فصلنامه علمی – پژوهشی تحقیقات علوم چوب و کاغذ ایران
جلد ۳۳ شماره ۴، صفحه ۶۰۵-۵۹۳، (۱۳۹۷)

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22092/IJWPR.2018.122476.1481
شناسه دیجیتال (DOR): 98.1000/1735-0913.1397.33.593.65.4.1605.67

مقایسه تأثیر استفاده از نانوالیاف سلولزی و نشاسته کاتیونی با پالایش بر ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی کاغذ دست‌ساز از خمیرکاغذ OCC

پژمان رضایتی چرانی[۱*] و احمد عزیزی موصلو[۲]

۱*- نویسنده مسئول، استادیار، گروه مهندسی صنایع سلولزی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه صنعتی خاتم‌الانبیاء بهبهان، بهبهان، ایران
پست الکترونیک: P.rezayati@gmail.com

۲- استادیار، گروه مهندسی صنایع سلولزی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه صنعتی خاتم‌الانبیاء بهبهان، بهبهان، ایران

تاریخ دریافت: تیر ۱۳۹۷ تاریخ پذیرش: مهر ۱۳۹۷

چکیده

به دلایل زیست‌محیطی و اقتصادی، استفاده از کارتن‌های کنگره‌ای کهنه (OCC) در تولید کاغذ و مقوا، به‌عنوان یک راهکار مؤثر مورد توجه جدی صنایع کاغذ قرار دارد. خواص مقاومتی خمیرکاغذهای بازیافتی به‌دلیل مختلفی ازجمله پدیده استخوانی شدن ضعیف‌تر از خمیرکاغذ اولیه است. ازاین‌رو روش‌های مختلفی ازجمله افزودن مواد تقویتی و تیمارهای مکانیکی برای بهبود کیفیت آن مورداستفاده قرار می‌گیرد. بسیاری از واحدهای بازیافت کاغذ به‌دلیل تولید کم، محدودیت‌هایی برای سرمایه‌گذاری و استفاده از تیمارهای مکانیکی (پالایشگرها) در خط تولید دارند. در این تحقیق، قابلیت استفاده از نشاسته کاتیونی (CS) و نانوالیاف سلولزی (CNF) به‌عنوان مواد افزودنی استحکامی در تولید کاغذ و مقوا از خمیرکاغذهای حاصل از کارتن باطله به‌عنوان جایگزینی برای پالایش موردبررسی قرارگرفته است. در این پژوهش، نشاسته کاتیونی در یک سطح (۲ درصد) و نانوالیاف سلولزی در ۳ سطح (۲، ۴، ۶ درصد) استفاده و با نمونه‌های شاهد (با پالایش و بدون پالایش) مقایسه شد. نتایج نشان داد که استفاده از ۲ درصد CS و ۴ درصد CNF در ساخت کاغذ از OCC باعث بهبود شاخص مقاومت به کشش، ترکیدن برابر و حتی بیشتر از اثر پالایش گردید، ضمن اینکه مدت آبگیری و دانسیته تقریباً شرایط مشابهی داشتند؛ بنابراین شرایط یادشده به‌عنوان جایگزین پالایش در واحدهای کوچک بازیافت کاغذ باطله قابل توصیه است.

واژه‌های کلیدی: نانوالیاف سلولزی، نشاسته کاتیونی، OCC، پالایش، خواص مقاومتی

مقدمه

امروزه استفاده از کارتن‌های کنگره‌ای کهنه (OCC) در تولید کاغذ و مقوا به دلایل اقتصادی و زیست‌محیطی، به‌عنوان یک راهکار مؤثر و مورد توجه جدی سازندگان کاغذ است. معمولاً خصوصیات خمیرکاغذ حاصل از OCC برای ایجاد ورقه‌های با مقاومت مناسب، در اثر بازیافت، به‌دلیل پدیده‌های استخوانی شدن (Hamzeh *et al.*, 2012)، کاهش میانگین طول الیاف، وجود ذرات غیر فیبری و زائد مثل ذرات جوهر چاپ، موم، چسب و افزایش مقدار نرمه‌های الیاف در خمیرکاغذ بازیافتی تضعیف می‌شود (Allem, 1998). ازاین‌رو روش‌های مختلفی مثل استفاده از خمیرکاغذ الیاف بلند، تیمارهای مکانیکی (پالایش) (Rasa *et al.*, 2012) و استفاده از مواد افزودنی تقویتی (Hamzeh *et al.*, 2013) برای افزایش پیوند بین الیاف باهدف بهبود کیفیت کاغذهای حاصل

از خمیرکاغذ OCC مورداستفاده قرار می‌گیرد. از میان روش‌های بهبود فوق، استفاده از خمیرکاغذ الیاف بلند وارداتی به‌دلیل ارزبری با محدودیت‌هایی مواجه است. همچنین استفاده از تیمارهای مکانیکی در صورت تضعیف کیفیت خمیرکاغذ بازیافتی در اثر بازیافت‌های مکرر کمک چندانی به بهبود خواص مکانیکی نخواهد نمود (Hamzeh *et al.*, 2012)؛ ضمن اینکه بسیاری از واحدهای بازیافت کاغذ به‌دلیل ظرفیت تولید پایین محدودیت‌هایی برای سرمایه‌گذاری و استفاده از پالایشگرها در خط تولید دارند و ترجیح می‌دهند که از افزودنی‌های مقاومت خشک مثل نشاسته کاتیونی[1](CS) استفاده کنند. زیرا این مواد از نظر شیمیایی همانند سلولز، بسپاری از واحدهای گلوکوپیرانوزی با پیوند ۱ به ۴ است که می‌تواند پیوندهای هیدروژنی کم انرژی (۴-۶ کیلوکالری بر مول) بین الیاف را به شمار زیادی افزایش دهد (Ashori, 2006, Hamzeh & Rostampour, 2008, Ghasemian *et al.*, 2012).

امروزه علاوه بر نشاسته کاتیونی، تحقیقاتی در استفاده از نانوالیاف سلولزی[2] (CNF) نیز در بهبود خواص کاغذ منتشرشده است (Balea *et al.*, Pourkarim *et al.*, 2016, Ding *et al.*, 2018, Balea *et al.*, 2018, Ni *et al.*, 2018, Tajik *et al.*, 2018) که از خانواده مواد نانوسلولز هستند و دارای خواص باورنکردنی مثل سطح ویژه (Liu *et al.*, 2015)، ضریب لاغری (Dufresne, 2013)، مدول یانگ زیاد (Maiti *et al.*, Dufresne, 2013, 2013) و همچنین هزینه کم (Yan *et al.*, 2014)، وزن سبک (Maiti *et al.*, 2013)، فراوانی (Wicklein *et al.*, 2015) و تجدیدپذیری (Kim *et al.*, 2015) می‌باشند که با قرارگیری بین الیاف معمولی در شبکه ورقه کاغذ، فضاهای خالی را در ساختار آن کاهش و درنهایت سبب بهبود خواص مقاومتی (کششی، ترکیدگی) و فیزیکی (جذب آب، صافی، تخلخل) می‌شوند (Taipale et al., 2010, Wågberg & Björklund, 1993, Rezayati-Charani et al., 2013). با وجود خواص بسیار خوب CNF، به‌دلیل ابعاد ریز آن برای ماندگاری در کاغذ نیاز به استفاده از مواد کمک نگه‌دارنده است (Taipale et al., 2010). ازجمله مواد کمک نگه‌دارنده CNF می‌توان به پلی‌الکترولیت‌های کاتیونی مثل پلی‌اکریل آمید کاتیونی[3] (CPAM) اشاره نمود که به‌دلیل بار کاتیونی لازم باعث جذب CNF از یکسو و جذب الیاف از سوی دیگر به‌عنوان یک پل سبب ماندگاری بهتر CNF در شبکه کاغذ می‌شود (Rezayati-Charani *et al.*, 2013). باوجود اثبات عملکرد مثبت نشاسته و CNF در بهبود خواص کاغذ هنوز تحقیقات جامع برای استفاده کاربردی ترکیب این دو مواد فوق برای بهبود خواص کاغذ حاصل از OCC منتشر نشده است (Balea *et al.*, 2018, Pourkarim *et al.*, 2016) و گزارش‌های موجود در مورد استفاده ترکیبی از این مواد بر خمیرکاغذ حاصل از الیاف چوبی متمرکز بوده است که با وجود ضعف الیاف بازیافتی باید استفاده ترکیبی از این مواد برای این نوع الیاف در اولویت قرار گیرد. در این پژوهش تأثیر استفاده از ترکیب نشاسته و CNF و مقایسه آن با پالایش به‌عنوان تیمار مکانیکی مورد تحقیق قرار گرفت.

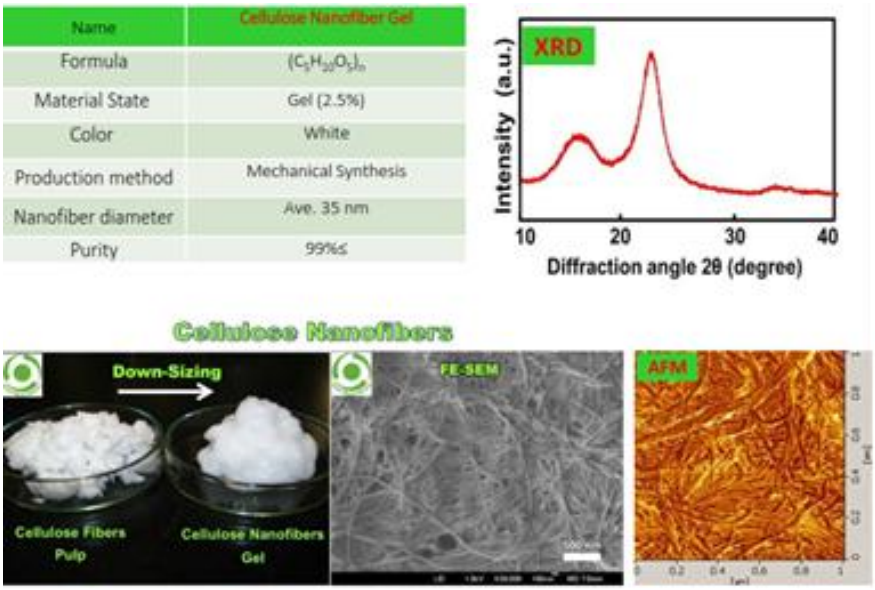
مواد و روش‌ها

مواد

خمیرکاغذ OCC پالایش نشده مورداستفاده در این پژوهش با درجه روانی استاندارد کانادایی[4] (CSF)(mL)۴۶۰-۴۲۰ از صنایع تولیدی کاغذ و مقوای کرمان تهیه شد. بخشی از خمیرکاغذ مزبور با استفاده از پالایشگر PFI mill تا درجه روانی ۳۰۰ پالایش گردید. بخش دیگر از این خمیرکاغذ نیز بدون دریافت هرگونه پالایش برای تیمار با افزودن مواد افزودنیCNF و CS استفاده شد. CNF تهیه‌شده به روش مکانیکی از شرکت دانش‌بنیان نانونوین‌پلیمر (پارک علم و فناوری مازندران) به‌صورت ژل سفیدرنگ با درصد خشکی ۳ و متوسط قطر

1-Cationic Starch
2-Cellulose nanofiber
3-Cationic Polyacrylamide
4-Canadian Standard Freeness

الیاف ۳۵ نانومتر، خلوص ۹۹ درصد خریداری و پس از رقیق‌سازی با درصد خشکی ۰/۳ استفاده شد (شکل ۱). برای حفظ CNF در سوسپانسیون هنگام کاغذسازی از ماده کمک نگهدارنده پلی‌اکریل‌آمیدکاتیونی نوع تجاری PL1520 استفاده شد. CS از شرکت خوشه‌پرداز با کد تجاری ۱۰۳۳ با درجه استخلاف (DS) حدود ۰/۰۴ تهیه شد.



شکل ۱- خصوصیات ژل نانوالیاف سلولزی (تهیه شده از شرکت تعاونی دانش‌بنیان نانو نوین پلیمر، ۲۰۱۶)

روش‌ها

برای آماده‌سازی محلول CS با غلظت ۱ درصد، بشر حاوی مخلوط آب و نشاسته در داخل حمام آب گرم قرار گرفت و ضمن هم خوردن با همزن مغناطیسی، به‌تدریج دمای آن طی مدت ۳۰ دقیقه تا ۹۰ درجه سانتی‌گراد افزایش یافت. پس از رسیدن به دمای ۹۰ درجه سانتی‌گراد، به مدت ۳۰ دقیقه در این دما نگهداری و بعد در حمام آب ۶۰ درجه سانتی‌گراد نگه‌داری و استفاده شد. برای ساخت کاغذ دست‌ساز طبق جدول ۱ اقدام شد. برای این منظور در ساخت کاغذهای دارای مواد افزودنی، متناسب با تیمارهای موردبررسی، ابتدا CS به میزان ۲ درصد بر مبنای وزن خشک کاغذ نهایی با زمان اختلاط یک دقیقه به سوسپانسیون خمیرکاغذ ضمن هم زدن با همزن مکانیکی با دور ۱۵۰۰ دور در دقیقه اضافه شد. سپس با همان دور CNF به سوسپانسیون اضافه شد. در ادامه کاغذهای دست‌ساز مربوط به خمیرکاغذ شاهد پالایش نشده و خمیرکاغذ پالایش‌شده به همراه خمیرکاغذهای تیمارشده بر اساس استاندارد متداول TAPPI (T 205 sp-02) ساخته شد و شاخص‌های فیزیکی و مکانیکی آنها بر اساس استاندارد: گراماژ: T 410 om-02، ضخامت: T 411 om-05، شاخص کششی: T 494 om-01، شاخص مقاومت به ترکیدن: T 403 om-02، شاخص مقاومت به پارگی: T 414 om-04 اندازه‌گیری شد؛ مقایسه اثر تیمارها از روش دانکن با استفاده از نرم‌افزار SPSS[1] در سطح معنی‌داری ۰/۰۵ ارزیابی شد. همچنین در شکل‌ها، مقدار تغییرات نتایج حاصل از میانگین‌ها از طریق انحراف از استاندارد[2] نشان داده‌شده است.

1- Statistical package for social science (SPSS)
2 - Standard deviation (SD)

جدول ۱- شرایط تیمار در بررسی اثر استفاده از CS (نشاسته کاتیونی)، CNF (نانوالیاف سلولزی) با کمک نگهدارنده CPAM (پلی اکریل آمید کاتیونی) در کاغذ ساخته شده از خمیرکاغذ OCC (کارتن باطله)

ردیف	تیمار مکانیکی	CNF, %	CPAM, %	Starch, %
۱	پالایش شده	۰	۰	۰
۲	پالایش نشده	۰	۰	۰
۳	پالایش نشده	۰	۰	۲
۴	پالایش نشده	۲	۰/۰۴	۲
۵	پالایش نشده	۴	۰/۰۴	۲
۶	پالایش نشده	۶	۰/۰۶	۲

نتایج

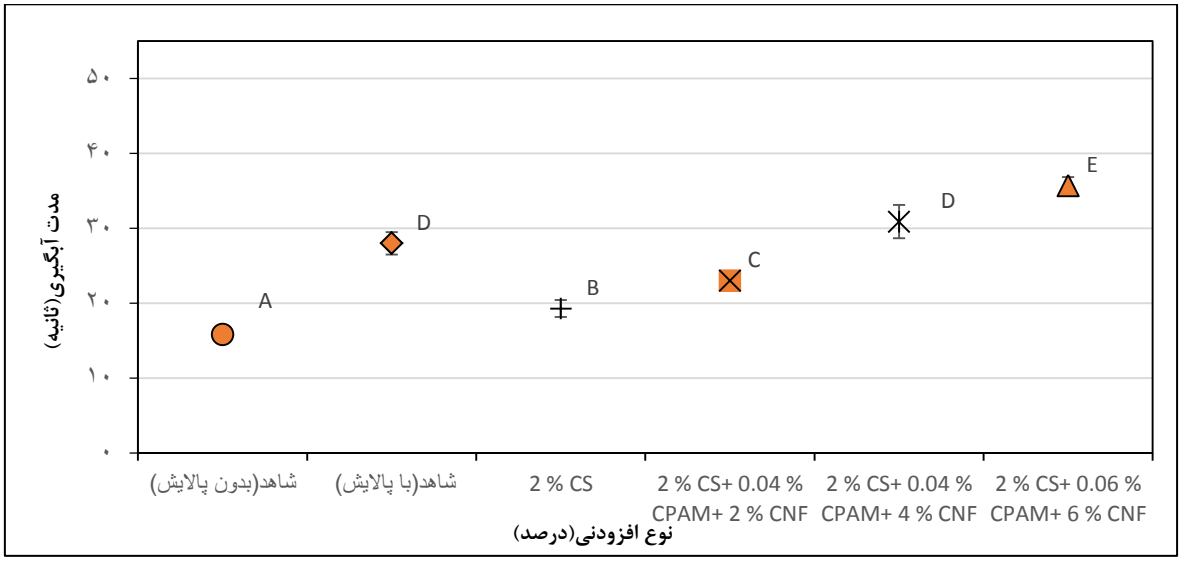
کاغذهای حاصل از خمیرکاغذ بازیافتی به‌دلیل فرایند استخوانی شدن[1] و عدم امکان تشکیل پیوند مناسب دارای خواص مقاومتی ضعیفی می‌باشند (Hamzeh *et al.*, 2013). برای رفع این مشکل از روش‌های مختلفی ازجمله استفاده از پالایش (Rasa *et al.*, 2012, Bajpai, 2012)، رزین‌های مقاومت خشک مثل نشاسته، به‌صورت مستقل یا ترکیبی برای ایجاد پیوند و درنتیجه بهبود خواص مقاومتی کاغذهای حاصل استفاده می‌شود. در این تحقیق، خواص فیزیکی شامل زمان آبگیری، دانسیته و خواص مقاومتی شامل مقاومت کششی، مقاومت به ترکیدن و مقاومت به پارگی کاغذهای حاصل از خمیرکاغذ OCC صنایع تولیدی کاغذ و مقوای کرمان که طبق جدول شماره ۱ تیمار شده‌اند در شکل‌های ۲-۸ ارائه‌شده است که در ادامه موردبررسی قرار می‌گیرد.

خواص فیزیکی

مدت آبگیری

تأثیر استفاده از مواد افزودنی بر مدت آبگیری از کاغذ در شکل ۲ نشان داده‌شده است. بر اساس این نتایج، کاغذ حاصل از خمیر OCC شاهد بدون پالایش، دارای کمترین زمان آبگیری (۱۵/۸۲ ثانیه) است که با افزودن ۲ درصد CS زمان آبگیری حدود ۲۲ درصد افزایش یافته است (۱۹/۲۸ ثانیه). معمولاً استفاده از پالایش با افزایش مقدار نرمه و یا افزودن CNF نیز زمان آبگیری را افزایش می‌دهد (Wistara & Young, Rudi et al., 2018 , 1999). در توضیح این نتایج، به‌نظر می‌رسد هم پالایش سبب افزایش نرمه خمیرکاغذ می‌شود و هم استفاده از CS و CNF همراه CPAM سبب ماندگاری نرمه‌های موجود در خمیرکاغذ بازیافتی می‌شود که هر دو شرایط سبب افزایش مدت آبگیری در هنگام کاغذسازی می‌گردد. این نتایج همچنین نشان می‌دهد که در صورت نیاز به انتخاب جایگزینی برای پالایش بدون تغییر زیاد مدت آبگیری، می‌توان استفاده از ۲ درصد CS را همراه با ۴ درصد CNF و ۰/۰۴ درصد CPAM استفاده نمود که ارزیابی آماری هم این تیمار را مشابه اثر پالایش در گروه یکسان (D) قرار داده است.

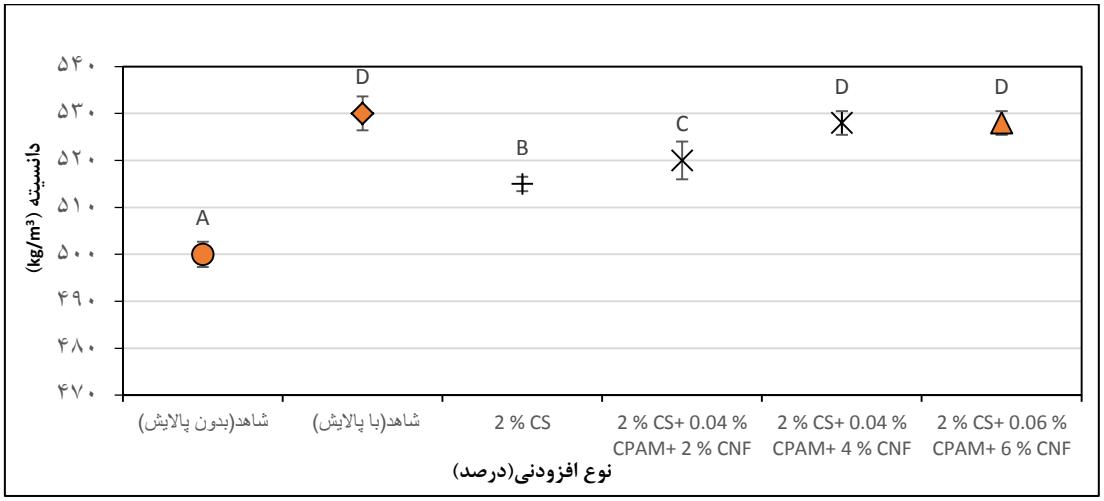
1-Hornification



شکل ۲- تأثیر درصد اختلاط CS (نشاسته کاتیونی)، CNF (نانوالیاف سلولزی) و CPAM (پلی اکریل آمید کاتیونی) با خمیرکاغذ بازیافتی بر مدت آبگیری هنگام کاغذسازی در آزمایشگاه

دانسیته

دانسیته کاغذ یکی از ویژگی‌های فیزیکی کاغذ است که می‌تواند برای ارزیابی بسیاری از خواص کاغذ مورد استفاده قرار گیرد. به‌عنوان‌مثال در شرایط یکسان، درصورتی‌که با اعمال تغییر مشخص در فرایند آماده‌سازی سوسپانسیون خمیرکاغذ، دانسیته کاغذ حاصل افزایش یابد می‌توان گفت که در شرایط اخیر ممکن است ماندگاری نرمه در ساختار کاغذ بیشتر شده باشد که در این صورت مدت آبگیری نیز افزایش خواهد یافت. البته در مورد تأثیر ماندگاری نرمه‌ها در ساختار کاغذ اگرچه موجب افزایش دانسیته می‌شود ولی در رابطه با عملکرد آن در بهبود شاخص‌های مقاومتی بستگی به نوع نرمه-ها دارد. تأثیر استفاده از مواد افزودنی و پالایش بر دانسیته کاغذ در شکل ۳ نشان داده‌شده است. براساس این نتایج استفاده از پالایش موجب افزایش ۶ درصدی دانسیته شده است که این افزایش می‌تواند ناشی از افزایش انعطاف‌پذیری الیاف و نیز تولید نرمه بیشتر در اثر پالایش باشد (Zeng *et al.*, 2012). در صورت استفاده از نشاسته، با توجه به انحلال در هنگام آماده‌سازی، به‌عنوان نرمه محسوب نمی‌شود اما به دلیل بار مثبت خود و کمک به ماندگاری نرمه‌های موجود در خمیرکاغذ هنگام ساخت می‌تواند موجب افزایش دانسیته کاغذ شود (Sehaqui *et al.*, 2013). بر اساس این نتایج دانسیته خمیرکاغذ پالایش نشده با استفاده از ۲ درصد نشاسته کاتیونی از ۵۰۰ به ۵۱۵ کیلوگرم بر مترمکعب یعنی برابر ۳ درصد افزایش نشان می‌دهد. در صورت استفاده از CNF که خود نوعی نرمه خیلی ریز محسوب می‌شود، می‌توان انتظار افزایش دانسیته را در صورت ماندگاری آنها در ساختار کاغذ داشت. شکل ۳ افزایش دانسیته کاغذ را در صورت استفاده از CNF و CS نشان می‌دهد (برای ماندگاری CNF از CPAM استفاده شده است). افزایش دانسیته با استفاده از CNF نسبت به تیمار استفاده از نشاسته، به‌تنهایی دلالت بر ماندگاری CNF در بافت کاغذ می‌کند که نتایج مدت آبگیری در شکل ۲ نیز این استدلال را تأیید می‌کند. این نتایج مشابه نتایج آبگیری نشان می‌دهد که در صورت نیاز به انتخاب جایگزینی برای پالایش بدون تغییر زیاد در دانیسته، می‌توان استفاده از ۲ درصد CS را همراه با ۴ درصد CNF و ۰/۰۴ درصد CPAM استفاده نمود که ارزیابی آماری هم این تیمارها را مشابه اثر پالایش در گروه یکسان (D) قرار دادِ است.



شکل ۳- تأثیر درصد اختلاط CS (نشاسته کاتیونی)، CNF (نانوالیاف سلولزی) و CPAM (پلی اکریل آمید کاتیونی) با خمیرکاغذ بازیافتی بر دانسیته کاغذ

خواص مقاومتی

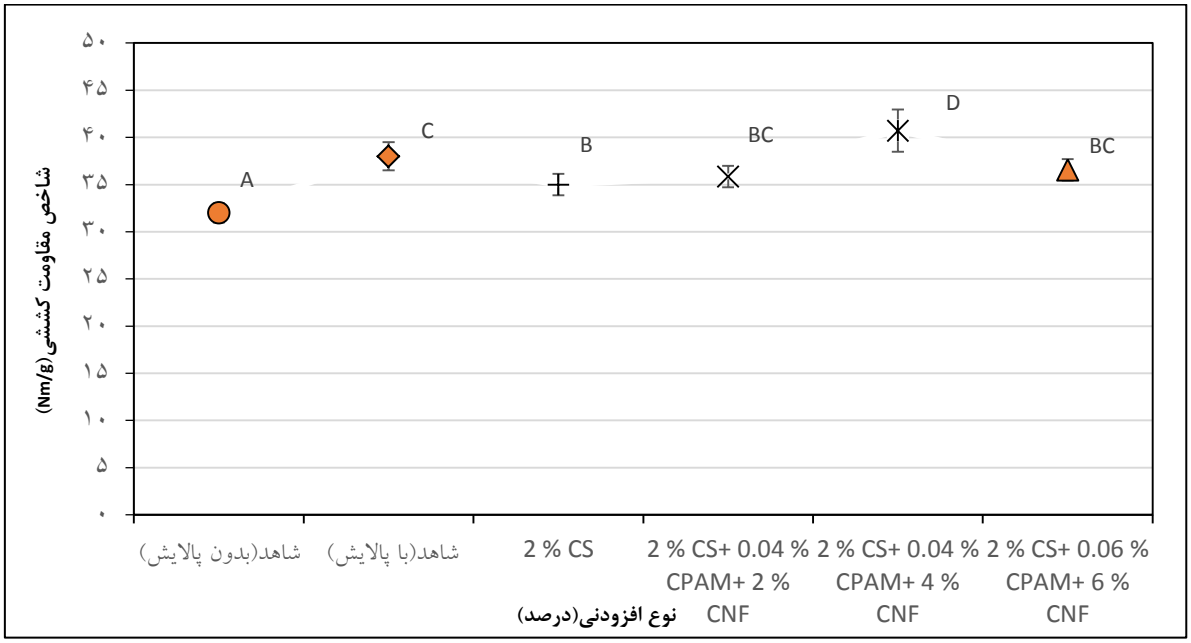
شاخص مقاومت کششی

شکل ۴ خصوصیات مقاومت به کشش کاغذهای حاصل از تیمارهای موردبررسی را نشان می‌دهد. با استفاده از پالایش خمیرکاغذ حاصل از OCC شاخص مقاومت به کشش ۱۸ درصد افزایش نشان می‌دهد (از ۳۲ به ۳۸ نیوتن‌متر بر گرم). اگرچه پالایش اثر خوبی در بهبود این شاخص داشته است ولی منتهی به افزایش دانسیته می‌شود که بعضاً برای مصارف بسته‌بندی مناسب نیست (Sehaqui *et al.*, 2013). به‌طوری‌که با افزودن ۲ درصد CS به خمیرکاغذ شاهد بدون پالایش، این شاخص به ۹ درصد افزایش و در صورت استفاده از ۴ درصد CNF همراه CS به خمیرکاغذ شاهد بدون پالایش، میزان افزایش به ۲۷ درصد (از ۳۲ به ۴۰/۷۱ نیوتن‌متر بر گرم) رسیده است که قابل‌توجه است. بر این اساس می‌توان گفت استفاده از CNF همراه CS، امکان دستیابی به شاخص مقاومت کششی برابر استفاده از پالایش داشته است. توضیح اینکه در صورت مصرف CNF بیشتر نیاز به استفاده بیشتر از کمک‌نگه‌دارنده‌ها است که مصرف بیشتر CPAM به‌عنوان کمک نگهدارنده به‌نظر می‌رسد که موجب افزایش کلوخه شدن الیاف و درنتیجه اثر منفی بر فرایند شکل‌گیری و در نهایت کاهش این شاخص شده است. ارزیابی آماری اثرهای تیمارها نشان می‌دهد که اثر پالایش در گروه (C) قرار داده است که کمتر از اثر تیمار ۲ درصد CS همراه با ۴ درصد CNF و ۰/۰۴ درصد CPAM است.

شاخص مقاومت به ترکیدن

شاخص مقاومت به ترکیدن کاغذ عموماً متناسب با شاخص مقاومت به کشش تغییر می‌کند (Rosli *et al.*, 2004). شکل ۵ اثر تیمارهای موردبررسی را بر شاخص مقاومت به ترکیدن نشان می‌دهد. در اثر پالایش خمیرکاغذ شاهد این شاخص از ۱/۵۴ کیلوپاسکال مترمربع بر گرم به ۲/۱۰ کیلوپاسکال مترمربع بر گرم افزایش یافته است (حدود ۳۶ درصد). در صورت افزودن CS به خمیرکاغذ شاهد مقاومت به ترکیدن از ۱/۵۴ کیلوپاسکال مترمربع بر گرم به ۱/۹۴ کیلوپاسکال مترمربع بر گرم افزایش داشته است (حدود ۲۵ درصد) که این مقدار هنوز کمتر از اثر پالایش بوده است. در صورت افزودن CNF همراه با CS مشاهده می‌شود که این شاخص بهبود بیشتری یافته است، به‌طوری‌که با افزودن ۴ درصد CNF همراه ۲ درصد CS این

شاخص به ۲/۴ کیلوپاسکال مترمربع بر گرم رسیده است که افزایش ۵۵ درصدی را نسبت به نمونه شاهد بدون پالایش نشان می‌دهد که حدود ۲۰ درصد بیش از عمل پالایش موجب بهبود شاخص مقاومت به ترکیدگی شده است. در مورد تیمار با ۶ درصد CNF همراه ۲ درصد CS و ۰/۰۶ درصد کمک نگهدارنده CPAM همان‌طوری که در مورد شاخص مقاومت به کشش گفته شد بهبود بیشتر حاصل نشد. ارزیابی آماری اثرهای تیمار نشان می‌دهد که اثر پالایش در گروه (C) قرار دارد که کمتر از اثر تیمار ۲ درصد CS همراه با ۴ درصد CNF و ۰/۰۴ درصد CPAM می‌باشد. توضیح اینکه در مورد این شاخص اثرهای دو تیمار ۲ درصد CS همراه با ۴ درصد CNF و ۰/۰۴ درصد CPAM و ۲ درصد CS همراه با ۶ درصد CNF و ۰/۰۶ درصد CPAM یکسان بوده است.

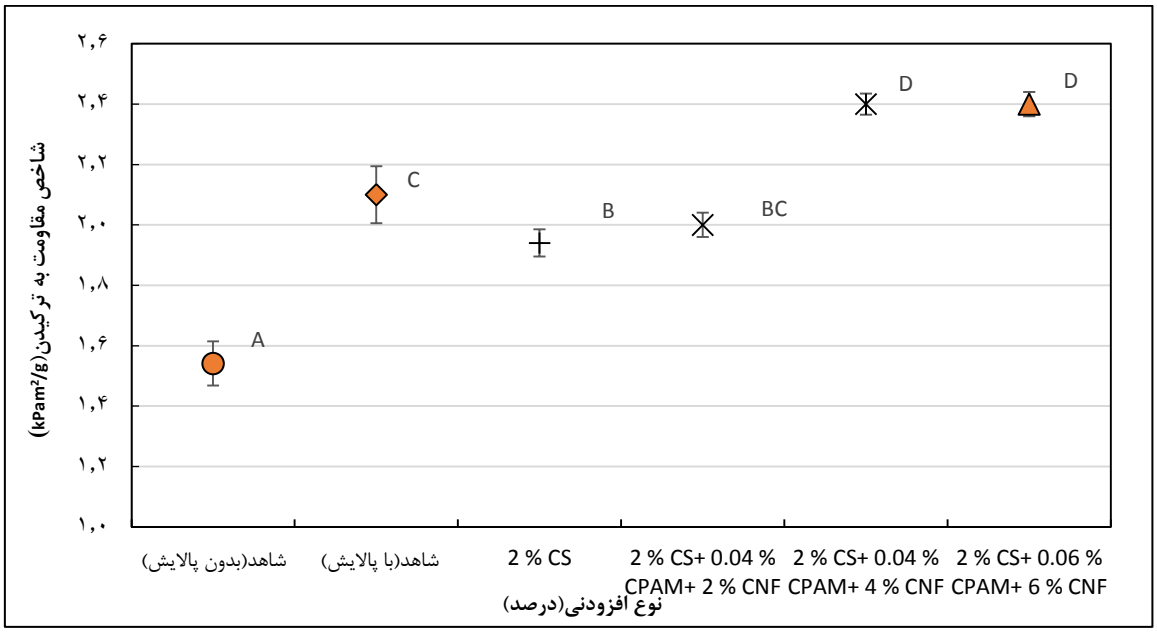


شکل ۴- تأثیر درصد اختلاط CS (نشاسته کاتیونی)، CNF (نانوالیاف سلولزی) و CPAM (پلی اکریل آمید کاتیونی) با خمیرکاغذ بازیافتی بر شاخص مقاومت کششی کاغذ

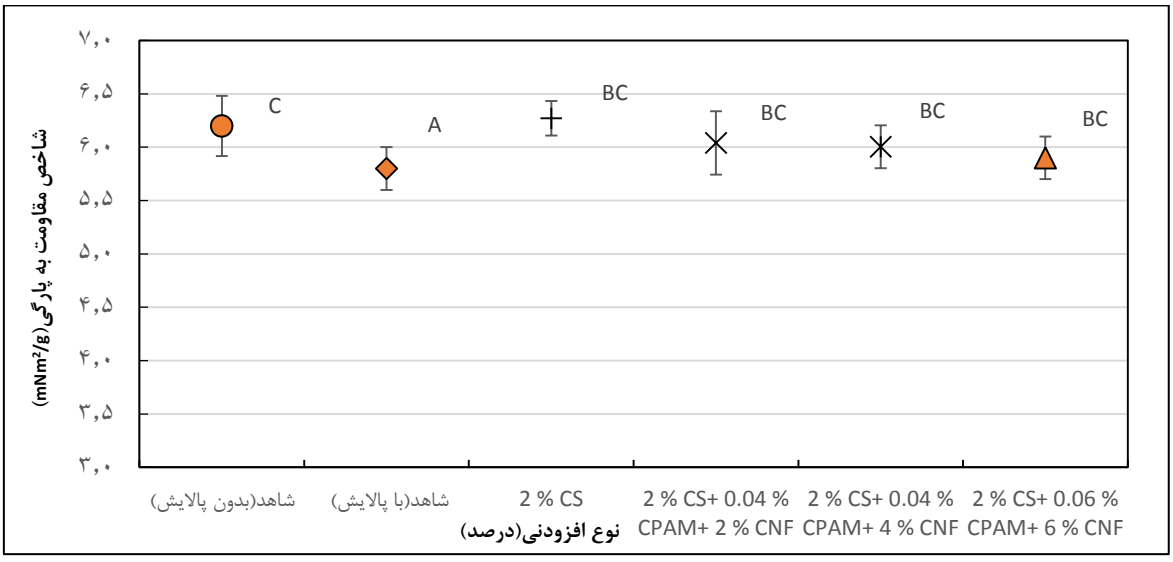
شاخص مقاومت به پارگی

به‌طورکلی شاخص مقاومت به پارگی در درجه نخست وابسته به مقاومت تک‌تک الیاف و در درجه دوم وابسته به اتصال بین الیاف است (Rezayati-Osong *et al.*, 2014; Charani & Mohammadi-Rovshandeh, 2005). استفاده از پالایش و یا افزودن CNF که هر دو منتهی به افزایش سهم الیاف منفرد با استحکام کمتر در خمیرکاغذ می‌شوند موجب کاهش مقاومت به پارگی خواهند شد (شکل ۵). درحالی‌که افزودن CS به‌تنهایی به خمیرکاغذ شاهد بدون پالایش می‌تواند به بهبود هرچند محدود این شاخص کمک کند (Ghasemian *et al.*, 2012) که مطابق این نتایج ۱/۱۶ درصد بهبود در صورت استفاده از ۲ درصد CS مشاهده شد (اگرچه قابل توجه نیست). استفاده از CNF نیز همان‌طوری که انتظار می‌رفت موجب کاهش این شاخص شد، به‌طوری‌که با استفاده از ۴ درصد CNF همراه نشاسته کاهش ۳ درصدی حاصل شد که نسبت به اثر منفی پالایش (۶ درصد) کمتر بوده است. بنابراین به‌طورکلی می‌توان گفت در صورت استفاده از ۲ درصد CS و ۴ درصد CNF به‌عنوان جایگزین پالایش در

خمیرکاغذ حاصل از OCC، شاخص مقاومت به پارگی بیشتری نسبت به پالایش حاصل‌شده است. ارزیابی آماری اثرهای تیمارها نشان می‌دهد که تأثیر پالایش در گروه (C) قرارگرفته است که تقریباً برابر بقیه تیمارها است که تأیید می‌کند استفاده محدود از CS و CNF اثر منفی معنی‌داری بر مقاومت به پارگی ندارد.



شکل ۵- تأثیر درصد اختلاط CS (نشاسته کاتیونی)، CNF (نانوالیاف سلولزی) و CPAM (پلی اکریل آمید کاتیونی) با خمیرکاغذ بازیافتی بر شاخص مقاومت به ترکیدن کاغذ



شکل ۶- تأثیر درصد اختلاط CS (نشاسته کاتیونی)، CNF (نانوالیاف سلولزی) و CPAM (پلی اکریل آمید کاتیونی) با خمیرکاغذ بازیافتی بر شاخص مقاومت به پارگی کاغذ

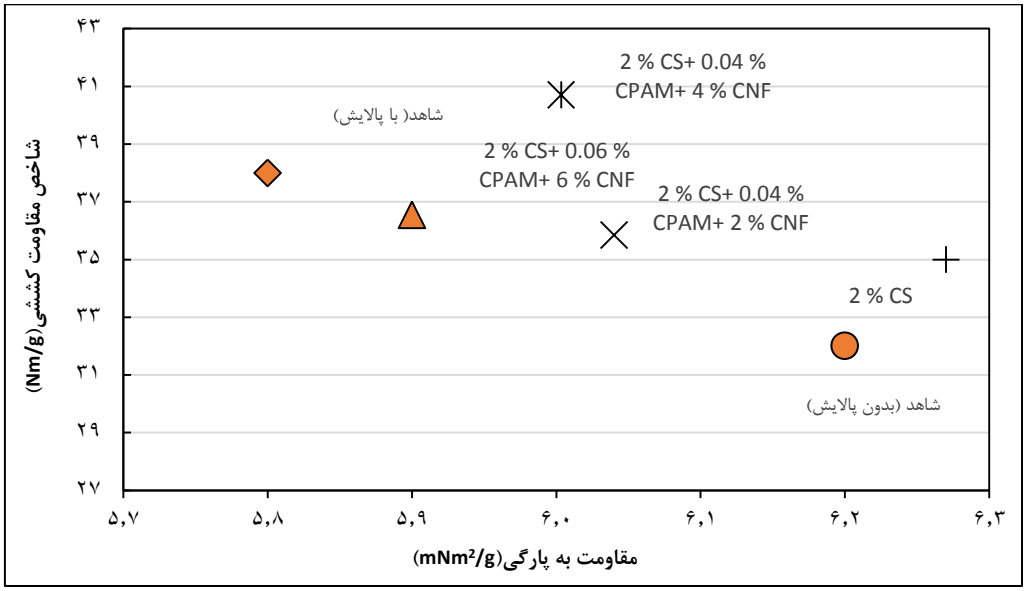
بحث

به‌طورکلی در تولید کاغذ ضرورت دارد ضمن بهبود خواص مقاومتی خواص فیزیکی مثل مدت آبگیری و دانسیته نیز مورد توجه قرار گیرد، بنابراین معمولاً سعی می شود شرایطی بکار گرفته شود که ضمن تأمین خواص استحکامی لازم، خواص فیزیکی آن نیز دچار تغییر جدی نشود. ارزیابی مقایسه‌ای اثر افزودن CS و CNF و پالایش بر دانسیته به‌عنوان یکی از خواص فیزیکی کاغذ نشان داد که استفاده از این افزودنی‌ها موجب افزایش دانسیته کاغذ نمی‌شود (شکل ۳)، اما در مورد آبگیری در برخی از شرایط موجب افزایش قابل‌توجه مدت آبگیری می‌شود که قابل‌تأمل می‌باشد؛ بنابراین ضرورت دارد شرایطی انتخاب شود که هم برابر استفاده از پالایش برای بهبود استحکامی کاغذ باشد و هم مدت آبگیری آن نیز افزایش زیاد نیابد.

خواص مقاومتی کاغذ معمولاً تحت تأثیر مواد افزودنی، فرایندهای شکل‌گیری و کلوخه شدن الیاف قرار می‌گیرند. این خواص به استحکام تک‌تک الیاف و استحکام اتصال بین الیاف منفرد وابسته است؛ بنابراین ویژگی‌های استحکامی تابعی از نوع الیاف/خمیرکاغذ و خواص آنها مثل انعطاف‌پذیری الیاف، مقدار نرمه، درجه فیبریله شدن (داخلی و خارجی) و قابلیت اتصال الیاف است (Osong *et al.*, 2014). معمولاً مقاومت به کشش و ترکیدگی در درجه نخست به استحکام اتصال بین فیبری و سطح اتصال مؤثر بین فیبری وابسته است و در درجه دوم وابسته به استحکام تک‌تک الیاف است، درحالی‌که در مورد مقاومت به پارگی این شرایط بعکس است، یعنی در درجه نخست استحکام تک‌تک الیاف اثرگذار است و سطح اتصال مؤثر بین فیبری و استحکام اتصالات بین فیبری در درجه بعدی قرار دارد (Rezayati-Charani & Mohammadi-Rovshandeh, Osong *et al.*, 20142005,). پالایش معمولاً با افزایش سطح قابل تماس بین فیبری، امکان برقراری اتصالات بیشتر را فراهم می‌کند، ازاین‌رو به افزایش مقاومت به کشش و ترکیدگی کمک می‌کند. اما به دلیل کاهش استحکام تک‌تک الیاف و بعضاً کوتاه شدن آنها، معمولاً منتهی به کاهش مقاومت به پارگی می‌شود. استفاده از CNF نیز درصورتی‌که از خمیرکاغذ شیمیایی رنگ‌بری شده با سطح فیبری سلولزی تولیدشده باشد مشابه پالایش عمل می‌کند (Taipale *et al.*, 2010)، یعنی CNF با افزایش سطح قابل اتصال سلولزی و با قرارگیری در فواصل بین فیبرها همانند یک پل موجب کوتاه شدن فاصله سطوح سلولزی بین فیبرها و فراهم شدن امکان برقراری اتصال بین آنها می‌شود. این ویژگی CNF سبب بهبود مقاومت به کشش و مقاومت به ترکیدگی می‌شود. CS نیز عملاً چون در آب حل می‌شود به‌صورت چسب موجب افزایش تعداد پیوند بین فیبری در شبکه کاغذ می‌شود (Ghasemian *et al.*, 2012)، بنابراین می‌تواند از طریق افزایش اتصالات بین فیبری سبب بهبود خواص استحکامی مثل مقاومت به کشش و مقاومت به ترکیدگی و به‌مقدار محدود مقاومت به پارگی کاغذ شود. با توجه به اینکه معمولاً همبستگی مثبتی بین مقاومت به ترکیدگی با مقاومت به کشش وجود دارد، بنابراین برای انتخاب شرایط مناسب بهبود استحکامی با استفاده از CS وCNF در قیاس با اثر پالایش، رابطه شاخص مقاومت کششی با شاخص مقاومت به پارگی در ادامه موردبررسی قرار گرفت.

رابطه شاخص مقاومت کششی با شاخص مقاومت به پارگی

شکل ۷ رابطه تغییرات شاخص مقاومت به کشش را در مقایسه با مقاومت به پارگی نشان می‌دهد. با استفاده از ۲ درصد CS همراه با ۴ درصد CNF اگرچه مقاومت به پارگی نسبت به نمونه شاهد پالایش نشده کاهش یافته است ولی دارای مقاومت به کشش حتی بیشتر از شرایط استفاده از پالایش است که دلالت بر امکان جایگزینی موفقیت‌آمیز استفاده از نشاسته و CNF به‌جای پالایش به‌عنوان تیمار مکانیکی برای تقویت مقاومت به کشش کاغذ ضمن دستیابی به مقاومت به پارگی بیشتر را دارد. این درحالی‌که است که شرایط دیگر استفاده از CS و CNF در قیاس با اثر پالایش نتوانسته است همزمان هر دو شاخص را برابر پالایش بهبود دهد.



شکل ۷- تغییرات شاخص مقاومت کششی در مقایسه با شاخص مقاومت به پارگی کاغذ

نتیجه‌گیری

بازیافت کارتن‌های کنگره‌ای کهنه (OCC) برای تولید کاغذ و مقوا از جنبه‌های زیست‌محیطی و اقتصادی مورد توجه جدی سازندگان کاغذ است. خواص خمیرکاغذهای بازیافتی به‌دلیل مختلفی تضعیف می‌شود که نیاز به بهبود کیفیت از طریق استفاده از مواد افزودنی و تیمارهای مکانیکی دارد. نظر به اینکه بسیاری از واحدهای بازیافت کاغذ به‌دلیل تناژ تولید کم، محدودیت‌هایی برای سرمایه‌گذاری و استفاده از تیمارهای مکانیکی (پالایشگرها) در خط تولید دارند، در این پژوهش، امکان به‌کارگیری نشاسته کاتیونی و نانوالیاف سلولزی به‌عنوان مواد افزودنی استحکامی در تولید کاغذ و مقوا از خمیرکاغذهای حاصل از کارتن باطله در جایگزین با پالایش موردبررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که استفاده از ۲ درصد نشاسته کاتیونی و ۴ درصد نانوالیاف سلولزی باعث بهبود شاخص مقاومت به کشش، ترکیدن برابر استفاده از پالایش و حتی بیشتر از آن با دانسیته تقریباً مشابه گردید؛ اگرچه مدت آبگیری کمی افزایش خواهد یافت که ضرورت دارد به طریقی تعدیل شود، اما با توجه به مقدار تناژ تولید کم این واحدها انتظار می‌رود چندان بحرانی نباشد؛ بنابراین استفاده از نشاسته کاتیونی همراه با نانوالیاف سلولزی به‌عنوان جایگزینی برای فرایند پالایش در واحدهای کوچک بازیافت کاغذ باطله قابل توصیه است.

سپاسگزاری

این تحقیق با حمایت مالی دانشگاه صنعتی خاتم‌الانبیاء بهبهان انجام شده، بدین‌وسیله از مسئولان محترم آن سازمان و همچنین صنایع تولیدی کاغذ و مقوای کرمان برای در اختیار قرار دادن خمیرکاغذ بازیافتی و نشاسته سپاسگزاری می‌شود.

منابع مورد استفاده:

-Allem, R. 1998. Characterization of paper coatings by scanning electron microscopy and image analysis. Journal of pulp and paper science, 24: 329-336.
-Ashori, A. 2006. Pulp and paper from kenaf bast fibers. Fibers and Polymers, 7: 26-29.
-Bajpai, P. 2018. Fiber Modification:240-291. In: Bajpai, P. (Eds.). Biotechnology for Pulp and Paper Processing. Springer, Uttar Pradesh, 601p.
-Balea, A., blanco, Á., monte, M. C., merayo, N. and Negro, C. 2016. Effect of bleached eucalyptus and pine cellulose nanofibers on the physico-mechanical

effluents. Journal of hazardous materials, 294: 177-185.
-Rasa, M., H., R. and E., A. 2012. Comparative Investigation on Different Methods for Improving Strength Properties of OCC Pulp. Journal of Wood and Forest Science and Technology, 19: 41-57.
-Maiti, S., Jayaramudu, J., Das, K., Reddy, S. M., Sadiku, R., Ray, S. S. and Liu, D. 2013. Preparation and characterization of nano-cellulose with new shape from different precursor. Carbohydrate polymers, 98: 562-567.
-Ni, S., Wang, C., Bian, H., Yu, Z., Jiao, L., Fang, G. and Dai, H. 2018. Enhancing physical performance and hydrophobicity of paper-based cellulosic material via impregnation with starch and PEI-KH560. Cellulose, 25: 1365-1375.
-Osong, S. H., Norgren, S. and Engstrand, P. 2014. Paper strength improvement by inclusion of nano-ligno-cellulose to chemi-thermomechanical pulp. Nordic Pulp and Paper Research Journal, 29: 309-316.
-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.
-Rezayati-Charani, P. and Mohammadi-Rovshandeh, J. 2005. Effect of pulping variables with dimethyl formamide on the characteristics of bagasse-fiber. Bioresource Technology, 96: 1658-1669.
-Rosli, W. W., Law, K., Zainuddin, Z. and Asro, R. 2004. Effect of pulping variables on the characteristics of oil-palm frond-fiber. Bioresource technology, 93: 233-240.
-Rudi, H. R., Soleymanisadati, S. A. and Jalali-Torshizi, H. 2018. Effect of using PCC fillers and nanocellulose on pulp and paper properties. Iranian Journal of Wood and Paper Science Research, 33: 12-24.
-Sehaqui, H., Zhou, Q. and Berglund, L. A. 2013. Nanofibrillated cellulose for enhancement of strength in high-density paper structures. Nordic Pulp & Paper Research Journal, 28: 182.
-Taipale, T., Österberg, M., Nykänen, A., Ruokolainen, J. and Laine, J. 2010. Effect of microfibrillated cellulose and fines on the drainage of kraft pulp suspension and paper strength. Cellulose, 17: 1005-1020.
-Tajik, M., Torshizi, H. J., Resalati, H. and Hamzeh, Y. 2018. Effects of cationic starch in the presence of cellulose nanofibrils on structural, optical and properties of cartonboard. BioResources, 11: 8123-8138.
-Balea, A., Merayo, N., Fuente, E., Negro, C., Delgado-aguilar, M., Mutje, P. and Blanco, A. 2018. Cellulose nanofibers from residues to improve linting and mechanical properties of recycled paper. Cellulose, 25: 1339-1351.
-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.
-Ding, Q., Zeng, J., Wang, B., Gao, W., Chen, K., Yuan, Z., Xu, J. and Tang, D. 2018. Effect of retention rate of fluorescent cellulose nanofibrils on paper properties and structure. Carbohydrate Polymers, 186: 73-81.
-Dufresne, A. 2013. Nanocellulose: a new ageless bionanomaterial. Materials Today, 16: 220-227.
-Ghasemian, A., Ghaffari, M. and Ashori, A. 2012. Strength-enhancing effect of cationic starch on mixed recycled and virgin pulps. Carbohydrate Polymers, 87:1269-1274.
-Pourkarim, D. H., H., J. T., Rudi, H. R. and O., R. 2016. Performance of nano fibrillated cellulose (NFC) and chitosan bio-polymeric system on recycled pulp and paper properties of old corrugated containers (OCC). Iranian Journal of Wood and Paper Industries, 7: 297-309.
-Hamzeh, Y., Najafi, S. M. H., Hubbe, M. A., Salehi, K. and Firouzabadi, M. R. D. 2012. Recycling potential of unbleached and bleached chemical pulps from juvenile and mature wood of Populus deltoides. Holzforschung, 66: 155-161.
-Hamzeh, Y. and Rostampour, A. 2008. Principals of papermaking chemistry. University of Tehran press, Tehran, 424.
-Hamzeh, Y., Sabbaghi, S., Ashori, A., Abdulkhani, A. and Soltani, F. 2013. Improving wet and dry strength properties of recycled old corrugated carton (OCC) pulp using various polymers. Carbohydrate polymers, 94: 577-583.
-Kim, J.-H., Shim, B. S., Kim, H. S., Lee, Y.-J., Min, S.-K., Jang, D., Abas, Z. and Kim, J. 2015. Review of nanocellulose for sustainable future materials. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology, 2: 197-213.
-Liu, P., Borrell, P. F., Božič, M., Kokol, V., Oksman, K. and Mathew, A. P. 2015. Nanocelluloses and their phosphorylated derivatives for selective adsorption of Ag+, Cu2+ and Fe3+ from industrial

strength properties of paper from soda bagasse pulp. Carbohydrate Polymers, 194: 1-8.
-Wågberg, L. and Björklund, M. 1993. Adsorption of cationic potato starch on cellulosic fibres. Nordic Pulp and Paper Research Journal (Sweden), 8(4): 399-404.
-Wicklein, B., Kocjan, A., Salazar-Alvarez, G., Carosio, F., Camino, G., Antonietti, M. and Bergström, L. 2015. Thermally insulating and fire-retardant lightweight anisotropic foams based on nanocellulose and graphene oxide. Nature nanotechnology, 10: 277.
-Wistara, N. and Young, R. A. 1999. Properties and treatments of pulps from recycled paper. Part I. Physical and chemical properties of pulps. Cellulose, 6: 291-324.
-Yan, C., Wang, J., Kang, W., Cui, M., Wang, X., Foo, C. Y., Chee, K. J. and Lee, P. S. 2014. Highly stretchable piezoresistive graphene–nanocellulose nanopaper for strain sensors. Advanced materials, 26: 2022-2027.
-Zeng, X., Retulainen, E., Heinemann, S. and Fu, S. 2012. Fibre deformations induced by different mechanical treatments and their effect on zero-span strength. Nordic Pulp and Paper Research Journal, 27(2): 335-342.

Comparison of the effect of using cellulose nanofibers and cationic starch to replace refining on the physical and mechanical properties of paper from OCC pulp

P. Rezayati-Charani[1*] and A. Azizi. Mossello[2]

1*-Corresponds author: Assistant professor, Department of Cellulose Industries Engineering, Natural resources faculty, Behbahan Khatam Alanbia University of Technology, Behbahan, Iran, Email: P.rezayati@gmail.com
2-Assistant professor, Department of Cellulose Industries Engineering, Natural resources faculty, Behbahan Khatam Alanbia University of Technology, Behbahan, Iran

Received: July, 2018 Accepted: Oct., 2018

Abstract

The use of old corrugated container (OCC) is considered an effective solution in paper and paperboard productions considering environmental and economic reasons **.** However, the strength properties of recycled pulp are weaker than the virgin pulp mainly due to hornification. Therefore, various methods such as adding strength enhancing materials and mechanical treatments are used to improve the quality of the recycled pulp. Low production capacity if some the recycling plants imposes limitation in investment on mechanical treatments (refiners) equipment in their production line. In this research, application of cationic starch and cellulose nanofibers (CNF) as strengthen additives and as an alternative for mechanical refining was investigated in the paper and paperboard production from OCC. In this study, cationic starch in one level (2%) and cellulose nanofibers in 3 levels (2, 4, 6%) were used and compared to control (refined and non-refined) samples. Results showed that 2% cationic starch and 4% CNF improved the tensile and burst indices with almost similar or more than refining of pulp, while the pulp dewatering time and paper density were remained at the same level. Therefore, the aforementioned conditions are recommended as a substitute for refining in small units of OCC recycling for paper and paperboard production.

Keywords: Cellulose nanofiber (CNF), cationic starch (CS), OCC, refining, strength properties.