تأثیر افزودن نانو چوب و نشاسته کاتیونی بر بهبود ویژگی‌های خمیرکاغذ حاصل از کارتن کنگره‌ای کهنه (OCC)

لاله کریمی[۱]
محمدهادی آریائی منفرد[۲*]
الیاس افرا[۳]

[۱] دانش آموخته کارشناسی ارشد صنایع سلولزی، دانشکده مهندسی چوب و کاغذ، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

[۲] استادیار گروه علوم و مهندسی کاغذ، دانشکده مهندسی چوب و کاغذ، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

[۳] دانشیار گروه علوم و مهندسی کاغذ، دانشکده مهندسی چوب و کاغذ، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

مسئول مکاتبات:
Hadiaryaie@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۷/۱۷
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۹/۱۳

چکیده

یکی از معایب الیاف بازیافتی کاهش قابل‌توجه مقاومت‌های مکانیکی کاغذ به دلیل کاهش پیوندهای بین الیاف است. این مطالعه باهدف بررسی تأثیر افزودن نانو الیاف چوب پالونیا و نشاسته کاتیونی بر ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی خمیرکاغذ حاصل از کارتن کنگره‌ای کهنه (OCC) انجام‌شده است. از کارتن‌های کهنه جمع‌آوری‌شده خمیرکاغذ تهیه و مقادیر مختلف نانو چوب (۱، ۲ و ۳ درصد) و نشاسته کاتیونی (۰/۵، ۱ و ۱/۵ درصد) به آن افزوده شد. از این تیمارها، کاغذهای دست‌ساز استاندارد ساخته و ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی آن‌ها بر اساس روش استاندارد TAPPI اندازه‌گیری شدند. ارزیابی خواص فیزیکی کاغذها نشان داد دانسیته و مقاومت به عبور هوا با افزودن نانو چوب- نشاسته کاتیونی در کاغذ افزایش می‌یابد. همچنین بررسی نتایج نشان داد که اختلاف کاملاً معنی‌داری با ۹۵ درصد اطمینان بین تیمارهای مختلف ازلحاظ مقاومت‌های مکانیکی وجود دارد. بیشترین مقادیر شاخص مقاومت به ترکیدن (۲/۱۷۳ کیلو پاسکال مترمربع بر گرم) مقاومت لهیدگی در حالت حلقه (۱۷۷/۴ نیوتن) و مقاومت به عبور هوا (۳۶/۹ ثانیه) به تیمار $N_{۳}S_{۱/۵}$ تعلق یافت. می‌توان نتیجه‌گیری نمود استفاده از مقادیر بیشتر نانو چوب به همراه ماده کمک نگهدارنده نشاسته کاتیونی موجب بهبود مقاومت‌های کاغذ نهایی می‌گردد.

واژگان کلیدی: پالونیا، کارتن کنگره‌ای کهنه، نانو چوب، نشاسته کاتیونی.

مقدمه

امروزه با توجه به کاهش روزافزون منابع جنگلی، روش‌های تأمین مواد اولیه سلولزی مناسب برای صنایع کاغذسازی به‌طورجدی موردتوجه قرارگرفته است [۱]. به‌طوری‌که از نیمه قرن ۲۰ در بسیاری از کشورهای دنیا به دلایل گوناگون ازجمله مصرف روزافزون فرآورده‌های کاغذی، مشکلات زیست‌محیطی ناشی از برداشت جنگل‌ها و هزینه‌های زیاد مربوط به تولید کاغذ و مقوا از مواد خام سلولزی و انرژی، استفاده از فناوری بازیافت به‌صورت گسترده موردتوجه قرارگرفته است. یکی از انواع مهم کاغذهای بازیافتی، کاغذهای باطله‌ای هستند که به ضایعات بسته‌بندی معروف است [۲]. میزان تولید و مصرف کارتن‌های مورداستفاده در بخش بسته‌بندی به‌ویژه OCC[۱] در جهان با توجه به انعطاف‌پذیری مناسب آن به‌سرعت افزایش‌یافته است [۳]. در اثر بازیافت مکرر کاغذ، ویژگی‌های الیاف آن افت پیداکرده و بر کیفیت کاغذ بازیافتی حاصل تأثیر منفی می‌گذارد. ازاین‌رو هنگامی‌که

[1] Old Corrugated Containers

هدف به‌کارگیری الیاف بازیافتی برای تهیه کاغذ باشد، مهم‌ترین چالش، آماده‌سازی آن برای استفاده مجدد در فرآیند کاغذسازی است [۴]. بدین منظور روش‌های مختلفی برای بهبود ویژگی‌های الیاف بازیافتی گزارش‌شده است. یکی از این روش‌ها، عملیات مکانیکی پالایش و کوبش الیاف است که با ایجاد تغییرات مثبت فیبریلاسیون داخلی و خارجی که در ساختار دیواره الیاف ایجاد می‌کند، باعث افزایش انعطاف‌پذیری و قابلیت پیوندیابی آن می‌شود [۵]. درنتیجه تأثیر قابل‌توجهی در افزایش اکثر مقاومت‌های کلی کاغذ دارد [۶]. در مقابل این تیمارهای مکانیکی محدودیت‌هایی مانند تخریب ساختار الیاف و افزایش قابل‌ملاحظه نرمه‌های الیاف، افزایش زمان آبگیری خمیرکاغذ، کاهش بازده تولید کاغذ، کاهش مقاومت‌های وابسته به طول الیاف به علت تخریب ساختار دیواره سلولی الیاف و کوتاه شدن آن می‌شوند که از مهم‌ترین معایب خمیرکاغذ سازی محسوب می‌شوند [۷].

از سوی دیگر به‌کارگیری تیمارهای مختلف می‌تواند در ارتقاء ویژگی‌های مکانیکی این الیاف مؤثر واقع شود. از تیمارهای مؤثر در این امر می‌توان به استفاده از مواد افزودنی اشاره نمود. این مواد که در انواع طبیعی و مصنوعی و با بارهای مثبت، منفی و خنثی اضافه می‌شوند و متناسب با شرایط فرآیند تولید، تأثیرات گوناگون و گاهی متضاد به همراه دارند. در این میان نشاسته کاتیونی به‌طور گسترده‌ای نسبت به سایر افزودنی‌ها مورداستفاده قرار می‌گیرد که به دلیل خاصیت آب‌دوستی، وزن مولکولی زیاد و خاصیت کاتیونی روی سطح الیاف سلولزی با بار منفی باقی می‌ماند و با آن پیوند هیدروژنی برقرار می‌کند [۸]. امروزه نشاسته در صنعت کاغذسازی به‌صورت افزودنی پایانه‌تر برای نگهداری الیاف و نرمه‌ها، بهبود مقاومت خشک کاغذ و بهبود شکل‌گیری کاغذ مورداستفاده قرار می‌گیرد. نشاسته، کربوهیدرات ذخیره‌ای گیاهی می‌باشد و از واحدهای متوالی گلوکز تشکیل می‌شود. نشاسته به مقدار زیادی در گیاهان یافت می‌شود و اغلب در ذرت، گندم، تاپیوکا، سیب‌زمینی و ساقه خرما موجود است [۹]. نکته بسیار مهم و اساسی در استفاده از این مواد مقاومت دهنده این است که اگر بتوان مقدار بیشتری را جذب سطح الیاف نمود، پیوندپذیری الیاف افزایش‌یافته و درنهایت مقاومت‌های کاغذ حاصله افزایش می‌یابد. در سال‌های اخیر نانو الیاف سلولزی به‌عنوان یک مقاومت دهنده خشک و تر در بخش پایانه‌تر و نیز به‌عنوان یک پوشش در بهبود ویژگی‌های مکانیکی و ممانعتی در صنعت کاغذسازی موردتوجه می‌باشند [۱۰]. مهم‌ترین مزیت استفاده از نانو الیاف سلولزی نسبت به عملیات مکانیکی پالایش، عدم تخریب ساختار الیاف است، این موضوع به لحاظ حفظ خواص اولیه الیاف و افزایش عمر مفید آن ازنقطه‌نظر بازیافت کاغذ بسیار حائز اهمیت است. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده توسط محققین، یکی از مهم‌ترین چالش‌های اساسی استفاده از نانو الیاف سلولزی در پایانه‌تر ماشین کاغذ، افزایش قابل‌ملاحظه زمان آبگیری از خمیرکاغذ است. آب‌دوستی فوق‌العاده این ماده و مسدود نمودن منافذ بین الیاف و کاهش شدید نفوذپذیری شبکه کاغذ، عمده‌ترین دلایل تأثیر نانو الیاف سلولز در کاهش نرخ آب‌گیری از خمیرکاغذ عنوان‌شده است [۱۱]. انواع الیاف نانو در دسترس با توجه به ساختار شیمیایی و فیزیکی آنها عبارت‌اند از: سلولز نانوفیبریله شده[1](NFC) -که به آن سلولز میکروفیبریله شده[2](MFC) نیز گفته می‌شود، نانو کریستال سلولزی (CNC)-که به آن نانو ویسکر سلولزی (CNW) نیز اطلاق می‌گردد- و نانوسلولز باکتریایی[3]BNC [۱۲]. سلولز نانو فیبریله شده، مولکول‌های طولانی و انعطاف‌پذیر با قطری در حدود ۱۰۰-۱۰ نانومتر بوده و از بخش‌های آمورف و کریستالی تشکیل می‌شوند [۱۳]. نانو کریستال سلولز درواقع، نانو کریستال‌های سلولزی، کریستال‌های میله‌ای شکل بوده و در مقایسه با نانوالیاف‌ها، انعطاف‌پذیری کمتری دارند چراکه فاقد بخش‌های آمورف می‌باشند [۱۲]. نانو سلولز باکتریایی شبکه درهم‌رفته‌ای از نانو سلولز خالص می‌باشد که توسط

[1] Nano Fiber Cellulose
[2] Micro Fiber Cellulose
[3] Bacterial Nano Cellulose

برخی (میکروارگانیسم‌های زنده سنتز می‌شود. لیگنو سلولز نانو فیبریله شده[1] (NFLC) نانولیگنوسلولز متشکل از الیافی است که به کمک مجموعه‌ای از تأثیرات مواد شیمیایی و عمل مکانیکی تولیدشده‌اند و ترکیب شیمیایی دیواره آن شامل سلولز، همی‌سلولزها و لیگنین می‌باشد که ابعاد حداقل یک بعد این الیاف تا مقیاس نانو کاهش‌یافته. این ماده به‌صورت ژل قهوه‌ای و عمدتاً به روش مکانیکی از زیست‌توده لیگنوسلولزی تهیه می‌گردد [۱۴]. نانو چوب اما از چوب‌های با دانسیته کم و بدون استفاده از هرگونه ماده شیمیایی به کمک روش مکانیکی تولید می‌گردد. ترکیب شیمیایی این نوع الیاف مانند خمیرهای مکانیکی به ترکیب شیمیایی چوب اولیه شباهت بسیار زیادی دارد [۱۴]. استفاده از نانو الیاف سلولزی یک جایگزین امیدوارکننده برای بهبود پیوندهای بین الیاف است. افزایش خواص مکانیکی محصولات بازیافتی برخی مزایای دیگر مثل تجدیدپذیری، زیست‌تخریب‌پذیری، سطح ویژه زیاد و در دسترس بودن هم دارد. نانو الیاف سلولزی به دلیل استحکام و سفتی و وزن کم‌توجه زیادی را به خود جلب کرده است. ازاین‌رو، در این پژوهش بررسی تأثیر نانو چوب و نشاسته کاتیونی بر بهبود ویژگی‌های خمیر OCC انجام‌شده است. هدف از انجام این تحقیق ارزیابی اثر افزودن نانو الیاف چوب پالونیا حاصل از روش سوپر آسیاب دیسکی بر روی ویژگی‌های خمیرکاغذ OCC بوده است. برای حفظ الیاف نانو چوب پالونیا نیز از سطوح مختلف نشاسته کاتیونی استفاده‌شده است که تأثیر این سطوح بر عملکرد الیاف نانو چوب و ویژگی‌های نهایی مقوای حاصل موردمطالعه قرارگرفته است.

مواد و روش‌ها

تهیه خمیرکاغذ اولیه

در این بررسی، به‌منظور تهیه خمیرکاغذ از مواد اولیه ۱۰۰ درصد بازیافتی شامل کارتن‌های کنگره‌ای کهنه قهوه‌ای (OCC) از فروشگاه‌های سطح شهر گرگان استفاده گردید. حدود ۵ کیلوگرم کارتن OCC جمع‌آوری شد و دقت لازم به عمل آمد که فاقد هرگونه آلودگی ناشی از تبدیل و مصرف و تماماً پشت‌ورو قهوه‌ای باشند. کارتن‌های OCC به آزمایشگاه منتقل و به قطعاتی با ابعاد تقریبی ۵×۵ سانتی‌متر تبدیل شد. قطعات تبدیل‌شده کارتن در مخزن با آب شهری مخلوط و به مدت ۴۸ ساعت در این وضعیت باقی ماند. سپس از دستگاه پراکنده ساز آزمایشگاهی جهت دفیبره کردن الیاف (تحت شرایط درصد خشکی ۵ درصد، زمان ۱۵ دقیقه و با تعداد دور ۳۹۰۰۰) استفاده شد.

تهیه نشاسته کاتیونی و آماده‌سازی آن

نشاسته کاتیونی مورد مصرف در این پژوهش از شرکت Chemlab بلژیک تهیه شد. مشخصات نشاسته در جدول (۱) ارائه‌شده است. در همه مراحل آزمایش‌های تحقیق حاضر، جهت خنثی‌سازی اثرات منفی عوامل فرآیندی و جانبی از آب مقطر استفاده شد.

با توجه به این‌که تمامی نشاسته‌ها در آب سرد نامحلول می‌باشند، بشر حاوی مخلوط آب و نشاسته داخل حمام آب گرم قرارگرفته و به‌تدریج دمای آن افزایش یافت. پس از رسیدن به دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد، در این دما به مدت ۲۵ دقیقه حفظ و سپس از حمام خارج و توزین گردید. به دلیل تبخیر آب درون بشر، وزن محلول کاهش می‌یابد، بنابراین مجدداً به آن آب گرم با دمایی برابر با دمای محلول افزوده شد. لازم به ذکر است که در تمام مدت، مخلوط موردنظر با یک هم زن شیشه‌ای، دائم هم زده شد تا از رسوب نشاسته کاتیونی در انتهای ظرف جلوگیری به عمل آید.

[1] Nano Fibrillated Nano Cellulose

جدول ۱- مشخصات نشاسته مصرفی

نوع نشاسته	شرکت و کشور تأمین‌کننده	pH (محلول ۲ درصد)	دانسیته (گرم بر سانتی مترمکعب)	خلوص (٪)
نشاسته ذرت گرید آزمایشگاهی	Chem lab - بلژیک	۶-۷/۵	۱/۵	>۹۰

تهیه نانو چوب

نانو الیاف چوب پالونیا مورداستفاده در انجام این پژوهش (تولید مستقیم و مکانیکی نانو الیاف چوبی از ذرات کوچک چوب خام بدون تیمار شیمیایی) از شرکت نانو نوین پلیمر خریداری شد که مشخصات فنی آن در جدول ۲ ارائه‌شده است [۱۴].

جدول ۲- مشخصات نانو چوب مصرفی طبق اعلام شرکت نانو نوین پلیمر [۱۴]

رنگ	درصد خشکی (٪)	متوسط طول (nm)	متوسط قطر (nm)	بازده تولید
کرم روشن	۴	≥۵۰۰۰	۵۵	۹۷

ساخت کاغذهای دست‌ساز

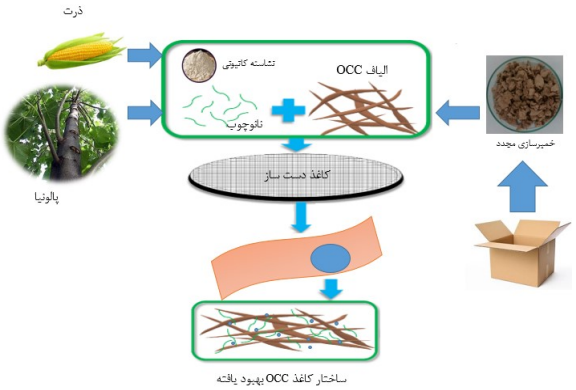
ساخت کاغذ دست‌ساز مطابق دستورالعمل استاندارد شماره SP-۰۲ T ۲۰۵ آئین‌نامه تاپی انجام شد. کاغذهای شاهد با استفاده از خمیر OCC و سایر کاغذهای ترکیبی به شرح جدول (۳) ساخته شدند. برای تهیه کاغذهای ترکیبی، ابتدا سوسپانسیون خمیرکاغذ با درصد خشکی ۰/۳ درصد با دستگاه همزن با ۱۰۰۰ دور در دقیقه به مدت ۱۲۰ ثانیه هم زده شد. سپس سوسپانسیون نانو چوب که از قبل آماده‌شده بود، به مقدار لازم به سوسپانسیون خمیرکاغذ اضافه شد و به مدت ۳۰ ثانیه دیگر سوسپانسیون حاصل با همان دورهم زده شد. در ادامه نشاسته کاتیونی به آرامی به سوسپانسیون خمیرکاغذ اضافه شد. پس از افزودن نشاسته کاتیونی، سرعت چرخش همزن به ۱۵۰۰ دور در دقیقه افزایش یافت و سوسپانسیون به‌دست‌آمده پس از ۳ دقیقه هم‌زدن، در داخل محفظه سیستم ساخت کاغذ دست‌ساز ریخته شد (شکل۲).

جدول ۳- ترتیب نام‌گذاری تیمارهای تحقیق

کد تیمار	نانو چوب (٪)	نشاسته کاتیونی (٪)
C	-	-
N_1	۱	-
N_2	۲	-
N_3	۳	-
$N_1S_{0/5}$		۰/۵
N_1S_1	۱	۱
$N_1S_{1/5}$		۱/۵
$N_2S_{0/5}$		۰/۵
N_2S_1	۲	۱
$N_2S_{1/5}$		۱/۵
$N_3S_{0/5}$		۰/۵
N_3S_1	۳	۱
$N_3S_{1/5}$		۱/۵

اندازه‌گیری ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی کاغذها

زمان عبور ۳۰۰ میلی‌لیتر هوا از بافت کاغذ به‌عنوان مقاومت عبور هوا که معیاری از میزان تخلخل بافت کاغذ است، بر اساس دستورالعمل استاندارد شماره om-۰۲ T۴۶۰ آئین‌نامه تاپی با دستگاه گرلی به‌دست‌آمده است. این اعداد، میزان نفوذپذیری هوا برحسب ثانیه بوده و برحسب ۱۰۰ میلی‌لیتر هوا گزارش شد. آزمون‌های فیزیکی و مکانیکی شامل ضخامت و دانسیته (om-۰۵ T۴۱۱)، مقاومت کششی(om-۰۱ T۴۰۴)، شاخص مقاومت به پارگی (om-۸۸ T ۴۱۴)، شاخص مقاومت به ترکیدن (om-۹۷ T۴۰۳) و مقاومت به لهیدگی در حالت حلقه (om-۸۷ T۸۱۸) نیز بر اساس دستورالعمل‌های آئین‌نامه تاپی انجام گردیدند. نتایج این تحقیق نیز با استفاده از نرم‌افزار SPSS و در غالب طرح تحلیل واریانس یک‌طرفه و مقایسه و گروه‌بندی میانگین¬ها به کمک آزمون دانکن در سطح (P< ۰/۰۵) انجام شد.

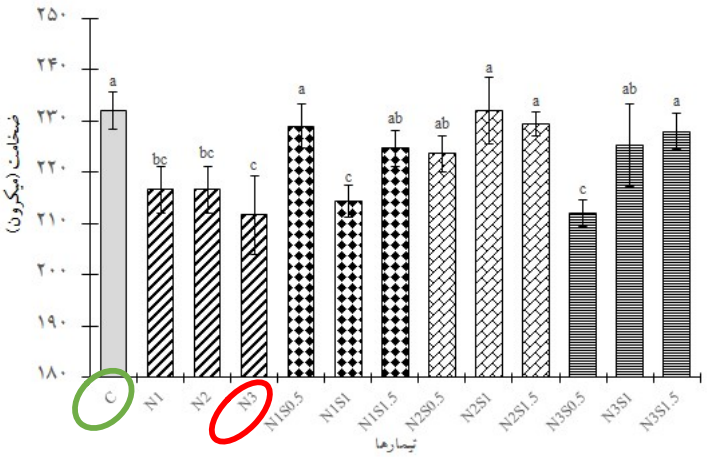


شکل ۲- مراحل ساخت نمونه‌های آزمونی

نتایج و بحث

ضخامت

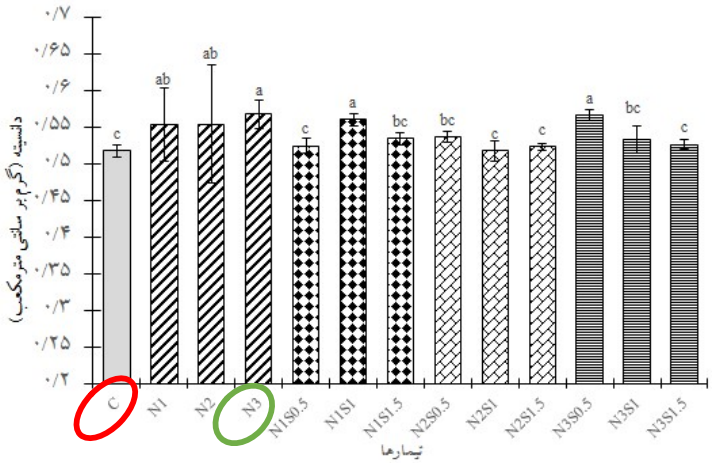
مقادیر ضخامت انواع کاغذهای تهیه‌شده، توسط آزمون تجزیه واریانس بررسی شد. نتایج نشان داد که بین هر تیمار با خمیرکاغذ شاهد همچنین بین تیمارهای مختلف اختلاف معنی‌داری ازلحاظ این ویژگی وجود دارد. به‌طوری‌که ضخامت برخی کاغذهای حاصل از افزودن نانو چوب- نشاسته کاتیونی نسبت به تیمار شاهد کمتر است. طبق نتایج حاصل بیشترین مقدار ضخامت مربوط به تیمار C (شاهد) و کمترین آن مربوط به تیمار N_3 (۳ درصد نانو چوب) است (شکل ۳). مطابق نتایج به‌دست‌آمده دیده می‌شود که اولاً، در هر یک از تیمارها با افزایش درصد نانو چوب- نشاسته کاتیونی در کاغذ، دانسیته افزایش می‌یابد. دلیل این امر را به ابعاد کوچک‌تر و پیوندهای بیشتر نانو الیاف چوب نسبت به الیاف OCC نسبت داد که موجب کاهش ضخامت می‌شود. دوماً، همان‌طور که در نتایج مربوط به‌اندازه‌گیری دانسیته نیز مشاهده می‌شود، دانسیته کاغذهای دست‌ساز حاصل از نشاسته کاتیونی نسبت به نمونه شاهد بیشتر است زیرا توانایی پیوندیابی نانو چوب اصلاح‌شده و پر کردن فضای خالی بین الیاف توسط آن و همچنین، ویژگی دلمه شدگی بیشتر کاغذهای دست‌ساز اصلاح‌شده و متراکم شدن بیشتر آنها (افزایش پیوندها) موجب کاهش ضخامت کاغذهای دست‌ساز و افزایش دانسیته آنها می‌شود [۱۶].



شکل ۳- میانگین ضخامت در تیمارهای مختلف

دانسیته

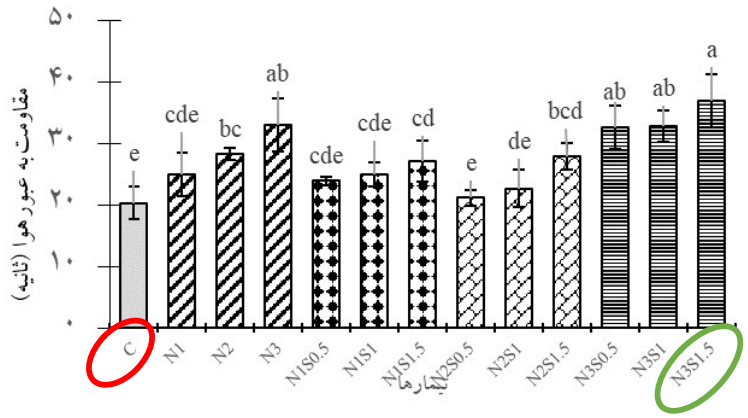
مقادیر دانسیته انواع کاغذهای تهیه‌شده، توسط آزمون تجزیه واریانس بررسی شد. نتایج نشان داد که بین هر تیمار با خمیرکاغذ شاهد اختلاف معنی‌داری وجود دارد. همچنین بین تیمارهای مختلف اختلاف معنی‌داری ازلحاظ این ویژگی وجود دارد. به‌طوری‌که دانسیته کاغذهای حاصل از افزودن نانو چوب- نشاسته کاتیونی دانسیته بیشتری نسبت به تیمار شاهد دارد. طبق نتایج حاصل بیشترین مقدار دانسیته مربوط به تیمار N_3 (۳ درصد نانو چوب) و کمترین آن مربوط به خمیرکاغذ ۱۰۰ درصد بازیافتی (شاهد) است (شکل ۴).



شکل ۴- میانگین دانسیته در تیمارهای مختلف

مقاومت به عبور هوا

مقادیر مقاومت به عبور هوای انواع کاغذهای تهیه‌شده، توسط آزمون تجزیه واریانس بررسی شد و نتایج حاصل نشان داد که اختلاف معنی‌دار آماری بین مقادیر مربوطه وجود دارد. طبق نتایج بیشترین مقاومت به عبور هوا (۳۶/۹ ثانیه) مربوط به تیمار $N_3S_{1/5}$ (۳ درصد نانو چوب و ۱/۵ درصد نشاسته کاتیونی) و کم‌ترین مقدار آن (۲۰/۳ ثانیه) مربوط به خمیرکاغذ ۱۰۰ درصد بازیافتی (شاهد) است و با افزودن نانو چوب و نشاسته کاتیونی مقادیر مقاومت به عبور هوای بیشتر مشاهده می‌گردد (شکل ۵).



شکل ۵- میانگین مقاومت به عبور هوا در تیمارهای مختلف

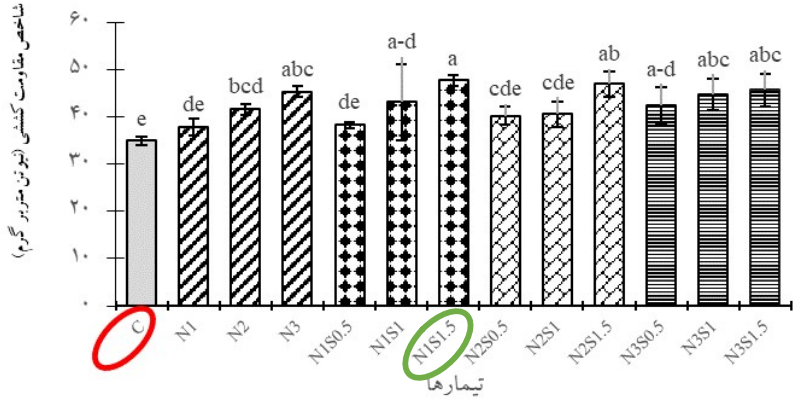
در این تحقیق مقاومت به عبور هوا با مقدار گرلی اندازه‌گیری شده است. هر چه مقدار گرلی بیشتر باشد تخلخل کاغذ کمتر شده و درنتیجه مقاومت به عبور هوا افزایش می‌یابد. با توجه به نتایج این تحقیق ملاحظه می‌شود کاغذهای حاوی نانو چوب- نشاسته کاتیونی عملکرد بهتری در بهبود ویژگی مقاومت به عبور هوای کاغذ داشته و اختلاف قابل‌ملاحظه‌ای نسبت به کاغذهای شاهد دارند. همچنین نکته قابل‌توجه در نتایج به‌دست‌آمده در خصوص کاربرد سیستم نانو چوب- نشاسته کاتیونی این است که با افزایش درصد این مواد در کاغذ، روند تغییرات مقاومت به عبور هوا در کاغذهای حاوی این مواد روند صعودی دارد. وجود نشاسته باعث تقویت سطح پیوند بین الیاف و درنتیجه افزایش مقاومت به عبور هوای کاغذ می‌شود.

کاهش شدید نفوذپذیری ساختارهای حاوی نانو مواد سلولزی به عواملی مانند کاهش ابعاد از میکرو به نانو در اثر فرآیند سوپر آسیاب و افزایش سطح ویژه نانو الیاف مرتبط است. کاهش قطر و افزایش سطح ویژه سبب تشکیل ساختاری چگال‌تر در زیر پرس و ایجاد سطح پیوند بسیار گسترده‌تری در ساختار می‌شود. اجزای اصلی در ساختارهای نانو سلولزی، نانو ساختارهای (حاوی کریستال‌های) نفوذناپذیرند که مولکول‌های هوا برای عبور از بین آن‌ها باید مسیر پیچیده و طولانی‌تری را طی نمایند [۱۵].

شاخص کشش

مقادیر شاخص کشش کاغذهای حاصل از تیمارهای مختلف توسط آزمون تجزیه واریانس بررسی شد. نتایج نشان داد که بین مقادیر به‌دست‌آمده در سطح ۵ درصد اختلاف معنی‌دار وجود دارد. بیشترین مقدار شاخص کشش مربوط به تیمار $N_1S_{1/5}$ (۱ درصد نانو چوب و ۱/۵ درصد نشاسته کاتیونی) می‌باشد که مقدار آن برابر با ۴۷/۷ نیوتن متر بر گرم است، درحالی‌که کم‌ترین مقدار شاخص کشش به تیمار شاهد اختصاص دارد که مقدار آن برابر با ۳۴/۹ نیوتن متر بر گرم می‌باشد (شکل ۶).

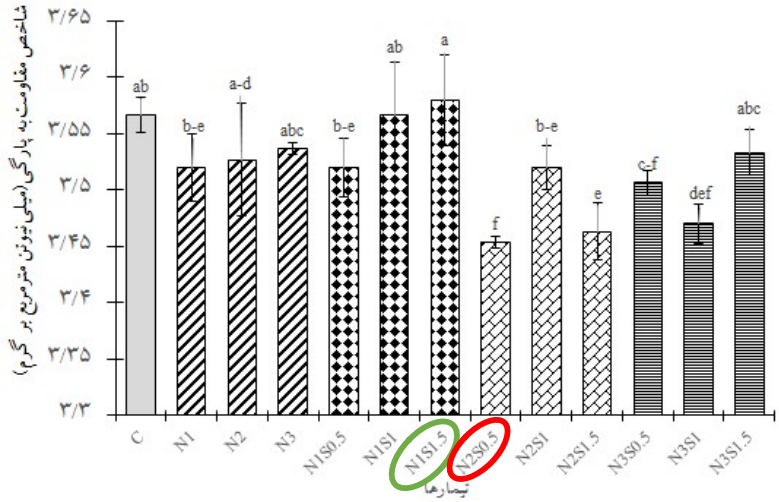
در نمونه‌های حاوی ۱ درصد نانو چوب و ۱/۵ درصد نشاسته کاتیونی شاخص کشش ۵۳/۰۲ نیوتن متر بر گرم افزایش‌یافته است که نسبت به نمونه شاهد مقاومت ۵۱/۹ درصد بهبود نشان می‌دهد. افزایش مقدار نانو چوب منجر به پیوند هیدروژنی بیشتر بین سطوح فیبری می‌گردد. به دلیل سطح ویژه زیاد نانو چوب و اتصال فیزیکی بین نانو چوب و الیاف OCC، پیوند هیدروژنی بین الیاف افزایش یافت که باعث بهبود مقاومت شبکه فیبر تحت بارگذاری مکانیکی و درنتیجه توزیع یکنواخت کشش در کاغذ می‌شود [۱۶]. البته نشاسته کاتیونی نیز در عین کمک به حفظ نانو چوب در ساختار خمیر خود نیز عامل افزاینده پیوندهای هیدروژنی است [۸].



شکل ۶- میانگین شاخص کشش در تیمارهای مختلف

شاخص پارگی

شاخص پارگی بیان‌کننده مقدار انرژی موردنیاز برای گسیختگی نمونه کاغذ می‌باشد. این انرژی به کار گرفته‌شده می‌تواند صرف پارگی الیاف و یا جداسازی آن از صفحه کاغذی درنتیجه گسسته شدن پیوند بین الیاف شود.. نتایج نشان می‌دهد که بین مقادیر به‌دست‌آمده شاخص پارگی در سطح ۵ درصد اختلاف معنی‌دار وجود دارد. بیشترین مقدار شاخص پارگی مربوط به تیمار $N_1S_{1/5}$ (۱ درصد نانو چوب و ۱/۵ درصد نشاسته کاتیونی) می‌باشد که مقدار آن برابر با ۳/۵۸ میلی نیوتن مترمربع برگرم است، درحالی‌که کم‌ترین مقدار شاخص پارگی به $N_2S_{.5}$ (۲ درصد نانو چوب و ۰/۵ درصد نشاسته کاتیونی) اختصاص دارد که مقدار آن برابر با ۳/۴۵ میلی نیوتن مترمربع برگرم می‌باشد (شکل۷).



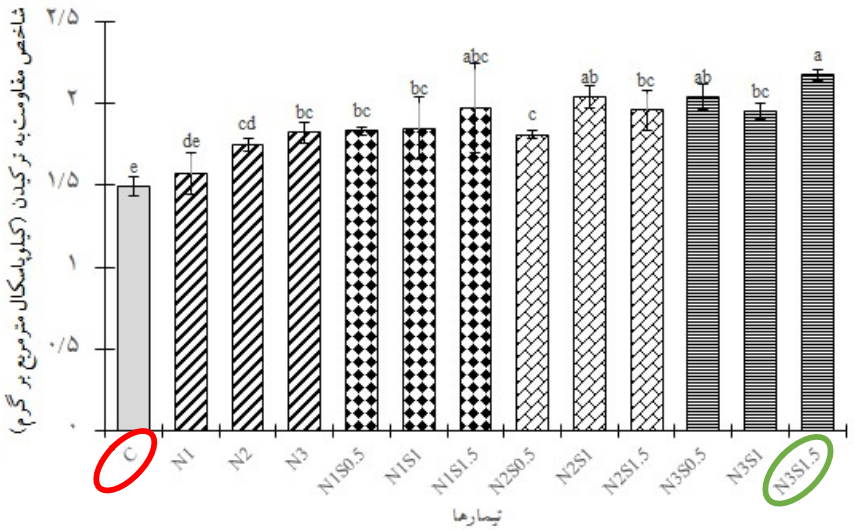
شکل ۷- میانگین شاخص پارگی در تیمارهای مختلف

با افزایش سطح مصرف نشاسته، شاخص پارگی نیز افزایش می‌یابد. دلیل مهم آن افزایش تعداد پیوندهای هیدروژنی بین الیاف و همچنین حفظ مقدار بیشتری از نانو الیاف چوب پالونیا در ساختار کاغذ می‌باشد که خود باعث پر شدن فضاهای خالی بین الیاف و افزایش قدرت اتصال بین این نوع الیاف می‌شود و درنهایت باعث بهبود شاخص پارگی می‌گردد [۱۷]. اساساً شاخص پارگی مقاومتی است که بیشتر تحت تأثیر طول الیاف می‌باشد تا پیوند هیدروژنی بین الیاف. به همین دلیل هم دامنه نوسان بین کمترین مقدار و بیشترین مقدار آن همان‌طور که مشاهد می‌گردد بسیار اندک است. نرم‌افزار آماری بسیار حساس بوده است که این اختلاف را معنی‌دار نشان

می‌دهد. بیشترین مقدار مقاومت در سطح نشاسته ۱/۵ درصد ایجادشده است که درواقع، نشاسته به‌عنوان یک ماده چسبنده عمل کرده که بین بخش‌های موجود در ساختار کاغذ پیوند برقرار می‌کند. در افزایش نشاسته کاتیونی تا سطح ۳ درصد بار مثبت نشاسته نقش مؤثر و قوی خود را ایفا نموده و ویژگی‌ها به حداکثر مقدار خود می‌رسند. شواهد فوق با نتایج به‌دست‌آمده توسط Hubbe (۲۰۰۶)، Heermann و همکاران (۲۰۰۶)، Ghasemian و همکاران (۲۰۱۲) مطابقت دارد [۸، ۱۷ و ۱۸].

شاخص ترکیدگی

نتایج اندازه‌گیری شاخص ترکیدگی نشان می‌دهد که بین مقادیر به‌دست‌آمده در سطح ۵ درصد اختلاف معنی‌دار وجود دارد. بیشترین مقدار شاخص ترکیدگی مربوط به تیمار $N_3S_{1/5}$ (۳ درصد نانو چوب و ۱/۵ درصد نشاسته کاتیونی) برابر با ۲/۱۷ کیلوپاسکال مترمربع برگرم است، درحالی‌که کم‌ترین مقدار شاخص ترکیدگی به تیمار C (شاهد) اختصاص دارد که مقدار آن برابر با ۱/۴۹ کیلوپاسکال مترمربع برگرم می‌باشد (شکل۸).



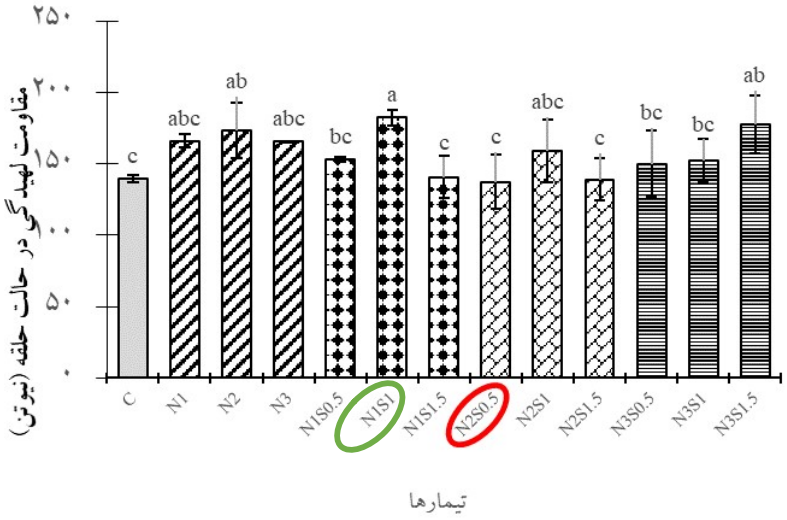
شکل ۸- میانگین شاخص ترکیدگی در تیمارهای مختلف

نتایج نشان می‌دهد که با افزایش سطح مصرف نشاسته مقاومت به ترکیدن افزایش می‌یابد که درواقع افزودن نشاسته به الیاف بازیافتی منجر به احیای نقاط ازدست‌رفته در سطح این الیاف گردیده، قدرت اتصال بین این نوع الیاف را افزایش می‌دهد و درنهایت باعث افزایش این ویژگی مقاومتی کاغذ دست‌ساز می‌گردد. همچنین افزودن نشاسته کاتیونی باعث افزایش ثابتی در سطح نسبی پیوند می‌گردد. شواهد فوق با نتایج به‌دست‌آمده توسط Hubbe (۲۰۰۶) مطابقت دارد [۸]. افزایش درصد نانو چوب پالونیا منجر به پیوند هیدروژنی بیشتر بین سطوح فیبری گردید. به دلیل سطح ویژه زیاد در نانو الیاف سلولزی و درهم‌تنیدگی‌های فیزیکی بین نانو چوب و الیاف OCC، پیوند هیدروژنی بین الیاف افزایش‌یافته است که باعث بهبود مقاومت شبکه فیبر تحت بارگذاری مکانیکی در ورق کاغذ می‌شود. این مکانیسم توسط گزارش‌های قبلی تأییدشده است [۱۶]. براثر کاهش ابعاد تا مقیاس نانومتری، سطح ویژه الیاف سلولزی افزایش می‌یابد. این به معنی قرار گرفتن تعداد بیشتر گروه‌های هیدروکسیل در دسترس در سطح نانو فیبرها است که توانایی تشکیل پیوند هیدروژنی را با نانو فیبرهای مجاور دارند و درنهایت سبب تشکیل شبکه‌ای از نانو فیبرها می‌شوند. درهم‌رفتگی و ایجاد ساختار شبکه‌ای نانو فیبرها در واحد حجم بیشتر از ویژگی متناظر میکرو فیبرها در واحد حجم است. درهم‌رفتگی فیبرها بر ویژگی کاغذ به‌ویژه ویژگی مکانیکی اثر معنی‌داری دارد [۱۵ و ۱۹]. یکی دیگر از دلایل افزایش ظرفیت تقویت‌کنندگی نانو چوب نسبت به دیگر انواع

نانوسلولز را می‌توان درجه کریستالی بیشتر زنجیره‌های سلولزی و بکرتر بودن این زنجیره‌ها دانست [۱۴]. افزایش درجه کریستالی به معنای بیشتر بودن سهم کریستال‌هایی است که نقش اصلی را در تحمل تنش وارده دارند. این یافته‌ها با نتایج به‌دست‌آمده توسط پژوهشگرانی همچون Yousefi و همکاران (۲۰۱۳)، Hadilam و همکاران (۲۰۱۴) و همچنین Ghaderi و همکاران (۲۰۱۴) که اثر افزودن نانو الیاف سلولزی را بر ویژگی مکانیکی فیلم و کاغذ مثبت ارزیابی کردند، مطابقت دارد [۱۵، ۱۹ و ۲۰].

مقاومت به لهیدگی در حالت حلقه

نتایج نشان می‌دهد که بین مقادیر به‌دست‌آمده در سطح ۵ درصد اختلاف معنی‌دار آماری وجود دارد (جدول ۹). بیشترین مقدار مقاومت لهیدگی در حالت حلقه مربوط به تیمار N_1S_1 (۱ درصد نانو چوب و ۱ درصد نشاسته کاتیونی) می‌باشد که مقدار آن برابر با ۱۸۲/۴ نیوتن است، درحالی‌که کم‌ترین مقدار مقاومت لهیدگی در حالت حلقه‌ی به $N_2S_{0.5}$ (۲ درصد نانو چوب و ۰/۵ درصد نشاسته کاتیونی) اختصاص دارد که مقدار آن برابر با ۱۳۷/۳ نیوتن می‌باشد (شکل ۹).



شکل ۹- میانگین مقاومت لهیدگی در حالت حلقه در تیمارهای مختلف

آزمون لهیدگی در حالت حلقه به مقاومت به فشار و نیروی اعمال‌شده بر لبه‌ی مقوا مربوط می‌شود و تا حدود زیادی متناسب با مقاومت کنکورای لایه میانی[1] (CMT) می‌باشد. نیروی اعمال‌شده در راستای محور استوانه می‌باشد. خمیرهای نیمه شیمیایی سولفیت خنثی (NSSC) که عمدتاً برای ساخت کارتن استفاده می‌شود؛ دارای بیشترین مقدار مقاومت لهیدگی در حالت حلقه می‌باشد. در خمیرهای NSSC[2] دست‌اول پهن برگان، درصد همی سلولزهای بیشتر و همچنین قطر و ضخامت زیاد دیواره (مقدار لیگنین بیش‌تر) موجب سفتی زیاد خمیرکاغذ می‌گردد [۲۱]. عمدتاً خمیرهای نیمه شیمیایی سفتی مطلوبی دارند و در برابر خرد شدن مقاوم می‌باشند. یعنی هر چه ضخامت دیواره الیاف بیش‌تر باشد، این مقاومت هم بیش‌تر خواهد بود. نتایج نشان داد که با افزایش مصرف نشاسته از ۰/۵ تا ۱/۵ درصد در کاغذها مقاومت لهیدگی در حالت حلقه نیز به‌تناسب افزایش می‌یابد که به دلیل وجود نشاسته است. ثابت‌شده است که سفتی ورق کاغذ معمولاً با افزایش پیوند بین الیاف افزایش می‌یابد و به دلیل ویژگی که نشاسته در پیوندیابی بین الیاف داشته و به‌نوعی به‌عنوان ماده چسبنده عمل می‌کند [۱۹]، لذا سبب افزایش دانسیته می‌گردد. کاغذ با دانسیته بیش‌تر نیز مقاومت لهیدگی در حالت حلقه بیش‌تری دارد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود در سطح نشاسته ۱/۵ درصد در کاغذهای ترکیبی بیش‌ترین مقدار مقاومت

[1] Concora Corrugating Medium Test
[2] Neutral Sulfite Semi chemical pulping

حاصل‌شده که در این سطح، بار مثبت نشاسته نقش مؤثر و قوی خود را ایفا کرده و این ویژگی بهبودیافته است.

نتیجه‌گیری

در سال‌های اخیر تمایل به معرفی روش‌های با کمترین تأثیرات زیست‌محیطی و درعین‌حال مؤثر برای تقویت ویژگی‌های مقاومتی الیاف بازیافتی افزایش‌یافته. هرچند استفاده از سایر انواع نانو الیاف طبیعی برای تقویت کاغذهای بازیافتی در سال‌های اخیر موردتوجه محققین بوده اما معرفی نانو چوب به‌عنوان یکی از این مواد دوستدار محیط‌زیست می‌تواند مسیرهای جدیدی را در این راه آغاز نماید. افزودن ترکیبی نانو چوب- نشاسته کاتیونی به خمیرکاغذ حاصل از کارتن کنگره‌ای کهنه باعث بهبود خواص فیزیکی و مکانیکی آن ازجمله مقاومت به عبور هوا، شاخص‌های ترکیدگی و پارگی، مقاومت به لهیدگی در حالت حلقه و شاخص کششی می‌شود. به‌طوری‌که ترکیب نانو چوب- نشاسته کاتیونی باعث افزایش قابل‌توجه خواص مقاومتی می‌شود. بیشترین مقاومت‌ها در سیستم نانو چوب- نشاسته کاتیونی در نمونه‌های حاوی ۳ درصد نانو چوب و ۱/۵ درصد نشاسته کاتیونی مشاهده شد.

منابع

[1] Schier, F., Morland, C., Dieter, M., & Weimar, H., 2021. Estimating supply and demand elasticities of dissolving pulp, lignocellulose-based chemical derivatives and textile fibres in an emerging forest-based bioeconomy. Forest Policy and Economics, 126: 102422.

[2] Mirshokraei, S.A., 2010. Waste paper recycling guide (edition 3), Aiij Press (Translated in Persian).

[3] Anonymous, J., 2001. A new development in molded pulp processes and packaging. IMPEPA Report. Chicago. Illinois USA.

[4] Tschirner, U., Barsness, J. and Keeler, T., 2007. Recycling of chemical pulp from wheat and corn stover, Bioresurses, 2(4): 356-543.

[5] Mohammad Nazhad, M., 2004. The influence of refining energy and intensity on enhancing the bonding potential of an OCC pulp. Appita: Technology, Innovation, Manufacturing, Environment, 57(3): 191-198.

[6] Fernando, D., Muhi, D., Engstrand, P. and Daniel, G., 2011. Fundamental under-standing of pulp property development under different thermomechanical pulp refining conditions as observed by a new Simons'staining method and SEM observation of the ultrastructure of fiber surfaces. Holzforschung, 65(6): 777–786.

[7] Jones, B.W., Venditti, R., Park, S., Jameel, H. and Koo, B., 2013. Enhancement in enzymatic hydrolysis by mechanical refining for pretreated hardwood ligno-cellulosics. Bioresource Technology, 147: 353–360.

[8] Hubbe, M.A., 2006. Bonding between cellulosic fibers in the absence and presence of dry-strength OD dry strength agents-a review. BioResources, 1(2): 281-318.

[9] BeMiller, J. N., & Whistler, R. L. (Eds.). 2009. Starch: chemistry and technology. Academic Press.

[10] Mousavi, S. M., Afra, E., Tajvidi, M., Bousfield, D. W., & Dehghani-Firouzabadi, M. (2017). Cellulose nanofiber/carboxymethyl cellulose blends as an efficient coating to improve the structure and barrier properties of paperboard. Cellulose, 24(7): 3001-3014.

[11] Boufi, S., Gonzalez, I., Delgado-Aguilar, M., Tarres, Q., Pèlach, M. À., & Mutje, P., 2016. Nanofibrillated cellulose as an additive in papermaking process: A review. Carbohydrate polymers, 154: 151-166.

[12] Klemm, D., Kramer, F., Moritz, S., Lindstrom, T., Ankerfors, M., Gray, D., and Dorris, A., 2011. Nanocelluloses: A new family of nature-based materials. Angewandte Chemie International Edition, 50: 5438-5466.

[13] Kalia, S., Boufi, S., Celli, A., & Kango, S., 2014. Nanofibrillated cellulose: surface modification and potential applications. Colloid and Polymer Science, 292(1): 5-31.

[14] Yousefi, H., Azari, V., and Khazaeian, A., 2018. Direct mechanical production of wood nanofibers from raw wood microparticles with no chemical treatment. Industrial crops & products, 115: 26-31.

[15] Hadilam, M.M., Afra, E., Ghasemian, A. and Yousefi, H., 2014. Preparation and properties of ground cellulose nanofibers. Journal of wood and forest science and technology, 20(2):139-149. (In Persian).

[16] Hassan, M. L., Bras, J., Mauret, E., Fadel, S. M., Hassan, E. A., & El-Wakil, N.A., 2015. Palm rachis microfibrillated cellulose and oxidized-microfibrillated cellulose for improving paper sheets properties of unbeaten softwood and bagasse pulps. Industrial Crops and Products, 64: 9-15.

[17] Heermann, M. L., Welter, S. R., & Hubbe, M. A., 2006. Effects of high treatment levels in a dry-strength additive program based on deposition of polyelectrolyte complexes: How much glue is too much? TAPPI journal, 5(6): 9-14.

[18] 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.

[19] Yousefi, H., Faezipour, M., Hedhazi, S., Mazhari Mousavi, M., Azusa, Y., and Heidari, A.H., 2013. Comparative study of paper and nanopaper properties prepared from bacterial cellulose nanofibers and fibers/ground cellulose nanofibers of canola straw. Industrial Crops and Products, 43: 732-737.

[20] Ghaderi, M., Mousavi, M., Yousefi, H., Labbafi, M., 2014. All-cellulose nanocomposite film made from bagasse cellulose nanofibers for food packaging application. Carbohydrate polymers, 104: 59-65.

[21] Mirshokraei, S.A., 2013. Pulp and paper technology (2nd edition), Aiij Press (Translated in Persian)

Influence of Cationic Starch and Nano-Wood addition on improving the Old Corrugated Containers (OCC) pulp properties

Abstract

One of the disadvantages of recycled fibers is the significant loss of mechanical strength of the paper due to the decrease in the bond between the fibers. The objective of this study was to investigate the effect of adding paulownia nano-wood on the improvement of pulp from old corrugated containers (OCC). Therefore, in this study, with the aim of preserving the mechanical properties of paper, a nano wood-cationic starch system was used. The pulp was prepared from OCC collected and after refining and obtaining a flow rate of 380 ± 20 ml, different amounts of nano-wood (1, 2, and 3%) and cationic starch (0.5, 1, and 1.5%) was added to it. Finally, standard hand sheet papers were made from these treatments, and their physical and mechanical properties were measured according to the TAPPI standards. The results showed that the density and air permeability increase with the addition of cation-starch nano-wood in the paper. Also, the results showed that there is a significant difference with 95% confidence between different treatments in terms of mechanical strength. The highest values of burst resistance index (2.173 kPa / g), crush resistance in ring mode (177.4 N), and air passage resistance (36.9 s) belonged to S3N 1.5 treatment. It can be concluded that the use of larger amounts of nano-wood with the help of cationic starch as retention aids improves the final paper strengths.

Keywords: Paulownia, Old Corrugated Containers, Nano Wood, Cationic Starch.

L. Karimi[1]
M. Aryaie Monfared[2*]
E. Afra[3]

[1] M.Sc. Graduated Student in Cellulosic Industries, Department of Paper Sciences and Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences & Natural Resources

[2] Assistant Professor, Department of Paper Sciences and Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran

[3] Associate Professor, Department of Paper Sciences and Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran

Corresponding author:
Hadiaryaie@gmail.com

Received: 2021/10/09
Accepted: 2021/12/04