مقاله پژوهشی

نشریه علمی تحقیقات علوم چوب و کاغذ ایران
جلد ۳۶ شماره ۲، صفحه ۱۶۹-۱۵۷، (۱۴۰۰)

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22092/IJWPR.2021.342727.1608
شناسه دیجیتال (DOR): 20.1001.1.17350913.1400.36.2.6.6

بررسی جایگزینی خمیر کاغذ الیاف بلند وارداتی با نانو الیاف سلولز و مواد کاتیونی در ساخت کاغذ بادوام

جعفر ابراهیم‌پور کاسمانی[۱*]، احمد ثمریها[۲] و علیرضا خاکی فیروز[۳]

۱*- دانشیار، گروه مهندسی علوم و صنایع چوب و کاغذ، واحد سوادکوه، دانشگاه آزاد اسلامی، سوادکوه، ایران، پست‌الکترونیک: jafar_kasmani@yahoo.com

۲- گروه صنایع چوب، دانشگاه فنی و حرفه ای، تهران، ایران.

۳- پژوهشکده شیمی و پتروشیمی، گروه پژوهشی بسته بندی و سلولزی، پژوهشگاه استاندارد، کرج، ایران.

تاریخ دریافت: دی ۱۳۹۹ تاریخ پذیرش: اردیبهشت ۱۴۰۰

چکیده

این تحقیق با هدف بررسی استفاده از نانو الیاف سلولزی و سیستم‌های دو ترکیبی نشاسته-نانو سلولز و پلی‌آکریل‌آمید-نانو سلولز برای جایگزینی با الیاف بلند شیمیایی وارداتی انجام شده است. در این بررسی خمیر الیاف بلند شیمیایی وارداتی، در ۴ سطح به خمیر پنبه اضافه گردید. نانو الیاف سلولزی در سطح منفرد ۵ درصد، نانو الیاف سلولزی در سطح ترکیبی ۵ درصد با ۱ درصد نشاسته کاتیونی و نانو الیاف سلولزی در سطح ۵ درصد با ۰/۱ درصد پلی اکریل آمید کاتیونی به خمیر پنبه افزوده شد. نشاسته کاتیونی در سه سطح (۰/۵، ۱ و ۱/۵ درصد) و پلی آکریل آمید کاتیونی نیز در سه سطح (۰/۰۵، ۰/۱ و ۰/۱۵ درصد) نسبت به وزن ماده خشک مصرف شد. از هریک از تیمارها، کاغذهای دست‌ساز ۶۰ گرمی ساخته شد و در نهایت خواص فیزیکی، مکانیکی و نوری کاغذهای ساخته شده حاصل از خمیرکاغذهای مختلف مقایسه گردید. نتایج نشان داد که با افزایش نانوسلولز به‌صورت منفرد، در مقایسه با الیاف بلند وارداتی، صافی سطح، مقاومت به کشش، ترکیدن و پاره شدن کاغذ افزایش و نفوذپذیری در برابر هوا، مقاومت به تا شدن و ماتی کاغذ کاهش یافت. با افزایش نانوسلولز در ترکیب با پلی‌آکریل‌آمید کاتیونی، در مقایسه با الیاف بلند وارداتی، نفوذپذیری در برابر هوا و ماتی کاغذ کاهش و صافی سطح، مقاومت به کشش، ترکیدن، پاره شدن و تا شدن کاغذ افزایش یافت. با افزایش نانوسلولز در ترکیب با نشاسته کاتیونی، در مقایسه با الیاف بلند وارداتی، صافی سطح، مقاومت به کشش، ترکیدن و تا شدن افزایش ولی ماتی کاغذ کاهش یافت. نتایج FE-SEM نیز نشان داد با افزایش درصد نانوالیاف سلولزی خلل و فرج بسیار کم شد. به‌طوری‌که بر اثر افزودن ۵ درصد نانو الیاف سلولزی سطح کاغذ هموارتر شد و منافذ به‌طور نسبی پر شدند که نتایج صافی سطح و نفوذپذیری در برابر هوا این گفته را تأیید می‌کند.

واژه‌های کلیدی: نانو الیاف سلولزی، خمیر شیمیایی وارداتی، نشاسته، پلی‌آکریل‌آمید، کاغذ بادوام.

مقدمه

صنعت کاغذسازی و به‌ویژه تولید کاغذهای بادوام در کشور ما به دلیل فاصله ایجاد شده بین صنعت و دانشگاه، نتوانسته به رشد و تعالی مطلوب خود برسد. آنچه مسلم است برای تولید کاغذهای بادوام باید از مواد اولیه مرغوب استفاده نمود. مهمترین ماده اولیه ساخت کاغذهای بادوام مانند اوراق بهادار الیاف سلولزی پنبه است که به‌دلیل دارا بودن خلوص (کریستالیته) بالا در مقایسه با سایر الیاف طبیعی، دارای مقاومت و دوام ذاتی بالایی هستند. به همین دلیل بیش از ۹۰ درصد کاغذهای بادوام برای چاپ

اسکناس دنیا را از الیاف طبیعی پنبه می‌سازند. در تجارت جهانی به دلیل بالا بودن قیمت الیاف پنبه نسبت به الیاف سلولزی دیگر، قیمت تمام شده محصولات کاغذی ساخته شده با پنبه نیز بالاتر از سایر کاغذهای موجود در بازار است. پنبه به دلیل خالص بودن از لحاظ آلفا سلولز، مقاومت و طول بلند الیاف، بهترین گزینه برای تولید انواع کاغذهای بادوام و کاغذهای مخصوص مانند آلبوم، کاغذ رسم، اسکناس و اوراق و اسناد بهادار است (Cerchi & Tullio, 2006).

استفاده از فناوری‌های نوین مانند به‌کارگیری نانوذرات در بهبود کمیت و کیفیت تولید کاغذ، افق‌های جدیدی را برای کاغذسازان بوجود 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 (Hassan *et al.*, 2011; Johansoon *et al.*, 2013). ازاین‌رو تولید به صرفه کاغذ با روش‌های نوین و افزودن نانو ساختارها برای کاهش یا حذف استفاده از خمیرکاغذ الیاف بلند وارداتی از کشورهای مختلف امری ضروریست.

با توجه به کاربرد فناوری نانو در عرصه‌های مختلف صنعتی، استفاده از نانوذرات در صنعت کاغذسازی جایگاه ویژه‌ای داشته و روز به روز نوآوری‌ها و کاربردهای مربوط به آن گسترش می‌یابد. یکی از مهمترین نانوذرات مورد استفاده در کاغذسازی، نانو الیاف سلولزی در چند سال اخیر با توجه به اندازه ابعاد و خواص ویژه سطحی آن به همراه پلیمرهای کاتیونی مانند نشاسته کاتیونی و یا پلی‌اکریل‌آمید کاتیونی (به‌عنوان مواد کمک نگه‌دارنده) به‌عنوان یکی از مواد افزودنی جدید برای بهبود مقاومت کاغذ مورد توجه زیادی قرار گرفته است (Asadpour *et al.*, 2015; Moradian *et al.*, 2015; Latibari *et al.*, 2011). سیستم‌های ماندگاری با استفاده از ذرات نانو براساس ترکیب پلیمرهای کاتیونی و ذرات نانوی آنیونی می‌باشد. در این سیستم، در ابتدای مرحله آماده‌سازی خمیر، پلیمرهای کاتیونی اضافه شده که باعث ایجاد لخته‌های درشت می گردند، این لخته‌ها در نتیجه نیروهای برشی شکسته می شوند، در مرحله بعدی ذرات نانو در مجاورت هدباکس به خمیر اضافه شده و باعث ایجاد لخته‌های ریز و مقاوم در برابر نیروهای برشی می‌شوند. ذرات نانو به دلیل تشکیل لخته‌های مقاوم به نیروهای برشی و توانایی ایجاد لخته دوباره در صورت پخش شدن لخته‌های اولیه، باعث نگهداری هرچه بیشتر مواد در کاغذ با حفظ مقاومت‌های مکانیکی می‌شوند. کارخانه‌های کاغذ و مقوا برای بهبود برخی از مقاومت‌های مکانیکی کاغذ تولیدی از نشاسته کاتیونی استفاده می‌کنند که به‌دلیل مشکلات فرایندی امکان استفاده زیاد آن محدود است. در این راستا سعی در استفاده ترکیبی از نشاسته و خمیرکاغذ الیاف بلند وارداتی است.

در بیشتر تحقیقات کاربرد نانو الیاف سلولزی برای کاغذسازی، یک بسپار کاتیونی به‌عنوان کمک نگهدارنده استفاده می‌شود (Rezayati *et al.*, 2013; Petroudy *et al.*, 2014; Moradian *et al.*, 2015). اما استفاده ترکیبی از نانو الیاف سلولزی به همراه نشاسته کاتیونی و پلی‌اکریل آمید کاتیونی تحقیقات چندانی منتشر نشده است (Nechyporchuk *et al.*, 2016).

گزارش‌های تحقیقات اخیر دلالت بر نقش برجسته نانو سلولز در بهبود مقاومت‌های کاغذ دارد (González *et al.*, 2012; Hadilam *et al.*, 2013; Hassan *et al.*, 2011; Hii *et al.*, 2012). از اثرهای افزودن نانو الیاف سلولزی می‌توان به افزایش اتصال داخلی و مقاومت در مقابل عبور هوا اشاره نمود (Hamzeh & Rostampour-Hafthkhani, 2008; Rezayati Charani *et al.*, 2013; Sehaqui et al., 2013). تحقیقات نشان داده است که استفاده از نانو الیاف قادر به افزایش مقاومت به پاره شدن به اندازه الیاف بلند نیست، آنچه اثر زیادی بر مقاومت به پاره شدن کاغذ دارد، میانگین طول الیاف است. به‌عبارت‌دیگر کاربرد نانوالیاف، پیونددهی را به میزان قابل توجهی افزایش می‌دهد و از این طریق به مقدار اندکی باعث افزایش مقاومت به پاره شدن می‌شود. اما همانند الیاف بلند نمی‌تواند بر میانگین طول

الیاف اثر قابل توجهی داشته باشد، ازاین‌رو قابلیت جبران کاهش مصرف الیاف بلند در مقادیر زیاد را ندارد. همین مسئله در مورد سایر مواد اعم از نشاسته و سایر افزودنی‌های مقاومت خشک صدق می‌کند (Hadilam *et al.*, 2013). در بیشتر تحقیقات کاربرد نانو الیاف سلولزی برای کاغذسازی، یک بسپار کاتیونی به‌عنوان کمک نگه‌دارنده استفاده می‌شود (Petroudy *et al.*, 2014; Rezayati Charani *et al.*, 2012).

افزودن نانو الیاف سلولز و پلی‌اکریل‌آمید کاتیونی موجب افزایش ماندگاری شده است (Tajik *et al.*, 2016). با استفاده از مواد افزودنی مقاومت خشک می‌توان پیوندهای بین الیاف را به مقدار زیادی افزایش داد (Hamzeh & Rostampour-Haftkhani, 2008). با توجه به مقاومت ذاتی و تمیزی ظاهری الیاف آن موجب شده تا مورد توجه تولیدکنندگان کاغذهای خاص مانند اوراق بهادار قرار گیرد. از سویی مقاومت‌های مناسبی با ساخت کاغذ از الیاف پنبه حاصل نمی‌شود. برای جبران کاهش مقاومت‌ها از الیاف شیمیایی وارداتی استفاده می‌گردد. اما الیاف شیمیایی علاوه بر اینکه از لحاظ اقتصادی برای کارخانه مشکلاتی ایجاد می کند، تهیه آن برخی مواقع به سختی امکان‌پذیر است. بنابراین در این تحقیق سعی شده است به بررسی افزودنی‌های نانو الیاف سلولزی همراه با نشاسته و پلی‌اکریل‌آمید کاتیونی به منظور جایگزینی آنها با خمیرکاغذ الیاف بلند شیمیایی وارداتی پرداخته شود.

با توجه به مجموع نتایج به‌دست‌آمده در پژوهش‌های مختلف، نوع عامل کاتیونی تأثیر قابل ملاحظه‌ای در عملکرد نانوسلولز در بهبود خواص کاغذ داشته است. بنابراین در این تحقیق سعی شده است به بررسی مجزا و ترکیبی افزودنی‌های نانو الیاف سلولزی همراه با نشاسته و پلی‌اکریل‌آمید کاتیونی به‌منظور جایگزینی آنها با خمیرکاغذ الیاف بلند وارداتی پرداخته شود. ازاین‌رو این تحقیق با هدف افزودن و تعیین سطح بهینه از افزودنی‌های نانو الیاف سلولزی همراه با نشاسته و پلی‌اکریل‌آمید کاتیونی به خمیرکاغذ برای امکان‌سنجی جایگزینی آن با خمیرکاغذ الیاف بلند در مقیاس آزمایشگاهی انجام شد.

مواد و روش‌ها

خمیرکاغذ

در این بررسی خمیر کاغذ کرافت الیاف بلند رنگ‌بری شده سوزنی برگان (نوئل) وارداتی پالایش شده حاصل از فرایند کرافت از کارخانه U-ilimsk روسیه تهیه شد. پالایش خمیرکاغذهای تهیه شده از کارخانه مذکور تا درجه روانی حدود ۳۲۰ ml.CSF طبق استاندارد تاپی شماره T 248 sp-00 انجام شد. میانگین طول الیاف شیمیایی بعد از پالایش ۱/۹ میلی‌متر بود، همچنین خمیرکاغذ پالایش شده الیاف پنبه (به یک اندازه پالایش شده) با طول میانگین ۱/۲ میلی‌متر از کارخانه تکاب تهیه و به آزمایشگاه انتقال یافت. الیاف پنبه مورد استفاده در تحقیق که از کارخانه تکاب تهیه شده از نوع درجه دو پست و یا دو سفید است که معمولاً از دشت گرگان، سمنان و یا ورامین خریداری می‌شوند. پنبه‌ها به‌صورت بسته‌های بزرگ (عدل) در بازار عرضه می‌گردند. پنبه بعد از حلاجی و تمیزسازی در کلینرهای سرعت بالا، به بخش فایبر کاتر فرستاده می‌شود. الیاف پنبه بعد از کوتاه شدن اولیه، برای هیدروفیل شدن (آبدوستی) در یک مخزن با آب مخلوط شده و در خروجی مخزن پالایش اولیه با کانفلو ریفاینر انجام می‌شود. عملیات پالایش خمیر پنبه به‌کمک ریفاینرهای کلافلین (از نوع کونیکال ریفاینر) به صورت مجموعه انجام می‌شود. خمیرهای حاصل درون کیسه‌های پلاستیکی دربسته قرار داده شد و تا موقع مصرف در داخل یخچال در دمای حدود $4\ ^{\circ}C$ نگهداری شد.

نانو الیاف سلولزی

نانوسلولز از شرکت نانو نوین پلیمر (پارک علم و فناوری مازندران) تهیه شد. نانوالیاف سلولز این شرکت با استفاده از روش مکانیکی سوپر آسیاب از انواع منابع سلولزی تهیه شد. قطر این نانوفیبر سلولز بین ۱۰ تا ۷۰ نانومتر با متوسط قطری حدود ۳۵ نانومتر است و طول آن به بیش از ۵ میکرومتر رسیده، ضریب شکلی آن بیش از ۱۵۰ می‌باشد.

پلی‌آکریل‌آمید

پلی‌اکریل‌آمید به روش رضایتی چرانی (۲۰۱۳) آماده‌سازی شد (Rezayati Charani *et al.*, 2013). پلی آکریل آمید کاتیونی با جرم مولکولی ۳۵۹۱۸۸ g/mol از شرکت دگوسا (Degussa) کشور آلمان تهیه شد. ابتدا براساس درصد خلوص پلی آکریل آمید کاتیونی، با آب‌مقطر به غلظت ۱٪ رسانده شد و بعد یک میلی‌لیتر از این محلول داخل یک بالن ۱۰۰ میلی‌لیتر آب‌مقطر اضافه شد و به‌مدت ۳ ساعت با یک مگنت به‌هم زده شد. محتویات بالن به‌مدت ۲۴ ساعت داخل یخچال قرار داده شد. سپس توسط آب مقطر به حجم ۱۰۰ میلی‌لیتر رسانده و محلول با غلظت ۰/۰۱ درصد، دوباره به‌مدت ۲۰ دقیقه هم زده شد. این محلول در سه سطح ۰/۰۵، ۰/۱ و ۰/۱۵ درصد بر مبنای وزن خشک خمیرکاغذ مورد استفاده قرار گرفت.

نشاسته

نشاسته کاتیونی با منبع سیب‌زمینی از شرکت Lyckeby Amylex کشور اسلواکی تهیه شد. نشاسته کاتیونی دارای pH حدود ۶، درجه جایگزینی این نشاسته ۰/۰۳۵ mol/mol، میزان پروتئین ۱/۵ درصد، میزان پروتئین ۰/۲۵ درصد و خاکستر ۱ درصد بود. برای تهیه محلول نشاسته، ۰/۵ gr/c از آن را برداشته و با آب‌مقطر به حجم ۱۰۰ میلی‌لیتر رسانده شد.

جدول ۱- ترکیب تیمارهای مورد بررسی و نیز مقادیر مصرف نانو الیاف سلولزی، نشاسته کاتیونی و پلی‌اکریل‌آمید

شماره تیمار	کد تیمار	خمیر الیاف پنبه	خمیر الیاف بلند شیمیایی وارداتی	نانو الیاف سلولزی	نشاسته کاتیونی	پلی‌آکریل‌آمید کاتیونی
۱	0LP	۱۰۰	۰	۰	۰	۰
۲	10LP	۹۰	۱۰	۰	۰	۰
۳	20LP	۸۰	۲۰	۰	۰	۰
۴	30LP	۷۰	۳۰	۰	۰	۰
۵	5NLC	۹۵	۰	۵	۰	۰
۶	5NLC+1CS	۹۴	۰	۵	۱	۰
۷	5NLC+0.1PAM	۹۴/۹	۰	۵	۰/۱	۰
۸	0.5CS	۹۹/۵	۰	۰	۰/۵	۰
۹	1CS	۹۹	۰	۰	۱	۰
۱۰	1.5CS	۹۸/۵	۰	۰	۱/۵	۰
۱۱	0.05PAM	۹۹/۹۵	۰	۰	۰	۰/۰۵
۱۲	0.1PAM		۰	۰	۰	۰/۱
۱۳	0.15PAM		۰	۰	۰	۰/۱۵

محتویات بالن بر روی یک هیتر با دمای ۷۰ درجه سانتی گراد به مدت ۲۰ دقیقه همزده شد، آنگاه محلول به مدت ۳۰ دقیقه در این دما نگه‌داری گردید. از این محلول در سه سطح ۰/۵، ۱ و ۱/۵ درصد بر اساس وزن خشک خمیرکاغذ با زمان اختلاط ۱۵ دقیقه به سوسپانسیون خمیرکاغذهای پالایش شده استفاده شد. به‌منظور جلوگیری از تغییرات گرانروی و غلظت،

نشاسته به‌صورت تازه تهیه شده مورد استفاده قرار گرفت.

برای ماندگاری بهتر نانوالیاف در کاغذ، در توالی افزودن مواد در سیستم‌های دوترکیبی، ابتدا نانوالیاف سلولزی و بعد افزودنی کاتیونی اضافه شد. در جدول ۱ مشخصات ۱۳ ترکیب خمیرکاغذ برای ساخت کاغذ دست‌ساز آورده شده است. برای ساخت کاغذهای ترکیبی، سوسپانسیون خمیرکاغذ با درصد خشکی ۰/۳ با دستگاه جداکننده الیاف با ۱۵۰۰ دور در دقیقه به‌مدت ۱۰۰ ثانیه در دمای محیط همزده شد. نانوالیاف سلولزی نیز به‌میزان ۵ درصد بر مبنای وزن خشک خمیرکاغذ افزوده شد و پس از همزدن به‌مدت ۶۰ ثانیه، نشاسته کاتیونی و / یا پلی‌اکریل آمید کاتیونی طبق مقادیر جدول ۱ به خمیرکاغذ الیاف پنبه اضافه گردید.

تهیه کاغذهای دست‌ساز

تعداد ۱۰ عدد کاغذ دست‌ساز ۶۰ گرمی بر اساس آئین‌نامه استاندارد شماره SCAN C-26:67 و با استفاده از دستگاه کاغذساز دستی[1] مدل KCL برای ۱۳ ترکیب خمیرکاغذ مطابق جدول شماره ۱ ساخته شد. سپس کاغذهای دست‌ساز توسط یک پرس و خشک‌کن آزمایشگاهی تحت شرایط ذکر شده در استاندارد مذکور برای آزمون‌های مورد نظر آماده گردید.

اندازه‌گیری خواص کاغذ

خواص فیزیکی شامل نفوذپذیری در برابر هوا و صافی سطح به‌ترتیب مطابق استاندارد (ISO 1425، TAPPI T555om-04)، مکانیکی شامل شاخص مقاومت به کشش، شاخص مقاومت به ترکیدن، شاخص مقاومت به پاره‌شدن و مقاومت به تاخوردگی به‌ترتیب مطابق استاندارد (TAPPI T494om-96، TAPPI T403om-98، TAPPI T414om-98 و TAPPI T424om-98) و نوری کاغذها مطابق استاندارد TAPPIT452om-98 اندازه‌گیری شد.

مطالعات میکروسکوپی

در این تحقیق، به‌منظور بررسی ساختار کاغذهای تهیه شده از میکروسکوپ الکترونی از نوع MIRA3 TESCAN ساخت کشور چک استفاده شد.

طرح آماری

طرح آزمایشی مورد استفاده در این تحقیق، از نوع کاملاً تصادفی بود، به‌منظور تجزیه‌وتحلیل داده‌ها از تجزیه واریانس یک‌طرفه استفاده و گروه‌بندی میانگین‌ها با آزمون دانکن در سطح اعتماد ۹۵ درصد با نرم‌افزار SPSS (نسخه ۲۳) انجام شد.

نتایج

برای بررسی اختلاف آماری بین میانگین خواص مورد بررسی، از آزمون تجزیه واریانس استفاده شد. مقدار F به‌دست آمده از این آزمون با F جدول مقایسه شد که برای همه خواص مورد بررسی به غیر از روشنی حکایت از وجود اختلاف معنی‌دار در سطح اعتماد ۹۵٪ دارد (جدول ۲).

صافی سطح و نفوذپذیری کاغذ در برابر هوا

آزمون دانکن، میانگین‌های صافی سطح کاغذها را در گروه‌های مختلف قرار داد (جدول ۳). صافی سطح کاغذ در بسیاری از کاربردها به‌ویژه برای چاپ‌پذیری بهتر و کیفیت بیشتر چاپ از اهمیت قابل ملاحظه‌ای برخوردار است (González *et al*., 2012). ازاین‌رو در یک ترکیب مشخص به‌نوعی عملکرد مواد افزودنی را در سوسپانسیون خمیرکاغذ مشخص می‌کند. به‌عنوان مثال، دلمه شدن ذرات ریز الیاف می‌تواند باعث بهبود صافی سطح کاغذ شود (Hamzeh & Rostampour-Haftkhani, 2008). به‌نحوی‌که بیشترین صافی سطح کاغذ با افزودن ۱/۵ درصد نشاسته کاتیونی به خمیرکاغذ پنبه حاصل شده است (گروه f). استفاده از نانوسلولز به‌صورت منفرد و ترکیبی باعث افزایش صافی سطح کاغذ گردیده است. ساختار نانو الیاف طوری است که باعث ماندگاری بیشتر الیاف می‌شود. نزدیکی نانو الیاف و الیاف به یکدیگر و افزایش ماندگاری

1 -Hand sheet Maker

نرمه‌ها و قرارگرفتن در فضای خالی بین الیاف باعث افزایش صافی سطح کاغذ می‌گردد.

نفوذپذیری در برابر هوا ساختار داخلی کاغذ را به‌طور غیرمستقیم نشان می‌دهد. به‌طوری‌که چگونگی توزیع مواد افزودنی و الیاف، نرمه‌های الیاف و کیفیت شکل‌گیری کاغذ می‌توانند بر آن تأثیرگذار باشند (Asadpour *et al.*, 2015). آزمون دانکن میانگین‌های نفوذپذیری کاغذ در برابر هوا را در ۷ گروه مستقل قرار داد (جدول ۳). به‌طورکلی با بهبود کیفیت شکل‌گیری، نفوذپذیری در برابر هوا کاغذ کاهش می‌یابد.

جدول ۲- تجزیه واریانس (مقدار F و سطح معنی‌داری) اثر متغیرهای ساخت بر مقاومت‌ها

	صافی سطح (میلی‌لیتر بر دقیقه)	نفوذپذیری در برابر هوا (میلی‌لیتر بر دقیقه)	شاخص مقاومت به کشش (نیوتن متر بر گرم)	شاخص مقاومت به پاره شدن (میلی نیوتن مترمربع بر گرم)	شاخص مقاومت به ترکیدن (کیلو پاسکال مترمربع بر گرم)	مقاومت به تاخوردگی	ماتی (درصد)	روشنی (درصد)
متغیرها	۱۹/۴۵۴*	۱۳/۵۰۲*	۳/۹۰۸*	۸/۲۲۰*	۲۴/۲۲۸*	۲۵۱/۴۶۸*	۳/۹۶۱*	۱/۹۸۳ns

سطح معنی‌داری: *۹۵٪، ns: عدم معنی‌داری

Significance level: 95%, ns: no significance

با اضافه نمودن هر یک از افزودنی‌ها به صورت مجزا و ترکیبی، بهترین عملکرد در بهبود نفوذپذیری در برابر هوا حاصل شده است که در مقایسه با الیاف بلند، افزودنی‌های دیگر قابلیت جایگزینی با خمیرکاغذ پنبه را از این نظر دارند. بر اساس پژوهش‌های پیشین، نفوذپذیری در برابر هوا با افزایش نرمه‌ها و نانوالیاف سلولزی کاهش می‌یابد. علت آن شاید به پرشدن خلل و فرج کاغذ با نرمه‌ها و نانوالیاف مربوط باشد که موجب کاهش نفوذپذیری هوا در کاغذ نیز می‌شود. همچنین پراکنش مناسب ذرات نانوالیاف سلولزی، نفوذپذیری را در برابر هوا کاهش می‌دهد (Goli *et al.*, 2016).

شاخص مقاومت کششی کاغذ دست‌ساز

مقاومت به کشش از مهمترین ویژگی‌های کاربردی انواع مختلف کاغذ است که تحت تأثیر عواملی از مقاومت پیوند بین الیاف، تعداد پیوند و شکل‌گیری کاغذ است (Hii *et al.*, 2012).

جدول ۳ میانگین تغییرات شاخص مقاومت کششی را برای ۱۳ ترکیب خمیرکاغذ مختلف را نشان می‌دهد. گروه‌بندی دانکن میانگین‌های شاخص مقاومت کششی را در ۳ گروه مجزا قرار داد. بیشترین شاخص مقاومت کششی کاغذ با افزودن ۵٪ نانو الیاف سلولزی و ۱٪ نشاسته کاتیونی به‌دست آمده است (گروه c). همه افزودنی‌ها در مقایسه با خمیرکاغذ الیاف بلند موجب افزایش بیشتر این مقاومت شده‌اند. افزودن پلی‌اکریل‌آمید کاتیونی به دلیل نگهداشتن بیشتر نانو الیاف و نرمه‌ها و افزایش پیوندهای ممکن شاخص مقاومت کششی کاغذ را بهبود می‌دهد (Petroudy *et al.*, 2014). مقاومت به کشش کاغذ شاخص مناسبی برای پیوندهای بین الیاف است که در واقع ترکیبی از سایر مقاومت‌هاست.

جدول ۳- مقایسه میانگین و گروه‌بندی آن بر خواص فیزیکی، مکانیکی و نوری کاغذهای دست‌ساز

شماره تیمار	کد تیمار	صافی سطح	نفوذپذیری در برابر هوا	شاخص مقاومت به کشش	شاخص مقاومت به ترکیدن	شاخص مقاومت به پاره شدن	مقاومت به تاخوردگی	ماتی	روشنی
۱	0LP	۱۷۶۶/۷cde	۱۲۰۰cde	۱/۹۳a	۲/۳۳a	۱۲/۲a	۵۳۸/۳e	۹۱/۱۳cd	۶۶/۹۶
۲	10LP	۱۶۰۰ab	۱۳۰۰def	۲/۰۳a	۲/۵۳ab	۱۲/۶ab	۸۰/۳ab	۹۲/۶۹d	۶۴/۵۸
۳	20LP	۱۶۰۰ab	۱۵۶۶/۷g	۲/۰۷a	۲/۶۷bc	۱۳/۱cde	۲۷۱/۷c	۸۹/۸۱abc	۷۲/۲۱
۴	30LP	۱۵۳۳/۳a	۱۶۵۰g	۲/۰۹a	۲/۴۳ab	۱۳/۴def	۵۵a	۸۹/۱۸abc	۷۱/۲۶
۵	5NLC	۱۷۱۶/۷cd	۹۳۳/۳b	۲/۲۰ab	۲/۹۰c	۱۳/۶f	۲۲۱/۷c	۹۰/۲۹bc	۶۹/۴۵
۶	5NLC+1CS	۱۸۶۶/۷e	۶۳۳/۳a	۲/۸۴c	۳/۴۳d	۱۲/۸bc	۶۹۶/۳f	۸۹/۲abc	۷۲/۵۱
۷	5NLC+0.1PAM	۱۸۶۶/۷e	۱۰۱۶/۷bc	۲/۱۸ab	۲/۷۰bc	۱۳/۴def	۳۴۹/۷d	۸۷/۹a	۷۰/۳۲
۸	0.5CS	۱۸۰۰de	۱۲۰۰cde	۲/۶۲bc	۳/۴۷d	۱۲/۹bcd	۱۳۷/۷b	۸۹/۸۶abc	۶۷/۱۹
۹	1CS	۱۷۶۶/۷cde	۱۴۱۶/۷efg	۲/۷۶c	۳/۶۳de	۱۳/۴ef	۹۵۰h	۸۹ab	۶۹/۶۸
۱۰	1.5CS	۲۰۳۳/۳f	۱۵۳۳/۳fg	۲/۶۳bc	۳/۸۳f	۱۲/۹bcd	۱۱۱۴/۷i	۸۹/۱۷abc	۷۱/۲۷
۱۱	0.05PAM	۱۶۶۶/۷bc	۱۴۳۳/۳efg	۲/۳۷ab	۲/۷۰bc	۱۳/۷f	۱۳۳/۷b	۸۸/۶۴ab	۶۶/۹۶
۱۲	0.1PAM	۲۰۰۰f	۱۰۶۶/۷bc	۲/۳۸ab	۲/۸۷c	۱۲/۶ab	۱۱۰۰/۷i	۸۹/۱۵abc	۷۰/۸۵
۱۳	0.15PAM	۱۷۸۳/۳	۱۰۶۶/۷bc	۲/۲۵ab	۲/۹۳c	۱۳bcde	۷۸۷/۷g	۸۹/۷۱abc	۷۲/۵۷

عملکرد نشاسته کاتیونی در بهبود خواص کاغذ همانند تأثیر پالایش بر روی الیاف بوده، با این تفاوت که تأثیر کمتری در کاهش آبگیری در ماشین کاغذ دارد (Kasmani *et al.*, 2013). استفاده از حدود ۶٪ نانوالیاف سلولزی بهبود مقاومت کششی برابر استفاده از ۲۰٪ خمیرکاغذ الیاف بلند در ساخت کاغذ از خمیرکاغذ کرافت پهن‌برگان فراهم می‌کند (Kasmani *et al.*, 2013). البته سطح ویژه فیبرهای سلولزی بر اثر کوچک‌تر شدن ابعاد تا مقیاس نانومتری افزایش می‌یابد. این به معنی قرار گرفتن تعداد بیشتر گروه‌های در دسترس هیدروکسیل در سطح نانوالیاف است که توانایی تشکیل پیوند هیدروژنی را با نانوالیاف مجاور دارند و در نهایت سبب تشکیل شبکه‌ای از نانوفیبرها می‌شوند که موجب افزایش مقاومت کششی کاغذ می‌گردد (Yousefi *et al.*, 2011). بااین‌حال مقاومت به کشش کاغذ همیشه کمتر از مقاومت به کشش یک فیبر خواهد بود (Yousefi *et al.*, 2011). 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.

شاخص مقاومت به ترکیدن کاغذ دست‌ساز

روند تغییرات میانگین شاخص مقاومت به ترکیدن برای نمونه‌های خمیرکاغذ در جدول ۳ نشان داده شده است. گروه‌بندی دانکن میانگین‌های داده‌های شاخص مقاومت به ترکیدن تیمارهای ذکرشده را در ۵ گروه مستقل قرار داد.

بیشترین مقاومت با افزودن ۱/۵ درصد نشاسته کاتیونی به‌دست آمده است (گروه f). مقاومت به ترکیدن ازجمله مقاومت‌هایی است که به‌طول فیبر، ضخامت دیواره فیبر و میزان پیوند بین الیاف بستگی دارد ولی بیشتر تحت تأثیر اتصال بین الیاف است (Akbarpour & Resalati, 2011; Asadpour *et al.*, 2008). درگیری فیزیکی بین نانوالیاف با یکدیگر و نانوالیاف با الیاف در ساختار کاغذ باقی‌مانده و موجب افزایش مقاومت به ترکیدن می‌شود. تیمارهای پلی اکریل‌آمید کاتیونی کمترین مقاومت را نشان داده است که به نظر می‌رسد دلیل آن به‌هم‌خوردگی جزئی شکل‌گیری کاغذ باشد. نشاسته کاتیونی نیز به دلیل سطح ویژه بالا و ایجاد درگیری فیزیکی بین نشاسته و الیاف سبب افزایش تعداد پیوند هیدروژنی و افزایش سطح پیوند بین الیاف و کاهش فضای خالی بین الیاف می‌شود که افزایش پیوند بین الیاف می‌تواند قدرت شبکه‌ای الیاف را افزایش دهد و با افزایش پیوند مانع از لغزش الیاف شود و منجر به استحکام شبکه لیفی گردد (Tajik *et al.*, 2016). برخی از محققان استفاده از سیستم دو ترکیبی نشاسته- نانوالیاف سلولز را به‌دلیل مشکلات کمتر فرایندی نسبت به استفاده از نشاسته کاتیونی به تنهایی برای بهبود مقاومت‌های کاغذ در اولویت می‌دانند (Moradian *et al.*, 2015).

شاخص مقاومت به پارگی کاغذ دست‌ساز

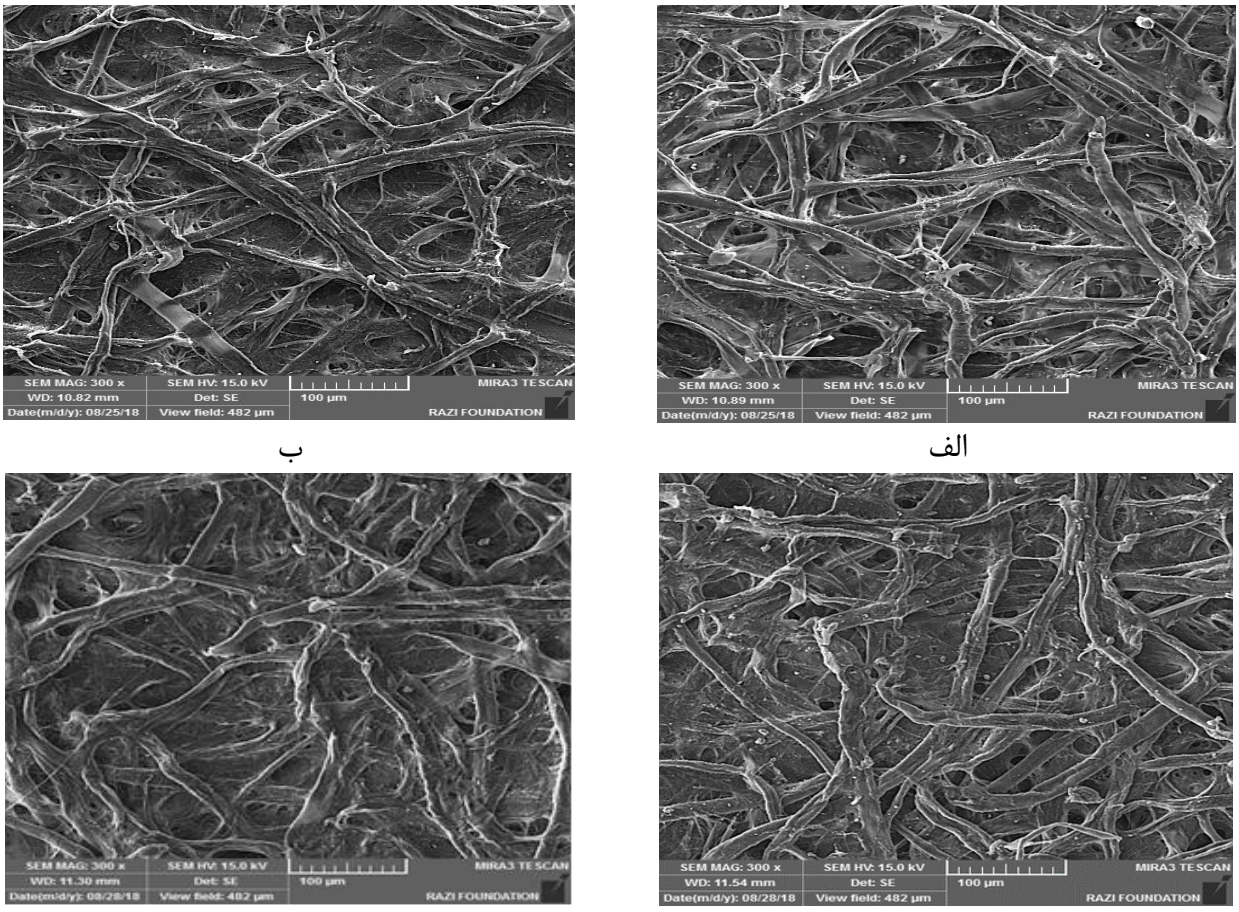
عوامل اصلی تأثیرگذار روی مقاومت به پارگی میانگین طول و قطر الیاف و نیز میزان پیوندیابی الیاف و جهت‌یافتگی در ساختار کاغذ می‌باشد (Goli *et al.*, 2016). تغییرات شاخص مقاومت به پارگی نمونه‌های خمیرکاغذ در جدول ۳ دیده می‌شود. بیشترین مقاومت نیز با افزودن ۰/۰۵ درصد پلی آکریل آمید به‌دست آمد (گروه f). افزودن پلی اکریل آمید کاتیونی به دلیل نگه داشتن بیشتر نرمه‌ها و نانو الیاف و افزایش پیوند، شاخص مقاومت به پارگی کاغذ را بهبود می‌دهد. اثر نشاسته کاتیونی بر روی الیاف همانند تأثیر عمل پالایش است، با این اختلاف که الیاف سالم مانده، در نتیجه مقاومت به پارگی بهبود می‌یابد (Kasmani *et al.*, 2013). افزایش این مقاومت با استفاده از همه افزودنی‌ها در مقایسه با خمیرکاغذ الیاف بلند بیشتر و یا در محدوده آن می‌باشد. با افزودن ۵٪ نانوالیاف لیگنوسلولزی به خمیرکاغذ CTMP افزایش جزئی در مقاومت به پارگی نسبت به نمونه شاهد گزارش شده، اما با افزودن مقدار بیشتر روند تغییرات این مقاومت کاهشی است (Ghofran *et al.*, 2016). هادیلام و همکاران (۲۰۱۳) گزارش کرده‌اند که با افزودن نانو الیاف سلولزی، مقاومت به پارگی کاغذها کاهش می‌یابد؛ به‌طوری که کمترین مقاومت به پارگی در نانو کاغذ مشاهده شد، ولی با وجود کاهش مقاومت به پارگی در کاغذهای ترکیبی با شرایط مذکور، این کاهش از لحاظ آماری چندان معنی‌دار نبود (Hadilam *et al.*, 2013). Lindström و همکاران (۲۰۱۴) نشان دادند 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.

مقاومت به تاخوردگی کاغذ دست‌ساز

مقاومت به تاخوردگی کاغذ یک شاخص مهم در کاغذهای بادوام به‌ویژه اسکناس است (Fathi & Kasmani, 2019). این مقاومت یکی از پیچیده‌ترین خواص عمومی کاغذ است. پیچیدگی آزمون مقاومت به تاخوردگی به این دلیل است که این آزمون، ترکیبی از مقاومت کشیدگی، کششی، مقاومت در برابر فشار، انحناپذیری و دیگر تنش‌های برشی و تغییر طول نسبی است (Yazdani aghmashhadi *et al.*, 2015). جدول ۳ میانگین تغییرات مقاومت به تاخوردگی را برای نمونه‌های خمیرکاغذ نشان می‌دهد. آزمون دانکن میانگین‌های مقاومت به تاخوردگی را به ۹ گروه مستقل طبقه‌بندی کرده است. تیمارهای حاوی نشاسته کاتیونی یا پلی‌اکریل‌آمید به خمیرکاغذ به دلیل افزایش سطح تماس و امکان پیوند بیشتر باعث افزایش مقاومت به تاخوردگی شده است.

خواص نوری کاغذ دست‌ساز

درجه روشنی و ماتی کاغذ تابع ویژگی‌های نوری الیاف تشکیل‌دهنده کاغذ و مقدار و نحوه پراکنش مواد پرکننده در کاغذ است (۲۴ و ۲۷). جدول ۳ میانگین تغییرات مقاومت ماتی را برای نمونه‌های خمیرکاغذ نشان می‌دهد. آزمون دانکن میانگین ماتی کاغذها را در ۴ گروه مستقل قرار داد. کمترین ماتی مربوط به ۱۰ درصد خمیر شیمیایی وارداتی به مقدار ۶۲/۶۹ درصد بود که در گروه a قرار گرفت. در هنگام استفاده از نانوالیاف سلولزی به صورت منفرد و ترکیبی، میزان ماتی کاهش یافته است. شکل ۳ (ب) روند تغییرات روشنی را برای نمونه‌های کاغذ نشان می‌دهد. کمترین روشنی مربوط به ۱۰ درصد الیاف بلند وارداتی و بیشترین روشنی مربوط به استفاده از ۱۵٪ پلی‌اکریل‌آمید می‌باشد که از نظر آماری با میانگین روشنی کاغذ دارای ۱۰٪ الیاف بلند و یا ۰/۵ درصد نشاسته تفاوت معنی‌داری ندارد. از آنجایی که نانوالیاف سلولزی مورد استفاده از خمیرکاغذ رنگبری نشده تهیه شده است، بنابراین کاهش روشنی کاغذ با افزودن این ماده بدیهی است.



الف ب

ج د

شکل ۱- سطح کاغذ حاصل از خمیر کاغذ، الف) ۰ درصد خمیر شیمیایی، ب) ۵ درصد نانو الیاف سلولزی، ج) ۱/۵ درصد نشاسته کاتیونی، د) ۰/۱۵ درصد پلی‌اکریل‌آمید

مطالعات میکروسکوپی ساختار کاغذ (FE-SEM) شکل ۱ ریزنگار میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل

میدان FE-SEM را برای ۱۰۰ درصد خمیر پنبه (۰ درصد خمیر شیمیایی)، ۵ درصد نانوالیاف سلولزی، ۱/۵ درصد نشاسته کاتیونی و ۰/۱۵ درصد پلی‌اکریل‌آمید نشان می‌دهد.

کاغذ تهیه شده از الیاف پنبه دارای منافذ و نفوذپذیری در برابر هوای بیشتری به‌ویژه نسبت به کاغذهای دارای نانوالیاف سلولزی می‌باشد. همچنین تجمع ذرات نانوالیاف در سطح کاغذ ساخته شده از ۵٪ نانوالیاف سلولزی (شکل ۵ ب) به چشم می‌خورد که در سیستم‌های دوترکیبی بهبود یافته است. Hii و همکاران (۲۰۱۲) در تصاویر میکروسکوپ الکترونی نشان داده‌اند 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 می‌گردد.

بحث

در این پژوهش، جایگزینی خمیرکاغذ الیاف بلند با ۵٪ نانوالیاف سلولزی و ترکیب آن با نشاسته کاتیونی یا پلی‌اکریل‌آمید در خمیرکاغذ پنبه بررسی شد. به‌طور معمول افزودن خمیرکاغذ الیاف بلند شیمیایی، نانو الیاف سلولزی، نشاسته و پلی‌اکریل‌آمید کاتیونی به خمیرکاغذ پنبه می‌تواند تا حدودی موجب بهبود بیشتر ویژگی‌های کاغذ تولیدی شود؛ اما هریک از آنها محدودیت‌هایی را در سیستم تولید دارند. استفاده از ۱/۵ درصد نشاسته کاتیونی قابلیت جایگزینی با ۳۰ درصد خمیرکاغذ الیاف بلند را دارد اما به دلیل مشکلات فرایندی قابل توصیه نیست.

با توجه به مجموع نتایج به‌دست آمده در این پژوهش، مشخص شد که با افزایش خمیر الیاف بلند شیمیایی وارداتی، صافی سطح، مقاومت به تاخوردن و ماتی کاغذ کاهش یافت اما نفوذپذیری کاغذ در برابر هوا، مقاومت به ترکیدن و پارگی کاغذ افزایش یافته است. با افزایش نانوسلولز به‌صورت منفرد، در مقایسه با الیاف شیمیایی وارداتی، صافی سطح، مقاومت به کشش، ترکیدن و پاره شدن کاغذ افزایش و نفوذپذیری کاغذ در برابر هوا، مقاومت به تا شدن و ماتی کاغذ کاهش یافته است. با افزایش نانوسلولز در ترکیب با پلی‌آکریل‌آمید کاتیونی، در مقایسه با الیاف شیمیایی وارداتی، نفوذپذیری کاغذ در برابر هوا و ماتی کاغذ کاهش و صافی سطح، مقاومت به کشش، ترکیدن، پاره شدن و تا شدن کاغذ افزایش یافته است. با افزایش نانوسلولز در ترکیب با نشاسته کاتیونی، در مقایسه با الیاف شیمیایی وارداتی، صافی سطح، مقاومت به کشش، ترکیدن و تا شدن افزایش ولی ماتی کاغذ کاهش یافته است. با افزایش پلی‌آکریل‌آمید کاتیونی، صافی سطح، مقاومت به کشش، ترکیدن و تا شدن افزایش و نفوذپذیری کاغذ در برابر هوا کاغذ کاهش یافته است. با افزایش نشاسته کاتیونی، صافی سطح، مقاومت به کشش، ترکیدن و تا شدن کاغذ افزایش ولی نفوذپذیری کاغذ در برابر هوا و ماتی کاهش یافته است. نتایج FE-SEM نیز نشان داد با افزایش درصد نانوالیاف سلولزی خلل و فرج بسیار کم شد. به‌طوری‌که بر اثر افزودن ۵ درصد نانو الیاف سلولزی سطح کاغذ هموارتر شد و منافذ به‌طور نسبی پر شدند که نتایج صافی سطح این گفته را تأیید می‌کند.

منابع مورد استفاده

-Akbarpour, A. and Resalati, H., 2011. The effect of different concentrations of cellulase enzyme on optical and physical properties of ONP deinked pulp. Iranian Journal of Wood and Paper Industries. 2(1): 1-15. (In Persian).

-Asadpour, G., Resalati, H., Dehghani, M. R., Ghasemian, A. and Mohammad Nazhad, M., 2015. Comparison of using single and dual retention aid system on newspaper pulp properties. Wood and Forest Science and Technology. 22(2): 75-93. (In Persian).

-Asadpour, G., Ghasemian, A., Saraeian, A. and Ghaffari, M., 2008. Quality of recycled OCC pulps and allows optimal use in combination with hardwood NSSC pulp wood pulp in Mazandaran. Proceedings of First Iranian Conference on Supplying Raw Materials and Development of Wood and Paper Industries, Gorgan, Iran.

-Cerchi, G. and Tullio, M., 2006. Cellulose tissue paper including cotton fibers. European patent, 676-956.
-Elyasi, S., Jalali-Torshizi, H. and Resalati, H., 2015. Investigation on the effect of different levels of alum consumption in alun-rosin sizing on the properties of ply board. Journal of forest and wood products. 69(2): 375-385.
-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.
-Ghofran, R., Moradian, M.H., Saadatnia, M.A. and Rezayati Charani, P., 2016. Application off cellulose nanofibers to be replaced with the imported long-fiber pulps in papers made from bagasse. Iranian Journal of Wood and Paper Industries, 7(4): 523-536. (In Persian).
-Goli, M., Zabihzade, M., Mahdavi, S. and Sadaghifar, H., 2016. The effect of TCF bleaching before and after refining on the CMP pulp properties. Iranian Journal of Wood and Paper Science Research, 31(3): 510-521. (In Persian).
-González, I., Boufi, S., Pèlach, M. A., Alcalà, M., Vilaseca, F. and Mutjé, P., 2012. Nanofibrillated cellulose as paper additive in eucalyptus pulps. BioResources. 7(4): 5167-5180.
-Hadilam M. M., Afra, E. and Yousefi, H., 2013. Effect of Cellulose Nanofibers on the Properties of Bagasse Paper. Forest and Wood product. 66(3): 351-366. (In Persian).
-Hagemeyer, R. W., 1997. Pigments for Paper: A Project of the Coating Pigments Committee of TAPPI's Coating and Graphic Arts Division, TAPPI Press, Atlanta, GA. 254p.
-Hassan, E. A, Hassan, M. L. and Oksman, K., 2011. Improving bagasse pulp paper sheet properties with microfibrillated cellulose isolated from xylanase-treated bagasse. Wood and Fiber Science. 43(1): 76-82.
-Hamzeh, Y. and Rostampour-Haftkhani, A., 2008. Principales of Pepermaking Chemistry. University of Tehran Press, Tehran, Iran. 424p. (In Persian).
-Hii, C., Oyvind W. G., Chinga-Carrasco, G. and Eriksen, O., 2012. The effect of MFC on the press ability and paper properties of TMP and GCC based sheets. Nordic Pulp and Paper Research Journal. 27(2): 388-396.
-Johansson, C., Jarnstrom, L., Koch, K., Menzel, C., Olsson, E. and Andersson, R., 2013. A fiber-based substrate provided with a coating based on biopolymer material and a method of producing it. WIPO PatentWO2013180643A1.
-Kasmani, J. E., Mahdavi, S., Alizadeh, A., Nemati, M., and Samariha, A., 2013. Physical properties and printability characteristics of mechanical printing paper with LWC. BioResources 8(3): 3646-3656.
-Latibari, A. J., Khosravani, A., Nabavi, S. M. H., 2011. Micro and Nanoparticles in Papermaking. Aeej publication, Tehran. 216p.
-Moradian, M.H., RezayatiCharani, P. and Saadatnia, M., 2015. Improving Paper Breaking Length Using Cellulosic Nano Fibers in Bagasse Pulp. Forest and Wood product. 69(3): 603–614. (In Persian).
-Nazeri, A., 2007. Study the effects of fines particles on properties of physical and optical newsprint made from chemical-mechanical pulp. Iranian Journal of Wood and Paper Science Research, 22(1): 29-40. (In Persian).
-Nechyporchuk, O., Belgacem, M. N., and Bras, J. 2016. Production of cellulose nanofibrils: A review of recent advances. Industrial Crops and Products, 93, 2-25.
-Osong, S.H., Norgren, S., and Engstrand, P., 2014. Paper strength improvement by inclusion of nano-ligno-cellulose to Chemi-thermomechanical pulp. Nordic Pulp & Paper Research Journal 29(2): 309-316.
-Petroudy, S. R. D., Syverud, K., Chinga-Carrasco, G., Ghasemain, A. and Resalati, H., 2014. Effects of bagasse microfibrillated cellulose and cationic polyacrylamide on key properties of bagasse paper. Carbohydrate Polymers. 99(2): 311–318.
-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(5): 2559-2567.
-Scot, W., (2005). The Fundamentals of Paper Properties, Translated in Persian by A. Afra, Aeej Publication, Tehran, Iran. 392p.
-Sehaqui, H., Zhou, Q. and Berglund, L. A., 2013. Nano fibrillated cellulose for enhancement of strength in high-density paper structures. Nordic pulp and paper. 28(2): 182-189.
-Tajik, M., Resalati, H., Hamzeh, Y., Torshizi, H.J., Kermanian, H., and Kord, B., 2016. Improving the Properties of Soda Bagasse Pulp by Using Cellulose Nanofibers in the Presence of Cationic Polyacrylamide. BioResources. 11(4): 9126-9141.
-Yazdani aghmashhadi, O., Asadpour atoee, Gh., Rasooly garmaroody, E., and Imani, R., 2015. Application of nano silver in the production of antibacterial bank-note. Iranian Journal of Wood and

Paper Science Research. 31(1):166-179.
-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.

Investigation of replacement of imported long fiber pulp with cellulose nanofibers and cationic materials in the production of durable paper

J. Ebrahimpour-Kasmani[*1], A. Samariha[2] and A.R. Khakifirooz[3]

1*-Corresponding author, Associate Prof, Department of Wood and Paper Science & Technology, Savadkooh Branch, Islamic Azad University, Savadkooh, Iran, Email: jafar_kasmani@yahoo.com
2-Department of Wood Industry, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran.
3-Faculty of Chemistry and Petrochemical Engineering, Department of Cellulosic Materials and Packaging, Standard Research Institute (SRI), Karaj, Iran.

Received: Jan., 2021 Accepted: May, 2021

Abstract

This study aimed to investigate the use of cellulose nanofibers and starch-nano-cellulose-polyacrylamide-nano-cellulose hybrid systems to replace the imported long chemical fibers in the production of durable papers. In this study, imported long fiber chemical pulp was added to cotton pulp at 4 levels. Cellulose nanofibers were added to cotton pulp at 5% level as one treatment and other treatment were designed adding either 1% starch or 0.1% with polyacrylamide to 5% nano-cellulose having another two treatments. Then another set of treatment using three levels of cationic starch (0.5, 1, 1.5%) and three levels of cationic polyacrylamide (0.05, 0.1, 0.15%) were used. From each treatment, 60 gm^{-2} handsheet were made and the physical, mechanical and optical properties of handsheets from different treated pulps were measured and compared. The results showed that handsheets with increasing nanocellulose alone as compared to imported long fibers, showed increased surface smoothness, tensile strength, burst strength, tear but air resistance, folding resistance and opacity were decreased. Increasing nanocellulose in combination with cationic polyacrylamide increased the paper air resistance, surface smoothness, tensile, burst, tear, and folding strength compared to imported long fibers, and air resistance and opacity decreased. With the increase of nanocellulose in combination with cationic starch, surface smoothness, tensile strength, burst strength, and folding increased but opacity decreased. FE-SEM results also showed that with increasing percentage of cellulose nanofibers, the pores decreased significantly. As a result of the addition of 5% cellulose nanofibers the surface of the paper is smoother and the pores are filled relatively, confirming the results of surface smoothness and air resistance measurement.

Keywords: Cellulose nanofibers, imported chemical pulp, starch, polyacrylamide, durable paper.