی موئینگی در منافذ و فضاهای بین لیفی کاغذ نفوذ می‌کند و کاغذ اندود شده نفوذ مرکب به درون کاغذ را بیشتر از کاغذ اندود نشده کنترل می‌کند. با فرآیند پوشش دهی با نانو سلولز منافذ کاغذ کاهش می‌یابد و با کاهش منافذ مقاومت در عبور هوا افزایش می‌یابد [۱۲]. در صنعت کاغذ معمولاً از کیفیت سطح کاغذ تحت عنوان پرداخت سطح یاد می‌شود که ممکن است به صورت‌های مختلف نام‌گذاری شود. صافی خوب در کاغذ نیازمند عدم حضور حفرات بین لیفی، اثرات توری و نمدی، برآمدگی‌ها و مواد خارجی و مناطق تخریب شده در کاغذ می‌باشد.



الف

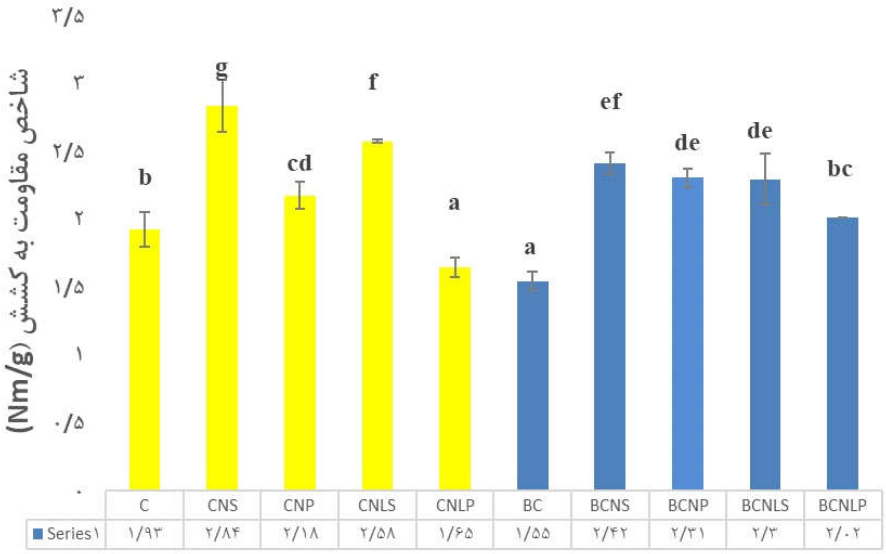


ب

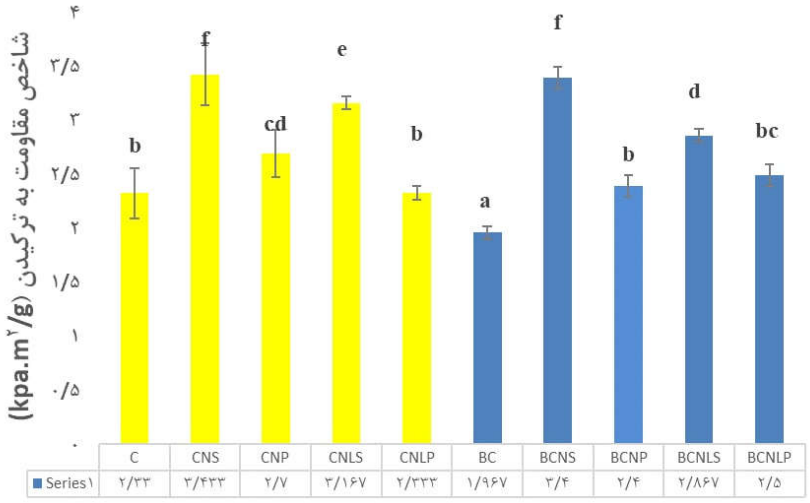
شکل ۳- مقایسه میانگین الف) صافی سطح و ب) تخلخل کاغذهای مختلف

بیشترین شاخص مقاومت به کششی مربوط به ۵ درصد الیاف لیگنوسلولزی و ۱ درصد نشاسته به مقدار ۲/۸۴ Nm/g بود (شکل ۴ الف). کمترین شاخص مقاومت به ترکیدن مربوط به ۱۰۰ درصد خمیرکاغذ زیرشانه برابر ۱/۹۶۷ و بیشترین مقدار آن مربوط به ۵ درصد الیاف سلولزی و ۱ درصد نشاسته برابر ۳/۴۳۳ می‌باشد (شکل ۴ ب). در این تحقیق کاغذهای ساخته شده از نانو الیاف سلولزی همراه نشاسته دارای بیشترین شاخص مقاومت به کشش و شاخص مقاومت به ترکیدن بود که علت آن می‌تواند این موضوع باشد که بر اثر کوچک‌تر شدن ابعاد نانو سلولز سطح ویژه الیاف سلولزی افزایش می‌یابد. این به معنی قرار گرفتن تعداد بیشتر گروه‌های در دسترس هیدروکسیل در سطح نانو فیبرهاست که توانایی تشکیل پیوند هیدروژنی را با نانو الیاف سلولزی مجاور دارند و نهایتاً سبب تشکیل شبکه‌ای از نانو فیبرها می‌شوند که موجب افزایش این مقاومت می‌گردد. Hii و همکاران (۲۰۱۲) در تصاویر میکروسکوپ الکترونی گرفته شده گزارش دادند که نانو الیاف سلولزی به اتصال بین پرکننده و ذرات ریز الیاف کمک کرده و باعث کاهش تخلخل در کاغذ و همچنین افزایش مقاومت در مقابل عبور هوا و اتصال داخلی بهتر در ورق کاغذ می‌شود [۱۲]. افزایش مقاومت کششی کاغذ با افزودن ۱۰ درصد نانو الیاف سلولزی به سوسپانسیون خمیرکاغذ کاتیونی شده با پلی اکریل آمید کاتیونی توسط حسن جان زاده و همکاران (۱۳۹۳) نیز گزارش‌شده است. در این تحقیق شاخص مقاومت کششی و ترکیدن به ترتیب ۱۸/۶۶ و ۱۸/۱۲ درصد افزایش داشته است. همچنین این شاخص‌ها در خمیرکاغذ کاتیونی شده با نشاسته کاتیونی، در بیشترین سطح افزودن نانو الیاف سلولزی (۱۰ درصد) به ترتیب ۱۹/۳۵ و ۱۹/۲۴ درصد بهبود یافته است [۱۳]. رضایتی و همکاران (۲۰۱۳)، اقدام به استفاده از نانو الیاف سلولزی در ساخت کاغذ نموده و گزارش دادند که استفاده از حدود ۶ درصد نانو الیاف سلولزی بهبود مقاومت کششی معادل استفاده از ۲۰ درصد خمیرکاغذ الیاف بلند در ساخت کاغذ از خمیرکاغذ کرافت پهن برگان فراهم می‌سازد [۱۴]. همچنین Sehaqui و همکاران (۲۰۱۳) در گزارشی مشخص نمودند که باقی ماندن نرمه‌ها و نانو الیاف در فضای بین الیاف موجب کاهش تخلخل می‌گردد که در نتیجه آن اتصالات فیبر-فیبر و مقاومت کششی بهبود می‌یابد [۱۵].

مرادیان و همکاران (۲۰۱۶) در تحقیق خود گزارش دادند که برای تأمین مقاومت کششی مناسب کاغذ، استفاده از ۱ درصد نشاسته کاتیونی قابلیت جایگزینی با ۱۵ درصد خمیرکاغذ الیاف بلند را دارد اما به دلیل مشکلات فرآیندی ناشی از استفاده زیاد نشاسته قابل توصیه نیست. با این وجود، استفاده ترکیبی از نشاسته کمتر و نانو الیاف سلولزی دلالت بر قابلیت کاربردی آن جهت جایگزینی الیاف بلند وارداتی در تولید کاغذ از باگاس داشته است [۱۶]. تحقیقات Sodifi و همکاران (۲۰۱۴) نشانگر این است که اضافه کردن نانو الیاف سلولزی با الیاف سلولزی و محلول الکترولیت با وزن مولکولی بالا باعث کاهش تلاطم سوسپانسیون و شکل‌گیری بهتر کاغذ، افزایش مقاومت کاغذ با بهبود اتصال بین الیاف و ترکیبات دیگر در دوغاب خمیرکاغذ می‌شود [۱۷]. در تیمار مربوط به ۵ درصد نانو الیاف سلولزی و ۱ درصد نشاسته خمیرکاغذ پنبه شاخص مقاومت ترکیدن بیشترین مقدار بود. افزودن نشاسته کاتیونی به خمیرکاغذ معمولاً موجب بهبود ویژگی‌های کاغذ تولیدی می‌شود؛ اما هر یک از آن‌ها محدودیت‌هایی را در سیستم تولید دارند که به دلیل مشکلات فرآیندی قابل توصیه نیست.



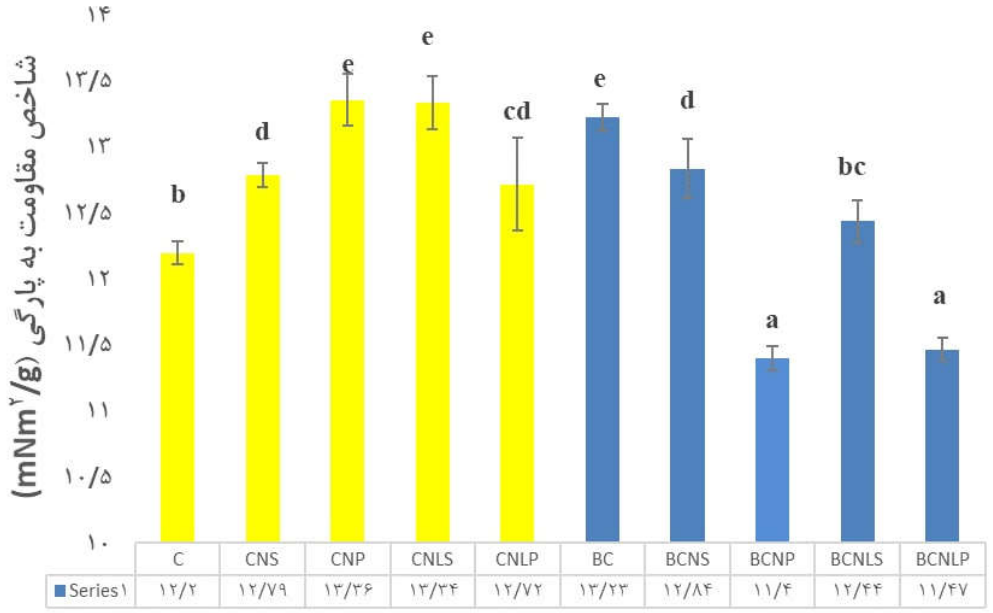
الف



ب

شکل ۴- مقایسه میانگین الف) شاخص مقاومت به کشش و ب) شاخص مقاومت به ترکیدن کاغذهای مختلف

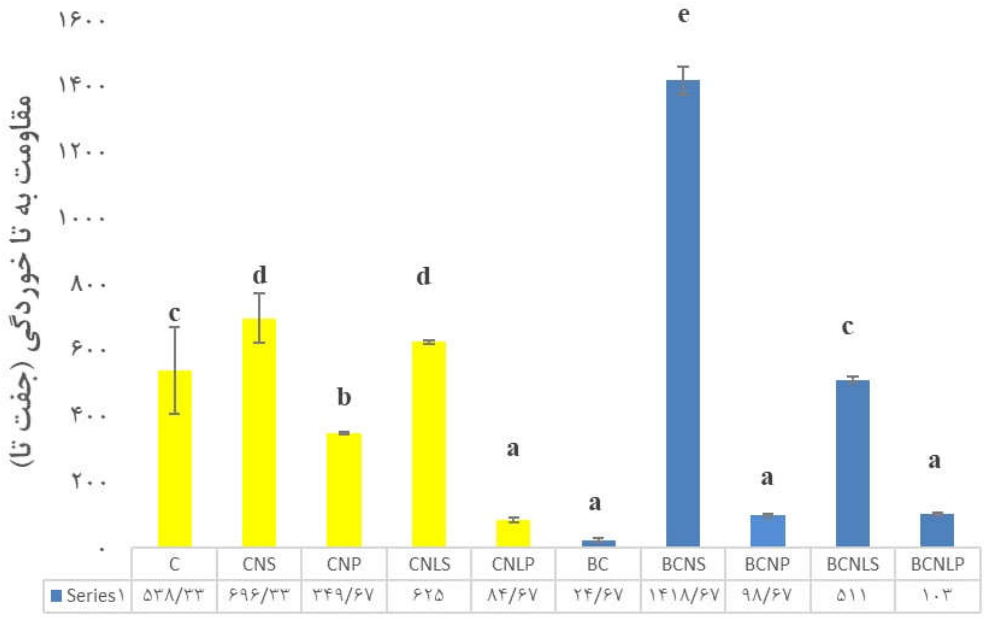
گروه‌بندی دانکن میانگین‌های شاخص مقاومت به پارگی تیمارهای مختلف را به تفکیک در ۵ گروه مجزا قرار داد. بیش‌ترین مقاومت به پارگی که در گروه e قرار دارد مربوط به ۵ درصد الیاف لیگنوسلولزی و ۱ درصد نشاسته است. همچنین ۵ درصد الیاف سلولزی و ۱ درصد پلی‌آکریلامید کمترین مقاومت به پارگی را ایجاد کرده است (شکل ۵). با افزایش درصد نانو الیاف سلولز مقاومت به پاره شدن کاغذ افزایش یافت در گزارش Vaysi and Vaghari 2021، کاهش مقاومت به پاره شدن در کاغذهای ترکیبی CMP و نانو فیبر سلولز گزارش‌شده است. در آن گزارش تغییرات در دو عامل مقاومت ذاتی الیاف و سطح پیوند هیدروژنی دلیل تغییرات و شدت این تغییرات در مقاومت به پارگی معرفی شده‌اند. در توجیه رفتار مقاومت به پاره شدن کاغذهای ترکیبی این‌طور استدلال می‌شود که نانو سلولز با افزایش سطح پیوند بین کاغذها موجب افزایش مقاومت می‌شود. از سوی دیگر افزودن NFC و قرارگیری آن در بین الیاف و ایجاد ممانعت در پیوند مستقیم الیاف با هم موجب افزایش مقاومت شبکه الیاف نسبت به تنش پارگی می‌شود [۲]. ترکیب ۵ درصد نانو الیاف لیگنوسلولزی و ۱ درصد نشاسته پنبه دارای بیشترین شاخص مقاومت به پاره شدن بود؛ که به دلیل نگهداشت بیشتر نرمه‌ها و نانو الیاف و افزایش پیوندهای ممکن شاخص مقاومت به پارگی کاغذ را بهبود می‌دهد. ترکیب ۵ درصد نانو الیاف سلولزی و ۰/۱ درصد پلی‌آکریلامید کمترین شاخص مقاومت به پاره شدن بود در واقع احتمالاً حضور پلی اکریل آمید در این ترکیب با به هم زدن شکل‌گیری خمیرکاغذ به دلیل کلوخه کردن آن شاخص مقاومت به پارگی را کاهش داده است. Hadilam و همکاران (۲۰۱۳) گزارش دادند که با افزودن نانو الیاف سلولزی، مقاومت به پارگی کاغذها کاهش می‌یابد؛ به‌طوری که کمترین مقاومت به پارگی در نانو کاغذ مشاهده شد، ولی به‌رغم کاهش مقاومت به پارگی در کاغذهای ترکیبی با شرایط مذکور، این کاهش ازلحاظ آماری چندان معنی‌دار نبود [۳].



شکل ۵- مقایسه میانگین شاخص مقاومت به پارگی کاغذهای مختلف

گروه‌بندی دانکن میانگین‌های مقاومت به تاخوردگی را به ۵ گروه مستقل طبقه بندی کرده است (شکل ۶). کم‌ترین مقاومت به تاخوردگی مربوط به ۱۰۰ درصد خمیرکاغذ زیرشانه با میانگین ۲۴/۷ جفت تا در گروه a و بیشترین مقاومت به تاخوردگی به ۵ درصد الیاف سلولزی و ۱ درصد نشاسته با ۱۴۱۸/۷ جفت تا در گروه e است.

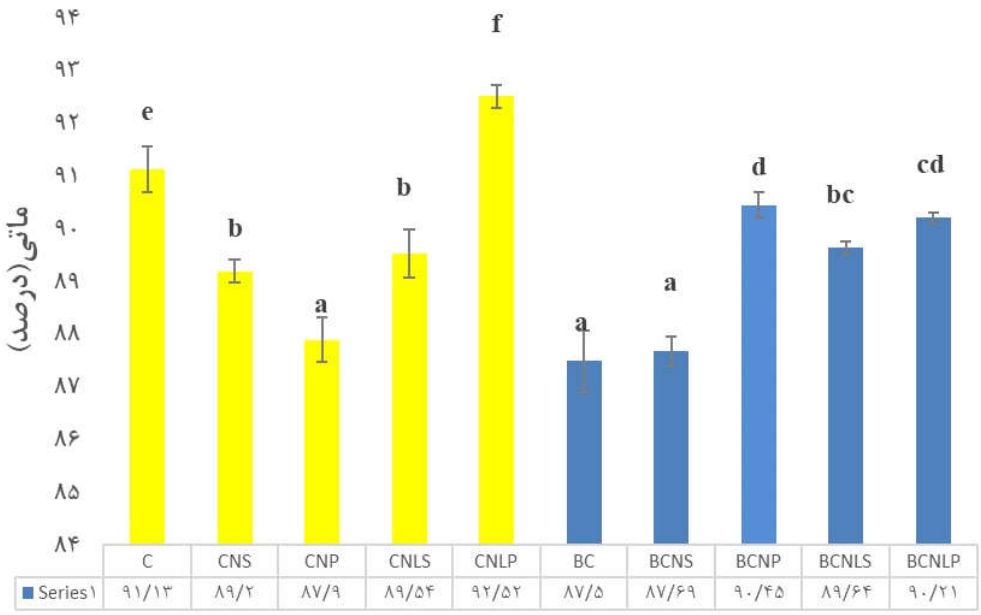
افزودن ۵ درصد نانو الیاف سلولزی و ۱ درصد نشاسته به خمیرکاغذ زیرشانه به دلیل افزایش سطح تماس و قابلیت پیوندیابی بیشتر باعث افزایش مقاومت به تاخوردگی شده است.



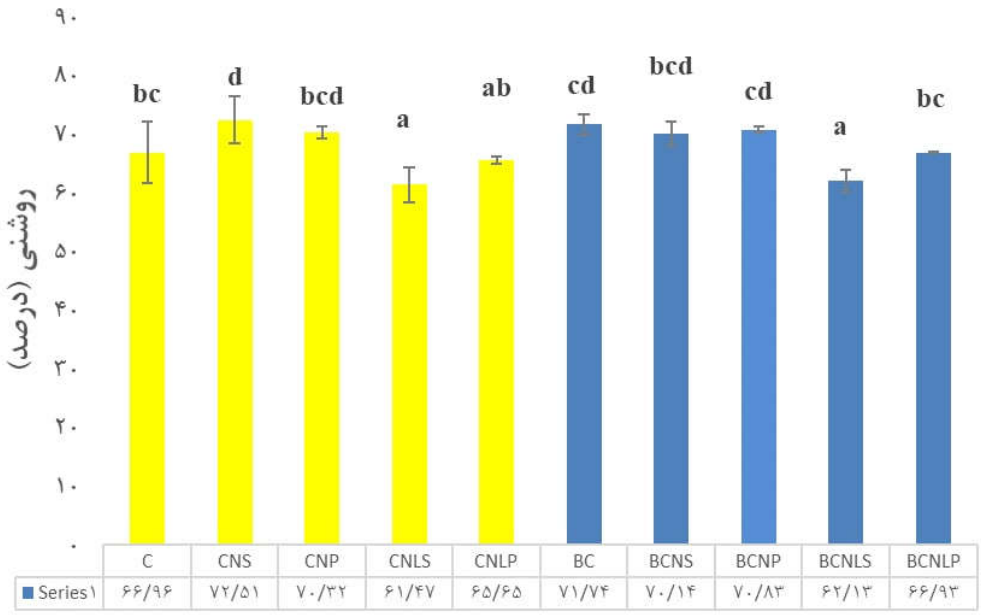
شکل ۶- مقایسه میانگین مقاومت به تاخوردگی کاغذهای مختلف

شکل ۷ الف، میانگین تغییرات مقاومت ماتی را برای هشت نوع خمیرکاغذ را نشان می‌دهد. گروه‌بندی دانکن میانگین‌های ماتی را در ۶ گروه قرار داد. کمترین ماتی مربوط به ۱۰۰ درصد خمیرکاغذ زیرشانه به مقدار ۸۷/۵ درصد بود که در گروه a قرار گرفت. گروه‌بندی دانکن میانگین‌های داده‌های روشنی تیمارهای فوق را در ۴ گروه قرار داد (شکل ۷ ب). با استفاده از ۵ درصد الیاف سلولزی و ۱ درصد نشاسته پنبه بیشترین روشنی حاصل شد. یک کاغذ کاملاً مات کاغذی است که کاملاً نسبت به عبور تمام نور مرئی، رسوخ ناپذیر باشد. کاغذ سیاهی که برای بسته‌بندی فیلم عکاسی بکار می‌رود را می‌توان مات نامید. همچنین اغلب کاغذهای مقوا برای همه مصارف مات هستند. ماتی با افزایش درصد نشاسته کاتیونی سیر صعودی داشته است و افزودن ۵ درصد نانو الیاف سلولزی افزایش ماتی را نشان داد. با افزودن پرکننده‌ها، ماتی افزایش می‌یابد زیرا تفرق و پراکنش نور افزایش می‌یابد. مهم‌ترین مشخصه مات‌کنندگی یک پرکننده، شاخص انکسار نور آن است که هرچه این میزان بیشتر باشد اثر مات‌کنندگی آن بیشتر است.

درجه روشنی کاغذ به مقدار روشنی مواد اولیه خمیرکاغذ، pH خمیرکاغذ، نـوع و مقـدار مواد افزودنی وابسته است [۱۸]. حضور نانو الیاف سلولزی باعث افزایش درجه روشنی کاغذها گردیده است. با اضافه شدن نانو الیاف سلولزی به‌ویژه در ترکیب با نشاسته و پلی‌آکریلامید به شبکه کاغذ و تغییر ساختار کاغذ، در نتیجه پر شدن فضاهای بین سلولی و افزایش اتصال بین الیاف، عبور نور افزایش یافته و درجه روشنی افزایش می‌یابد. در واقع افزایش حضور ذرات نانو سلولز در ساختار کاغذ سبب توسعه و بهبود سطح پیوند، کاهش خلل و فرج و کاهش ناهمواری سطح شده که همه این عوامل موجب شکست کمتر نور، افزایش انعکاس نور و افزایش روشنی کاغذ می‌شود.



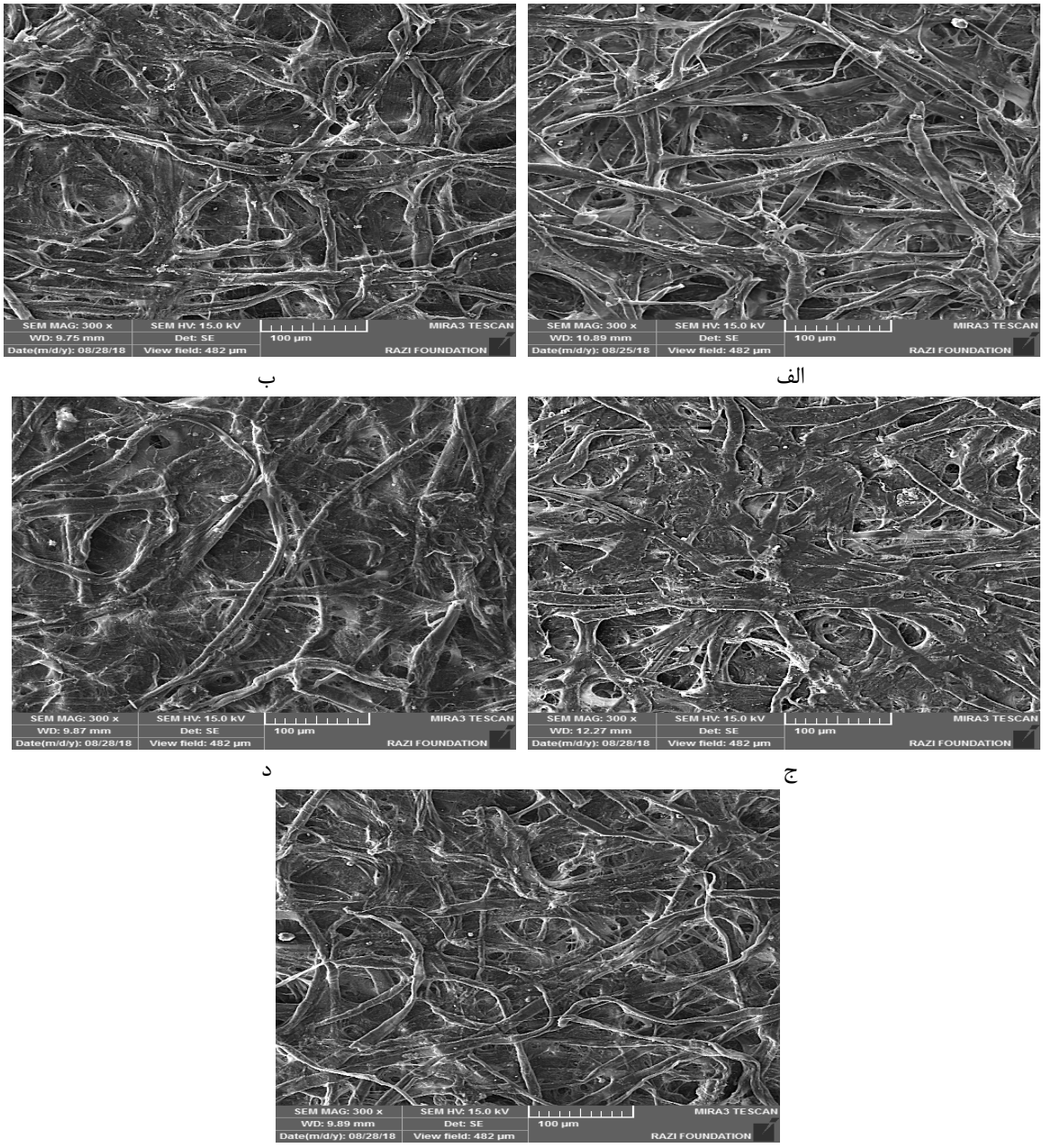
الف



ب

شکل ۷- مقایسه میانگین الف) ماتی و ب) روشنی کاغذهای مختلف

اشکال ۸ و ۹ ریزنگار میکروسکوپ الکترونی رویشی گسیل میدان FE-SEM را برای الیاف زیرشانه و پنبه، نانو الیاف لیگنوسلولزی و نانو الیاف لیگنوسلولزی، نشاسته کاتیونی و پلی‌آکریلامید را نشان می‌دهد. در کاغذ تهیه شده از الیاف پنبه، منافذ و ناهمواری کمتری مشاهده گردید که صافی سطح بیشتر و تخلخل کمتر مؤید این امر می‌باشد. همچنین، کاغذهای تهیه شده به همراه نشاسته کاتیونی دارای صافی سطح بیشتر و تخلخل کمتر بودند. کاغذ تهیه شده از الیاف زیرشانه خلل و فرج بیشتری داشت که نشان دهنده صافی سطح کمتر و تخلخل بیشتر است.

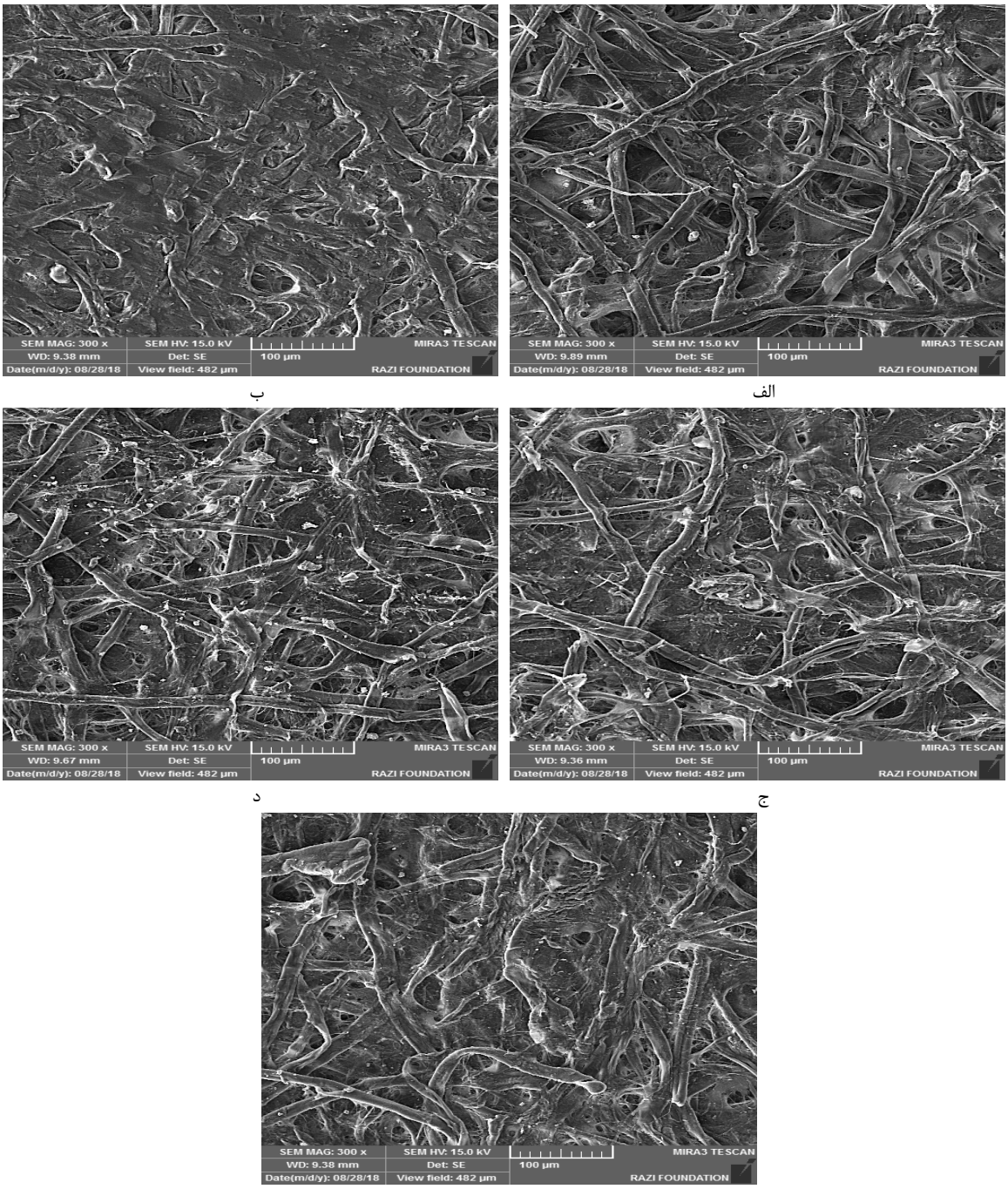


الف ب

ج د

ه

شکل ۸- سطح کاغذ حاصل از خمیرکاغذ، الف) ۱۰۰ درصد خمیرکاغذ پنبه، ب) ۵ درصد نانو الیاف سلولزی و ۱ درصد نشاسته از پنبه، ج) ۵ درصد نانو الیاف سلولزی و ۰،۱۰ درصد پلی‌آکریلامید از پنبه، د) ۵ درصد نانو الیاف لیگنوسلولزی و ۱ درصد نشاسته از پنبه، ه) ۵ درصد نانو الیاف لیگنوسلولزی و ۰،۱۰ درصد پلی‌آکریلامید از پنبه



شکل ۹- سطح کاغذ حاصل از خمیرکاغذ، الف) ۱۰۰ درصد خمیرکاغذ زیرشانه، ب) ۵ درصد نانو الیاف سلولزی و ۱ درصد نشاسته از زیرشانه، ج) ۵ درصد نانو الیاف سلولزی و ۰،۱۰ درصد پلی‌آکریلامید از زیرشانه، د) ۵ درصد نانو الیاف لیگنوسلولزی و ۱ درصد نشاسته از زیرشانه، ه) ۵ درصد نانو الیاف لیگنوسلولزی و ۰،۱۰ درصد پلی‌آکریلامید از زیرشانه

استفاده از فناوری‌های نوین مانند به کارگیری نانو ذرات در بهبود کمیت و کیفیت تولید کاغذ، افق جدیدی را برای کاغذسازان به وجود آورده است. امروزه با معرفی مواد افزودنی جدید و نانو ساختارها، تحقیقات در زمینه بهبود ویژگی‌های کاغذ به‌طور گسترده و مستمر در جریان بوده و این کار با هدف کاهش هزینه‌ها و دست‌یابی به

خواص مناسب‌تر انجام می‌شود. ازاین‌رو، تولید به‌صرفه کاغذ با روش‌های نوین و افزودن نانو ساختارها برای استفاده از خمیرکاغذ امری ضروری است. صنعت کاغذسازی و به‌خصوص تولید کاغذهای بادوام در کشورمان ایران به دلیل فاصله ایجاد شده بین صنعت و دانشگاه، نتوانسته به رشد مطلوب خود برسد. با توجه به شرایط موجود و عدم همکاری واحدهای تولیدی و آزمایشگاه‌های مربوطه، آنچه که ما توانستیم انجام دهیم گام کوچکی بود در این راستا که خوشبختانه در سطح آزمایشگاهی منجر به نتایج مطلوبی در فاکتورهای مختلف کاغذ گردید. مهم‌ترین ماده اولیه ساخت این نوع کاغذها الیاف سلولزی پنبه است که به دلیل داشتن خلوص (کریستالیته) زیاد در مقایسه با سایر الیاف طبیعی، دارای مقاومت و دوام ذاتی زیادی هستند به همین دلیل بیش از ۹۰ درصد کاغذهای بادوام برای چاپ اسکناس دنیا را از الیاف طبیعی پنبه می‌سازند؛ اما در تجارت جهانی به دلیل قیمت زیاد الیاف پنبه نسبت به الیاف سلولزی دیگر، قیمت تمام شده محصولات کاغذی ساخته شده با پنبه نیز بیشتر از سایر کاغذهای موجود در بازار است. با توجه به این موضوع و با توجه به اینکه در این تحقیق، کاغذ بادوام تهیه شده از زیر شانه دارای ویژگی‌های مناسبی بوده است، استفاده از آن به صورت کامل یا بخش زیادی از خمیرکاغذ مورد نیاز در تولید انواع کاغذهای بادوام توصیه می‌گردد.

نتیجه‌گیری

این پژوهش به مطالعه به بررسی ساخت کاغذ بادوام از الیاف پنبه و الیاف زیرشانه با استفاده از نانو الیاف سلولزی و نانو الیاف لیگنوسلولزی پرداخته است. نتایج نشان داد که افزودن ۵ درصد نانو الیاف سلولزی به همراه ۱ درصد نشاسته، باعث افزایش ۸۳ درصدی شاخص مقاومت به کشش و ۷۵ درصدی در شاخص مقاومت به ترکیدن کاغذ در مقایسه با کاغذ ۱۰۰ درصد خمیرکاغذ حاصل از الیاف پنبه زیر شانه شد. همچنین افزودن ۰/۱ درصد پلی‌آکریلامید به ۵ درصد نانو الیاف سلولزی، شاخص مقاومت به پاره شدن کاغذ را ۱۷ درصد افزایش داد. علاوه بر این، کاغذ حاوی ۵ درصد نانو الیاف سلولزی و ۱ درصد نشاسته، ۵۵۰۰ درصد مقاومت به تاشدن بیشتری نسبت به کاغذ ۱۰۰ درصد خمیرکاغذ حاصل از الیاف پنبه زیر شانه داشت. در مورد خصوصیات فیزیکی، افزودن ۰/۱ درصد پلی‌آکریلامید به ۵ درصد نانو الیاف لیگنوسلولزی، صافی سطح کاغذ را ۲۸ درصد بهبود داده است و افزودن ۱ درصد نشاسته به ۵ درصد نانو الیاف لیگنوسلولزی، تخلخل آن را نیز ۴۳۳ درصد افزایش داد. همچنین، درجه روشنی کاغذ حاوی ۵ درصد نانو الیاف سلولزی و ۱ درصد نشاسته، به میزان ۱۸ درصد بیشتر از کاغذ ۵ درصد نانو الیاف لیگنوسلولزی و ۱ درصد نشاسته بود.

منابع

[1] Borges, A. C., Eyholzer, C., Duc, F., Bourban, P. E., Tingaut, P., Zimmermann, T. Pioletti, D.P. and Månson, J. A. E. 2011. Nanofibrillated cellulose composite hydrogel for the replacement of the nucleus pulposus. Acta biomaterialia, 7(9), 3412-3421.

[2] Vaysi, R. and Vaghari, K. 2021. The Effect of Using Cationic Starch and Bentonite on Physical and Mechanical Properties of Old Recycled Pulp. Iranian Journal of Wood and Paper Science Research, 36(4), 404-416.

[3] Hadilam, M. M., Afra, E. and Yousefi, H., 2013. Effect of cellulose nanofibers on the properties of bagasse paper. Forest and Wood Products, 66(3), 351-366.

[4] Henriksson, M., Berglund, L. A., Isaksson, P., Lindström, T. and Nishino, T., 2008. Cellulose nanopaper structures of high toughness. Biomacromolecules, 9(6), 1579-1585.

[5] González Tovar, I., Boufi, S., Pèlach Serra, M. À., Alcalà Vilavella, M., Vilaseca Morera, F. and Mutjé Pujol, P., 2012. Nanofibrillated cellulose as paper additive in eucalyptus pulps. BioResources, 7(4), 5167-5180.

[6] Ghahramani, S., Hedjazi, S. and Mahdani, S., 2017. Development of poplar Kraft pulp strengths with cellulose nano fiber of rice straw. Forest and Wood Products, 70(1), 157-165.

[7] Karki, S., Gohain, M. B., Yadav, D. and Ingole, P. G., 2021. Nanocomposite and bio-nanocomposite polymeric materials/membranes development in energy and medical sector: A review. International Journal of Biological Macromolecules, 193, 2121-2139.

[8] Fathi, G. and Kasmani, J. E., 2019. Prospects for the preparation of paper money from cotton fibers and bleached softwood kraft pulp fibers with

nanofibrillated cellulose. BioResources, 14(2), 2798-2811.

[9] Rezayati Charani, P., Moradian, M. H. and 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(2), 2458-2465.

[10] Yousefi, H., Faezipour, M., Nishino, T., Shakeri, A. and Ebrahimi, G., 2011. All-cellulose composite and nanocomposite made from partially dissolved micro- and nanofibers of canola straw. Polymer Journal, 43(6), 559-564.

[11] Main, N. M., Talib, R. A., Ibrahim, R., Rahman, R. A. and Mohamed, A. Z., 2014. Suitability of coir fibers as pulp and paper. Agriculture and Agricultural Science Procedia, 2, 304-311.

[12] Hii, C., Gregersen, W., Chinga-Carrasco, G. and Eriksen, 2012. The effect of MFC on the pressability and paper properties of TMP and GCC based sheets. Nordic Pulp and Paper Research Journal, 27(2), 388-396.

[13] Hasanjanzadeh, H. H., S. Hedjazi. and S. Mahdavi 2014. "The effect of polyelectrolyte on rice straw soda-AQ pulp drainage and of rice straw. Iranian Journal of Wood and Paper Science Research, 29 (1), 170-181.

[14] Rezayati Charani, P., Dehghani-Firouzabadi, M., Afra, E., Blademo, Å., Naderi, A. and Lindström, T., 2013. Production of microfibrillated cellulose from unbleached kraft pulp of Kenaf and Scotch Pine and its effect on the properties of hardwood kraft: microfibrillated cellulose paper. Cellulose, 20, 2559-2567.

[15] Sehaqui, H., Berglund, L. A. and Zhou, Q., 2013. BIOREFINERY: Nanofibrillated cellulose for enhancement of strength in high-density paper structures. Nordic Pulp and Paper Research Journal, 28(2), 182-189.

[16] Moradian, M. H., Rezayati Charani, P. and Saadat Niya, M., 2016. Improving paper breaking length using cellulosic nanofibers in bagasse pulp. Forest and Wood Products, 69(3), 603-614.

[17] Sodifi, B. and Sharifi, H., 2021. Investigation of barrier properties of the coated and treated papers with polycaprolactone/cellulose nanocrystals/ZnO nanoparticles. Journal of food science and technology (Iran), 17(107), 91-105.

[18] Afra, A. Mohammadi, M. Sarayian, A. and Imani, R., 2015. Production of microbial nano-silver and its use in paper to improve its antibacterial properties. Forest and Wood Products Iranian Natural Resources, 68(3), 547 – 557. (In Persian).