

ارزیابی افزودن نانوفیبر سلولزی برای تقویت خمیر کاغذ کرافت پربازده صنوبر دلتوئیدس رقم ۵۵-۶۹

صالح قهرمانی^۱، سحاب حجازی^{۲*} و سعید مهدوی^۳

- ۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج
- ۲* - نویسنده مسئول، دانشیار، گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، پست الکترونیک: shedjazi@ut.ac.ir
- ۳- دانشیار، بخش تحقیقات علوم چوب و فراورده‌های آن، عضو هیئت علمی مؤسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور، تهران

تاریخ دریافت: بهمن ۱۳۹۳ تاریخ پذیرش: آبان ۱۳۹۴

چکیده

در این تحقیق ظرفیت تقویت‌کنندگی نانوفیبر سلولزی برای خمیر کاغذ کرافت پربازده تهیه شده از چوب صنوبر دلتوئیدس رقم ۵۵-۶۹ به منظور ساخت کاغذ تاپ لاینر قهوه‌ای مورد مطالعه قرار گرفت. شرایط متغیر پخت شامل مدت زمان پخت در دو سطح و دمای پخت در دو سطح بود. سولفیدیت و قلیای فعال در همه پخت‌ها ثابت و نسبت مایع پخت به خرده‌چوب برای همه پخت‌ها ۴ به ۱ بود. از بین خمیر کاغذهای ساخته شده، خمیر کاغذ با شرایط بهینه بر اساس بازده و عدد کاپای خمیر کاغذ، برای تقویت با نانوفیبر انتخاب شد. سپس، توسط کوبنده PFI mill برای دستیابی به درجه روانی ۳۸۵ میلی‌لیتر درجه کانادایی پالایش شد و از آن کاغذهای دست‌ساز و کاغذهای تقویت‌شده با نانوفیبر سلولزی ساخته شد. نانوفیبر سلولزی در سه سطح (۵، ۱۰ و ۱۵ درصد) به خمیر کاغذ کرافت پربازده اضافه گردید و به مدت ۵ دقیقه با آن مخلوط شده و کاغذهای دست‌ساز با استفاده از توری مخصوص ساخته شد. البته با افزودن ۱۵ درصد نانوفیبر سلولزی به خمیر کاغذ کرافت پربازده، باعث بهبود شاخص کشش تا ۶۸ درصد، شاخص ترکیدن تا ۵۱/۳۲ درصد، شاخص پارگی تا ۲۱/۵۱ درصد، شاخص سختی خمشی تا ۱۴/۱۲ درصد و مقاومت به لهیدگی حلقه‌ای (RCT) تا ۱۲۴/۵۹ درصد شد. در مجموع، با توجه به بازده خمیر کاغذ کرافت و همچنین مقاومت‌های فیزیکی و مکانیکی کاغذ تقویت‌شده، استفاده از آن به عنوان تاپ لاینر قهوه‌ای قابل توصیه است.

واژه‌های کلیدی: نانوفیبر سلولزی، خمیر کاغذ کرافت پربازده، تاپ لاینر قهوه‌ای، صنوبر دلتوئیدس، خواص مکانیکی، خواص فیزیکی.

مقدمه

است که به راحتی به شکل و حالات مختلف تبدیل می‌گردد. همچنین به وسیله توانایی ترکیب کاغذ و مقوا با مواد مختلف، می‌توان به قابلیت‌های جدیدی در بسته‌بندی اقلام مختلف دسترسی پیدا کرد. حال با توجه به این مهم و اینکه رشد و شکوفایی این صنعت مزایای بسیاری را به دنبال خواهد

صنعت بسته‌بندی کاغذی و مقوایی دارای مزایایی نظیر قابلیت استفاده مجدد، بازگشت سریع به چرخه محیط‌زیست، سبکی، مقاومت، چاپخوری مناسب، ارزانی و غیره می‌باشد. توانایی بی‌نظیر این صنعت به لحاظ نوع ساختار ماده اولیه

چقرمگی^۱ قابل توجه تهیه کردند. آنان به این نتیجه رسیدند که چقرمگی بالای نانو کاغذ با تخلخل زیاد مربوط به ساختار شبکه‌ای نانوفیبر و عملکرد مکانیکی بالای نانوفیبر می‌باشد. Ferrer و همکاران (۲۰۱۰) نانو کاغذ حاصل از ساقه نخل را بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که نانو کاغذ تولید شده از خمیر کاغذ سودا - آنتراکینون دارای مقاومت مکانیکی ۱۳۱ مگاپاسکال و در حد نانو کاغذ تولید شده از خمیر کاغذ رنگ‌بری شده چوب بوده و قابل توصیه برای استفاده در صنایع بسته‌بندی می‌باشد. Hassan و همکاران (۲۰۱۱) در پژوهشی، قابلیت‌های خمیر کاغذ کرافت باگاس و خمیر کاغذ کرافت کلش برنج را مورد بررسی قرار دادند. نانو کاغذ تولید شده از خمیر کاغذ کرافت دارای مقاومت مکانیکی در حدود ۱۱۲ مگاپاسکال و نیز مقاومت مکانیکی نانو کاغذ تولید شده از خمیر کاغذ کرافت کلش برنج در حدود ۶۸/۱ مگاپاسکال بوده است. Yousefi و همکاران (۲۰۱۱)، اثر نانوفیبر سلولزی در مقاومت مکانیکی کاغذ ساخته شده از ساقه کلزا را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آنان نشان داد که خصوصیات مکانیکی نانو کاغذ در مقایسه با میکرو کاغذ توسعه یافت. علاوه بر این، مقدار پیوند هیدروژنی و درگیری فیبرها با یکدیگر نیز افزایش می‌یابد. Hasanjanzadeh و همکاران (۲۰۱۴) تأثیر استفاده از نانوفیبر سلولزی و نشاسته کاتیونی بر ویژگی‌های خمیر کاغذ سودا آنتراکینون ساقه برنج را مورد بررسی قرار دادند. نتایج این تحقیق نشان داد که مقاومت‌های مکانیکی خمیر کاغذ با افزودن نانوفیبر سلولزی با وجود استفاده از ورق‌سازی متداول آزمایشگاهی در سه سطح (۲، ۵ و ۱۰ درصد) به طور خطی افزایش می‌یابد.

با توجه به خواص جالب نانوفیبر سلولزی و اهمیت محصولات کاغذی در صنعت بسته‌بندی، هدف از این تحقیق افزودن نانوفیبر سلولزی به منظور تقویت خمیر کاغذ کرافت پربازده از چوب صنوبر دلتوئیدس رقم ۶۹-۵۵ است. این تقویت، به منظور جبران ضعف عمومی فیبرهای این نوع خمیر کاغذ با ایجاد یک شبکه فیبری مستحکم، در ساختار کاغذ

داشت و نیز برای پیشی گرفتن از رقبا، باید کیفیت و انتخاب درست و مقرون به صرفه ماده اولیه را در این صنعت در نظر گرفت (Talaei pour *et al.*, 2009). از آنجایی که کلیه صنایع در سطح جهان پیشرفت قابل توجهی داشته‌اند، بیش از نیمی از محصولات این صنایع در قالب پوششی به سایر مناطق منتقل می‌شوند. در این میان، صنایع بسته‌بندی کاغذی و مقوایی از سایر صنایع بسته‌بندی بسیار پیشی گرفته و مورد قبول همگان واقع شده است (Malmir chegini *et al.*, 2011). همچنین با افزایش مستمر تقاضا با محدودیت منابع جنگلی و حتی کاهش آنها روبرو هستیم. بنابراین رویکرد کلی به سمت افزایش کارایی روش‌های مختلف تولید کاغذ و ارائه روش‌های جدید تولید خمیرهای پربازده و همچنین استفاده از گونه‌های چوبی سریع‌الرشد و دست‌کاشت مانند صنوبر و استفاده از پسماندهای کشاورزی و مواد لیگنوسلولزی غیر چوبی مانند ساقه برنج می‌باشد (Hamasi *et al.*, 2012).

با افزودن مواد مختلف به خمیر کاغذ و مقوا و تغییر در فناوری ساخت، توانسته‌اند قابلیت‌های زیادی به آن ببخشند و شکل ظاهری و سایر خصوصیات کاغذ و مقوا را با توجه به محصول تغییر دهند. یکی از راهکارهای مناسب در بهبود خواص مقاومتی این نوع از کاغذها، استفاده از تقویت‌کننده‌ها، از جمله نانو ساختارهای سلولزی است. نانو مواد زیست‌پایه به‌ویژه نانو مواد پایه سلولزی به دلیل خواص ویژه مقاومتی و ایمنی در کاربرد به‌واسطه زیست‌تخریب‌پذیر بودن اهمیت خاصی دارند (Hadilam *et al.*, 2012). یکی از ویژگی‌های نانوفیبر سلولزی سطح ویژه بسیار زیاد و یکنواخت‌تر بودن ابعاد آنها می‌باشد (Hasanjanzadeh *et al.*, 2014). بنابراین می‌توان پیش‌بینی کرد که افزودن نانوفیبر سلولزی به سوسپانسیون خمیر کاغذ موجب افزایش سطح پیوند بین فیبرها، افزایش خواص مکانیکی خمیر کاغذ و شکل‌گیری بهتر آن شود. Henriksson و همکاران (۲۰۰۸) با استفاده از نانوفیبر سلولزی چوب با درجه پلیمریزاسیون متفاوت، نانو کاغذ سلولزی با

شد. بدین منظور، 24 ± 2 گرم خمیر کاغذ (بر اساس وزن خشک) با درصد خشکی ۱۰ درصد تا رسیدن به درجه روانی ۳۸۵ ml csf پالایش شد.

ساخت کاغذ دست‌ساز

از نمونه خمیر کاغذ بهینه پالایش شده با استفاده از دستگاه کاغذ ساز، طبق استاندارد TAPPI به شماره T205 sp-02 کاغذ دست‌ساز ۱۲۷ گرمی ساخته شد. برای تولید کاغذهای تقویت‌شده با نانوفیبر سلولزی و به منظور پراکندگی کامل، نانو فیبرها به مدت دو دقیقه هم زده شد. بعد از اضافه کردن نانوفیبر سلولزی به سوسپانسیون، عمل اختلاط نانوفیبر سلولزی در سه سطح (۵، ۱۰ و ۱۵ درصد) به سوسپانسیون خمیر کاغذ پالایش شده کرافت پربازده با استفاده از یک همزن آزمایشگاهی به مدت ۵ دقیقه انجام شد. سپس با استفاده از توری مخصوص با مش ۱۴۵۰ و با اندازه منافذ ۹ میکرون و با استفاده از دستگاه کاغذ ساز طبق استاندارد TAPPI به شماره T205 sp-02، کاغذ تقویت‌شده با نانوفیبر سلولزی تهیه شد. مدت زمان آبیگری در توری معمولی و توری مخصوص نیز بر اساس استاندارد T221 cm-99 آیین‌نامه TAPPI برای همه کاغذهای دست‌ساز و کاغذهای تقویت‌شده با نانوفیبر سلولزی با استفاده از زمان سنج (برحسب ثانیه) ثبت شد.

خواص فیزیکی خمیر کاغذ

اندازه‌گیری جرم پایه و ضخامت کاغذ طبق استاندارد TAPPI به ترتیب آیین‌نامه‌های T410 om-02 و T411 om-05 انجام شد. دانسیته کاغذ بر اساس حاصل تقسیم جرم پایه به ضخامت کاغذ محاسبه شد.

مقاومت‌های خمیر کاغذ

مقاومت‌کششی کاغذهای ساخته شده با استفاده از استاندارد شماره ISO 1924-2 انجام شد. آزمون مقاومت به ترکیدن کاغذ مطابق با استاندارد TAPPI آیین‌نامه T403 om-02 انجام شد. همچنین آزمون مقاومت به پارگی طبق استاندارد TAPPI آیین‌نامه T414 om-04 انجام گردید.

تاپ‌لایتر قهوه‌ای است. برای ماندگاری بهتر نانوفیبر سلولزی در سیستم کاغذسازی، از یک توری مخصوص (با مش ۱۴۵۰) استفاده شده است.

مواد و روش‌ها

چوب صنوبر

چوب مورد نیاز از رقم سریع‌الرشد ۵۵-۶۹ صنوبر دلتوئیدس کاشته شده در مرکز تحقیقات البرز کرج تهیه شد. گرده‌بینه‌ها پس از پوست‌کنی توسط یک دستگاه خردکن پالمن^۱ به خرده‌چوب تبدیل شدند.

نانوفیبر سلولزی

نانوفیبر سلولزی از ساقه برنج با روش سوپر آسیاب دیسکی (MKCA6-3, Masaku Co., Japan) تهیه شد. برای تولید نانوفیبر، ابتدا سوسپانسیون فیبر ساقه برنج به غلظت ۱ درصد رسانده شد و از دستگاه سوپر آسیاب دیسکی یکبار عبور داده شد.

خمیر کاغذ کرافت پربازده

شرایط پخت شامل مدت زمان پخت در دو سطح (۹۰ و ۱۲۰ دقیقه)، دمای پخت در دو سطح (۱۶۰ و ۱۷۰ درجه سانتی‌گراد)، سولفیدیت و قلیائیت فعال به ترتیب ۲۰ و ۱۶ درصد (بر مبنای وزن خشک خرده‌چوب) و نسبت مایع پخت به خرده‌چوب ۴ به ۱ بود. شرایط بهینه پخت بر اساس بازده و عدد کاپای خمیر کاغذ کرافت شامل سولفیدیت ۲۰ درصد، قلیائیت فعال ۱۶ درصد، مدت زمان ۹۰ دقیقه و دمای ۱۶۰ درجه سانتی‌گراد انتخاب شد که منجر به تولید خمیر کاغذی با عدد کاپای ۸۰/۸ و بازده ۶۸/۴۳ درصد شد.

پالایش خمیر کاغذ

پالایش خمیر کاغذ به وسیله کوبنده آزمایشگاهی PFI mill و طبق استاندارد TAPPI شماره T248 sp-00 انجام

طرفه انجام شد. در صورت معنی دار بودن اختلاف بین میانگین ویژگی‌های مورد بررسی، گروه‌بندی میانگین ویژگی‌های مورد بررسی، با آزمون چند دامنه‌ای دانکن انجام گردید.

نتایج

خمیر کاغذسازی کرافت پربازده

در جدول ۱ میانگین نتایج پخت کرافت پربازده صنوبر دلتوئیدس رقم ۵۵-۶۹ شامل شرایط پخت، بازده، عدد کاپا و درصد وزده خمیر کاغذ آورده شده است. بر اساس بازده و عدد کاپای خمیر کاغذهای کرافت ۴ پخت با شرایط ذکر شده، پخت دوم با بازده ۶۸/۴۳ و عدد کاپای ۸۰/۸ به عنوان پخت بهینه برای ساخت کاغذ تاپ لاینر قهوه‌ای انتخاب شد. تجزیه و تحلیل آماری نتایج مربوط به بازده و عدد کاپای کرافت پربازده نشان داد که بین میانگین این ویژگی‌ها در سطح اعتماد ۹۵٪ تفاوت معنی داری وجود دارد. گروه‌بندی میانگین‌ها نیز به وسیله آزمون دانکن به صورت حروف کوچک بر روی اعداد نشان داده شده است.

آزمون سفتی خمشی^۱ کاغذ نیز با استفاده از دستگاه تاپیر^۲ مطابق با استاندارد ملی ایران شماره ۷۸۸۰-۲ انجام شد. مقاومت به لهیدگی حلقه‌ای (RCT^۳) نیز مطابق با استاندارد ISO شماره 12192 انجام شد.

ریزننگار

تهیه ریزنگار از نمونه‌های کاغذ شاهد و کاغذهای تقویت شده با نانو فیبر سلولزی با استفاده از یک دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدان (HITACHI FE-SEM) مدل S4160 ساخت کشور ژاپن انجام شد. برای تهیه ریزنگارهای الکترونی، نمونه‌ها ابتدا در خلأ خشک شده و بعد با ذرات طلا (پلاتینیوم/پالادیوم) اندود شدند.

تجزیه و تحلیل آماری

بررسی و تحلیل داده‌های پخت کرافت با استفاده از نرم افزار آماری SAS توسط آزمون فاکتوریل دو متغیره در قالب طرح کاملاً تصادفی انجام شد. تحلیل نتایج مربوط به ویژگی‌های فیزیکی و مقاومت‌های کاغذ با تکنیک تجزیه واریانس یک

جدول ۱- نتایج پخت‌های انجام شده برای تولید خمیر کاغذ کرافت پربازده از صنوبر

شماره پخت	سولفیدته (درصد)	قلیائیت (درصد)	زمان (دقیقه)	دما (سانتی‌گراد)	بازده (درصد)	عدد کاپا	وزده (درصد)
۱	۲۰	۱۶	۱۲۰	۱۶۰	۶۲ ^b	۶۸/۶ ^b	۵
۲	۲۰	۱۶	۹۰	۱۶۰	۶۸/۴۳ ^a	۸۰/۸ ^a	۲/۵
۳	۲۰	۱۶	۱۲۰	۱۶۰	۵۶/۶۲ ^c	۶۸ ^b	۲/۶
۴	۲۰	۱۶	۱۲۰	۱۷۰	۵۵/۶۲ ^c	۵۲/۶ ^c	۳

ریزننگار الکترونی

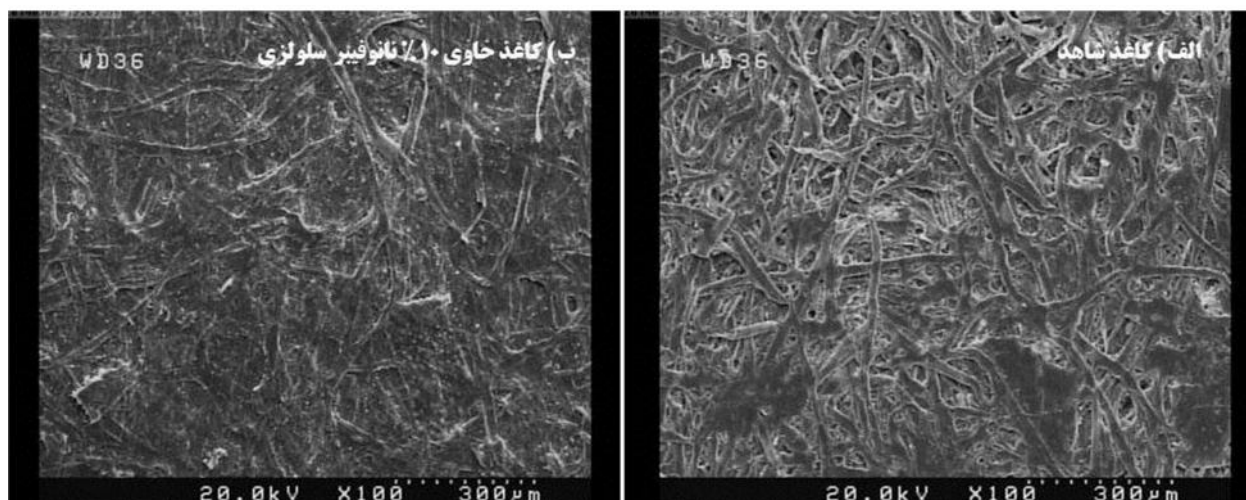
نانوفیبر سلولزی، سطح کاغذ تاپ لاینر قهوه‌ای هموارتر شده (شکل ۱، ب) و منافذ نسبت به نمونه شاهد (شکل ۱، الف) پرت‌تر شده‌اند که خود سبب ایجاد شبکه پیوسته بین نانوفیبر به فیبر شده است.

شکل ۱ ریزنگار الکترونی روبشی گسیل میدان کاغذ کرافت پربازده شاهد و کاغذ تاپ لاینر قهوه‌ای تقویت شده با ۱۰ درصد نانوفیبر سلولزی ساقه برنج را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود بر اثر افزودن ۱۰ درصد

1- Bending stiffness

2- Taber tester

3- Ring crush test



شکل ۱- ریزنگار الکترونی: الف) کاغذ شاهد، ب) کاغذ تاپ لاینر قهوه‌ای تقویت شده با ۱۰ درصد نانوفیبر سلولزی

ویژگی‌های فیزیکی

نتایج تجزیه واریانس ویژگی‌های کاغذهای دست ساز بعد از افزودن نانوفیبر سلولزی به سوسپانسیون خمیر کاغذ کرافت پربازده در جدول ۳ خلاصه شده است. این جدول نشان می‌دهد که استفاده از سه سطح افزایش نانوفیبر سلولزی در خمیر کاغذ کرافت پربازده صنوبر

موجب افزایش مدت زمان آبگیری شده که در سطح ۹۹ درصد معنی دار می‌باشد.

همچنین تجزیه واریانس (جدول ۲) نشان داد که افزایش استفاده از نانوفیبر سلولزی موجب بروز تغییرات معنی دار میانگین ضخامت، دانسیته و حجمی کاغذ ساخته شده در سطح ۹۹ درصد احتمال شده است.

جدول ۲- تجزیه واریانس کاغذ تاپ لاینر قهوه‌ای تقویت شده با نانوفیبر سلولزی ساقه برنج

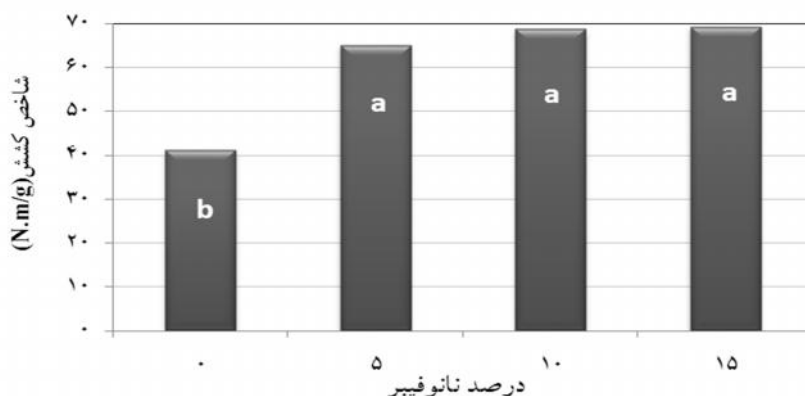
متغیر	متغیر وابسته	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	F (آماره)	سطح معنی داری
کشش	۱۶۱۷/۱۱۰	۳	۵۳۹/۰۳۶	۳۵/۳۰	۰/۰۰۰۱**	
ترکیدن	۰/۶۶۸۹۲	۳	۰/۲۲۲۹۷	۱۱/۸۲	۰/۰۰۲۶**	
پارگی	۱۴/۷۴۳	۳	۴/۹۱۴	۹/۸۷	۰/۰۰۴۶**	
طول پارگی	۰/۸۸۷۰۳	۳	۰/۲۹۵۶۷	۹/۹۲	۰/۰۰۴۵**	
افزودن نانوفیبر	۹/۰۷۶	۳	۳/۰۲۵	۱/۶۶	۰/۰۲۵*	
سفتی خمشی	۱/۰۵۷۱	۳	۰/۳۵۲۳۸	۴/۴۰	۰/۰۴۱۸*	
لهیدگی حلقه‌ای	۰/۰۰۰۰۶۷۱۷	۳	۰/۰۰۰۰۲۲۳۹	۵۹/۷۰	۰/۰۰۰۱**	
ضخامت	۰/۱۵۴۵	۳	۰/۰۵۱۵	۳۱/۳۰	۰/۰۰۰۱**	
دانسیته	۰/۳۶۶۷	۳	۰/۱۲۲۲۵	۲۳/۷۴	۰/۰۰۰۲**	
حجمی	۲۴۱/۳۲۳	۳	۸۰/۴۴۱	۹۵/۵۶	۰/۰۰۰۱**	
زمان آبگیری						

** معنی دار با احتمال ۹۹ درصد * معنی دار با احتمال ۹۵ درصد

مقاومت‌های کاغذ

استفاده از نانوفیبر در کاغذ تاپ لاینر قهوه‌ای برای افزایش مقاومت کششی در سطح احتمال ۹۹ درصد معنی‌دار می‌باشد. با افزودن نانوفیبر سلولزی در سه سطح ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد به خمیر کاغذ کرافت پربازده، شاخص مقاومت کششی به ترتیب از $41/15 \text{ N.m/g}$ برای کاغذ شاهد به $65/12$ ، $68/73$ و $69/26 \text{ N.m/g}$ افزایش یافته است (شکل ۲).

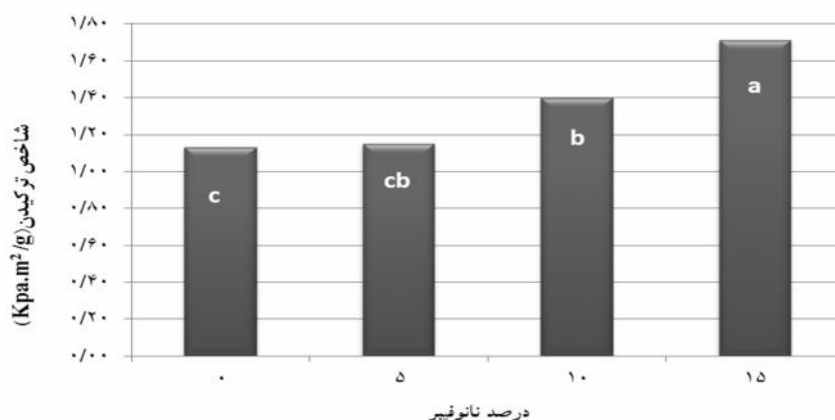
شکل‌های ۲، ۳، ۴، ۵ و ۶ به ترتیب تغییرات شاخص مقاومت کششی، شاخص ترکیدن، شاخص پارگی، شاخص سفتی خمشی و مقاومت به لهیدگی را در حالت حلقه (RCT) کاغذ تقویت شده با نانوفیبر سلولزی نشان می‌دهد. جدول تجزیه واریانس (جدول ۳) نشان می‌دهد که



شکل ۲- اثر نانوفیبر سلولزی بر شاخص کشش کاغذ تاپ لاینر قهوه ای

۱۵ درصد به خمیر کاغذ کرافت پربازده، شاخص ترکیدن کاغذ به ترتیب از $1/13 \text{ Kpa.m}^2/\text{g}$ برای کاغذ شاهد به $1/40$ ، $1/15 \text{ Kpa.m}^2/\text{g}$ و $1/71$ افزایش یافته است (شکل ۳).

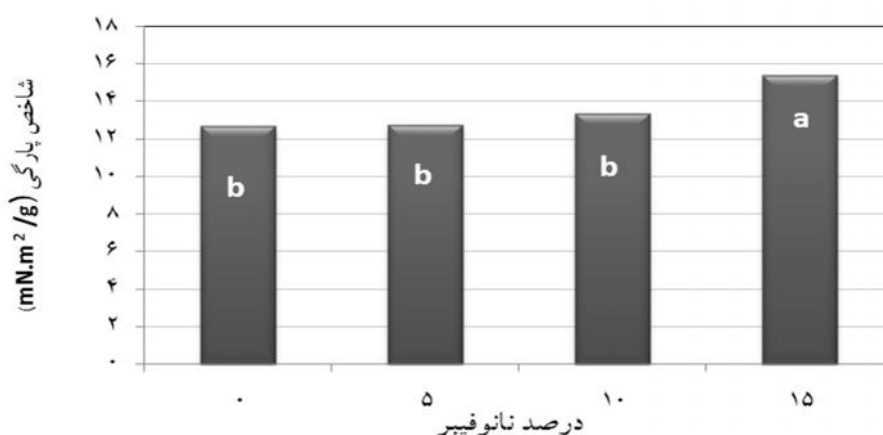
جدول تجزیه واریانس (جدول ۳) نشان می‌دهد که استفاده از نانوفیبر در کاغذ تاپ لاینر قهوه‌ای برای افزایش مقاومت ترکیدن در سطح ۹۹ درصد معنی‌دار می‌باشد. به طوری که با افزودن نانوفیبر سلولزی در سه سطح ۵، ۱۰ و



شکل ۳- اثر نانوفیبر سلولزی بر شاخص ترکیدن کاغذ تاپ لاینر قهوه ای

(۳) نشان داد که استفاده از نانوفیبر در کاغذ تاپ لاینر قهوه‌ای برای افزایش مقاومت به پارگی کاغذ در سطح ۹۹ درصد معنی‌دار می‌باشد.

شاخص پارگی کاغذ نیز با افزودن نانوفیبر سلولزی در سه سطح ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد به خمیر کاغذ کرافت پربازده، به ترتیب از $12/69 \text{ mN.m}^2/\text{g}$ در کاغذ شاهد به $12/74 \text{ mN.m}^2/\text{g}$ ، $13/39$ و $15/42$ افزایش یافته است. تجزیه واریانس (جدول

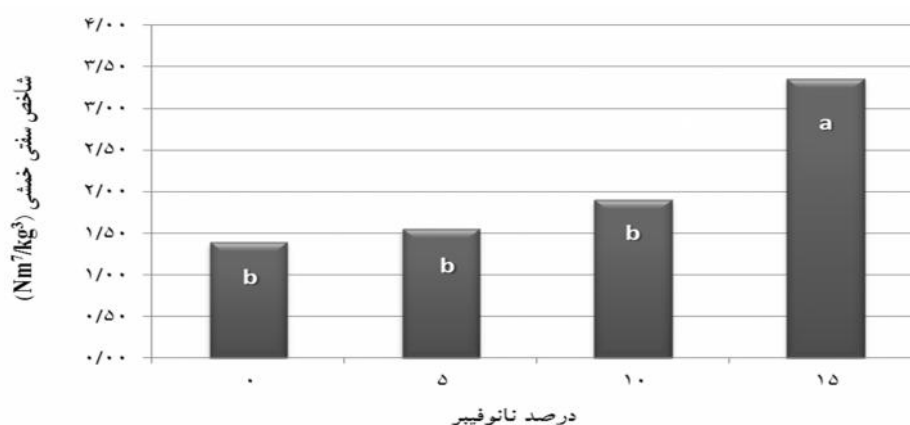


شکل ۴- اثر نانوفیبر سلولزی بر شاخص پارگی کاغذ تاپ لاینر قهوه ای

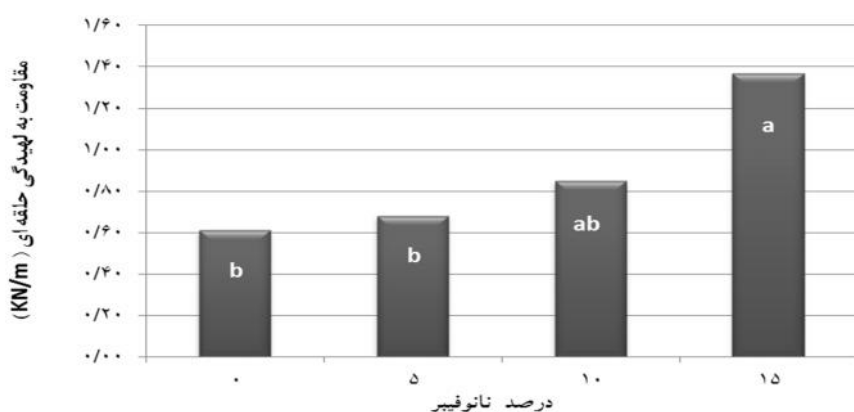
۱۰ و ۱۵ درصد به خمیرکاغذ کرافت پربازده، مقاومت به لهیدگی حلقه‌ای (RCT) نیز به ترتیب از ۰/۶۱ kN/m به ۰/۶۸ kN/m، ۰/۸۵ و ۱/۳۷ افزایش یافته است (شکل ۶).

میانگین ویژگی‌های کاغذ تاپ لاینر قهوه‌ای تقویت شده با نانوفیبر سلولزی از جمله ضخامت، دانسیته، حجیمی و مدت زمان آبگیری به طور خلاصه در جدول ۳ نشان داده شده است.

تجزیه واریانس (جدول ۳) نشان داد که استفاده از نانوفیبر در خمیرکاغذ کرافت پربازده موجب افزایش سفتی خمشی و مقاومت به لهیدگی حلقه‌ای (RCT) در سطح احتمال ۹۵ درصد شده است. به طوری که شاخص سفتی خمشی با افزودن نانوفیبر سلولزی به خمیرکاغذ کرافت پربازده در سه سطح ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد، از $1/39 \text{ N.m}^2/\text{kg}^3$ برای نمونه شاهد به ترتیب $3/06$ و $1/90$ ، $1/55$ و $3/06$ افزایش یافته است (شکل ۵). در نهایت با افزودن نانوفیبر سلولزی در سه سطح ۵،



شکل ۵- اثر نانوفیبر سلولزی بر شاخص سفتی خمشی کاغذ تاپ لاینر قهوه ای



شکل ۶- اثر نانوفیبر سلولزی بر مقاومت به لهیدگی حلقه ای کاغذ تاپ لاینر قهوه ای

جدول ۳- اثر نانوفیبر سلولزی بر ویژگی‌های فیزیکی و مقاومت‌های مکانیکی کاغذ تاپ لاینر قهوه‌ای

درصد نانوفیبر	شاخص کشش (Nm/gr)	شاخص ترکین (K pam ² /g)	شاخص پارگی (mN.m ² /g)	طول پارگی (Km)	شاخص سفتی خمشی (Nm ² /kg ³)	RCT (KN/m)	ضخامت (cm)	دانشیه (gr/cm ³)	حجمی (cm ³ /gr)	زمان آجگری (ثانیه)
۰	۴۱/۱۵	۱/۱۳	۱۲/۶۹	۴/۱۹	۱/۳۹	۰/۶۱	۰/۰۲۰۸	۰/۶۷۸	۱/۴۷	۲۵/۳۳
۵	۶۵/۱۲	۱/۱۵	۱۲/۷۴	۶/۶۲	۱/۵۵	۰/۶۸	۰/۰۱۶۳	۰/۷۸۳	۱/۲۸	۳۰/۶۶
۱۰	۶۸/۷۳	۱/۴۰	۱۳/۳۹	۷/۰۱	۱/۹۰	۰/۸۵	۰/۰۱۵۱	۰/۹۳۳	۱/۰۷	۴۲/۶۶
۱۵	۶۹/۲۶	۱/۷۱	۱۵/۴۲	۷/۰۶	۳/۰۶	۱/۳۷	۰/۰۱۴۹	۰/۹۵۵	۱/۰۴	۴۸

بحث

به طوری که با افزودن ۱۵ درصد نانوفیبر سلولزی شاخص کشش کاغذ تاپ لاینر قهوه‌ای ۶۸ درصد نسبت به کاغذ شاهد افزایش یافته است. بدین ترتیب، با استفاده از یک ماده تقویت‌کننده زیست‌پایه، مقاومت کششی کاغذ افزایش پیدا می‌کند. با افزودن مقدار نانوفیبر سلولزی تعداد پیوند هیدروژنی بین فیبر با فیبر افزایش می‌یابد و مقاومت کششی کاغذ به طور معنی‌داری بهبود می‌یابد. بر اثر کوچک‌تر شدن ابعاد تا مقیاس نانومتری، سطح ویژه فیبرهای سلولزی افزایش می‌یابد. این به معنی قرارگرفتن تعداد بیشتر گروه‌های در دسترس هیدروکسیل در سطح نانوفیبرهاست که توانایی تشکیل پیوند هیدروژنی را با نانو فیبرهای مجاور دارند و در نهایت سبب تشکیل شبکه‌ای از نانو فیبرها می‌شوند. همان‌طور که در شکل ۲ دیده می‌شود افزایش

در این تحقیق، نانوفیبر سلولزی ساقه برنج به سوسپانسیون خمیر کاغذ کرافت پر بازده به منظور تقویت آن اضافه شده است. نتایج ویژگی‌های فیزیکی و مقاومت‌های مکانیکی کاغذ تاپ لاینر قهوه‌ای حکایت از موفقیت افزودن نانوفیبر سلولزی به عنوان تقویت‌کننده با استفاده از توری مخصوص دارد. در ریزنگاره کاغذ حاوی نانوفیبر سلولزی، بخشی از فیبرهای سطح کاغذ دیده می‌شود که فضای بین آنها با نانوفیبر سلولزی پوشانده شده است. البته پر کردن منافذ بین فیبرها سبب ایجاد شبکه پیوسته نانوفیبر با فیبرها شده است (Hadilam et al., 2012). افزودن نانوفیبر سلولزی به خمیر کاغذ کرافت پر بازده باعث بهبود مقاومت کششی کاغذهای تاپ لاینر قهوه‌ای حاصل شد،

نکرده است، بنابراین افزودن ۱۵ درصد نانوفیبر سلولزی برای مقاومت پارگی قابل توصیه است. به طوری که نانوفیبر سلولزی با افزایش پیوند بین الیاف قدرت شبکه‌ای الیاف را بالا می‌برد و مانع از لغزش الیاف شده، در نتیجه منجر به استحکام شبکه و مقاومت پارگی بالاتر می‌شود. همچنین نانو فیبرهای سلولزی با افزایش تعداد الیافی که در پاره شدن کاغذ نقش دارند و با افزایش تعداد اتصالات بین الیاف و با افزایش مقاومت اتصالات مقاومت به پارگی را افزایش می‌دهند (Lindgren, 2010). البته نتایج تغییرات شاخص پارگی با افزودن نانوفیبر سلولزی در این پژوهش با نتایج سایر محققانی مانند Hadilam و همکاران (۲۰۱۳) و Hassan و همکاران (۲۰۱۱) و Alinia و همکاران (۲۰۱۳) همکاران (۲۰۱۳) همخوانی ندارد. به نحوی که با افزودن ۱۵ درصد نانوفیبر سلولزی شاخص سفتی خمشی کاغذ ۱۲۰/۱۴ درصد و مقاومت به لهیدگی حلقه‌ای کاغذ ۱۲۴/۵۹ درصد نسبت به کاغذ شاهد افزایش یافته است. در رابطه با تغییرات شاخص سفتی خمشی و مقاومت به لهیدگی حلقه‌ای (RCT) با افزودن نانوفیبر سلولزی تحقیقات کمی انجام شده است. ولی با توجه به جایگاه و اهمیت صنعت بسته‌بندی پیش‌بینی می‌شود در آینده‌ای نه‌چندان دور، تحقیقات مبسوطی انجام شود. سفتی یک خاصیت مهم در بسیاری از کاربردهای کاغذ محسوب می‌شود. پوشه‌ها، کارت‌های راهنما، کارت‌های بازی، پوسترها، فنجان‌ها و ظروف مقوایی از جمله کالاهایی هستند که باید در هنگام مصرف سفتی خوبی داشته باشند. به عنوان یک قاعده کلی، سفتی یکی از مهمترین خواص مکانیکی کاغذ و مقواهای مورد استفاده برای بسته‌بندی محسوب می‌شود. جعبه‌های بسته‌بندی زمانی که پر می‌شوند و در مغازه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند باید در برابر تغییر شکل مقاوم باشند. کارتن‌های تاشونده^۱ و جعبه‌های حمل و نقل دارای لایه کنگره‌ای^۲ نیز باید تنش‌های ناشی از بارهای جعبه بالایی خود را تحمل کنند

مقاومت کششی با افزودن ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد نانو تغییر معنی‌داری نکرده است و میانگین همه در گروه a قرار گرفته، پس به لحاظ مقاومت کششی و به لحاظ اقتصادی استفاده از مقدار ۵٪ نانو توصیه می‌شود. در هم‌رفتگی نانو فیبرها در واحد حجم بیشتر از در هم‌رفتگی میکرو فیبرها در واحد حجم است (Yousefi *et al.*, 2011). نتایج این پژوهش در رابطه با افزایش مقاومت کششی با افزودن نانوفیبر سلولزی با نتایج محققانی مانند Hasanjanzadeh و همکاران (۲۰۱۴)، Hadilam و همکاران (۲۰۱۳) و Hassan و همکاران (۲۰۱۱) همخوانی دارد. به طوری که با افزودن ۱۵ درصد نانوفیبر سلولزی به خمیر کاغذ کرافت پربازده شاخص ترکیب کاغذ تاپ لاینر قهوه‌ای نیز به مقدار ۵۱/۳۲ درصد نسبت به کاغذ شاهد افزایش یافت. با توجه به اینکه افزودن ۵ درصد نانوفیبر سلولزی تأثیر معنی‌داری بر روی شاخص ترکیب ندارد، بنابراین مقدار ۱۰ درصد و ۱۵ درصد نانوفیبر سلولز برای مقاومت به ترکیدن توصیه می‌شود (شکل ۳). البته هرچه الیاف نازک‌تر یا انعطاف پذیرتر باشد به دلیل ایجاد اتصالات هیدروژنی بیشتر، پیوند بین الیاف افزایش یافته و در نتیجه مقاومت در برابر ترکیدن افزایش می‌یابد. نتایج حاصل از افزایش مقاومت به ترکیدن بر اثر افزودن نانوفیبر سلولزی در این پژوهش با نتایج Hasanjanzadeh و همکاران (۲۰۱۴) مطابقت دارد. مقاومت به پاره شدن و طول پارگی در ارزیابی استحکام کاغذ و مقواهایی که در مراحل تبدیلی و در زمان مصرف در معرض تنش‌های پاره شدن قرار می‌گیرند از اهمیت خاصی برخوردار است. عوامل مؤثر بر پاره شدن کاغذ عبارتند از: طول الیاف، تعداد الیافی که در پاره شدن کاغذ نقش دارند و تعداد اتصالات بین الیاف و مقاومت اتصالات (Khalili *et al.*, 2009). با افزودن ۱۵ درصد نانوفیبر سلولزی، شاخص پارگی کاغذ تاپ لاینر قهوه‌ای ۲۱/۵۱ درصد نسبت به کاغذ شاهد افزایش یافته است. همان‌طور که در شکل ۴ دیده می‌شود با افزودن ۵ درصد و ۱۰ درصد نانوفیبر سلولزی به کاغذ شاهد مقاومت پارگی کاغذ تاپ لاینر قهوه‌ای حاصل تغییر معنی‌داری پیدا

1- Folding box

2- Corrugated medium

(Scot, 2005). به طوری که با ماندگاری نانوفیبر سلولزی به دلیل داشتن سطح ویژه بالا، خواص مقاومتی کاغذ با افزایش پیوند هیدروژنی بهبود می‌یابد (Lindgren, 2010). از طرفی نانوفیبر سلولزی سطح ویژه بالایی دارد و با افزودن نانوفیبر سلولزی سطح بیشتر می‌شود که باعث افزایش سفتی می‌شود (Scot, 2005).

در مجموع، افزودن نانو الیاف سلولزی به سوسپانسیون خمیر کاغذ، موجب افزایش سطح پیوند بین الیاف، شکل‌گیری بهتر آن و افزایش شاخص سفتی خمشی و مقاومت به لهیدگی حلقه‌ای کاغذ می‌شود. همچنین با کوچک‌تر شدن ابعاد فیبرهای سلولزی به مقیاس نانو، ضعف‌ها و عیوب ساختاری فیبرها کاهش می‌یابد. در واقع، با کوچک‌تر شدن ابعاد، خواص فیبرها به سمت خواص نانو کریستال‌های بی‌عیب سوق پیدا می‌کند (Yousefi et al., 2011) که بهبود در شاخص سفتی خمشی و مقاومت به لهیدگی حلقه‌ای را سبب می‌شود. در این پژوهش، مدت زمان آبگیری نیز اندازه‌گیری شد. مدت زمان آبگیری پارامتر مهمی در فرایند ساخت کاغذ است، زیرا بهره‌وری و بازده تولید ماشین کاغذ با طولانی شدن مدت زمان آبگیری، محدود می‌شود (Scot, 2005). از طرف دیگر، مدت زمان آبگیری می‌تواند به‌عنوان معیاری از درجه فیبرله شدن الیاف مورد سنجش و استفاده قرار گیرد (Chang et al., 2011). با افزودن نانوفیبر سلولزی مدت زمان آبگیری افزایش یافته است، زیرا سطح ویژه نانو فیبرهای سلولزی نسبت به فیبرها بسیار بیشتر می‌باشد که در نتیجه نیروی موینگی و ظرفیت نگهداری آب در واحد حجم سلولز را افزایش می‌دهد. به علاوه، با افزایش ته‌نشینی نانو فیبرها از میزان ارتباط پیوسته بین منافذ کاسته می‌شود و ممانعت فیزیکی در برابر جریان سیال ایجاد می‌شود. البته افزایش زمان آبگیری با افزودن نانوفیبر سلولزی در این پژوهش با نتایج سایر محققان همخوانی دارد (Taipale et al., 2011; Hadilam et al., 2013; Alinia et al., 2011; Hasanjanzadeh et al., 2014). در این پژوهش دانسیته، حجیم و ضخامت کاغذ دست‌ساز نیز اندازه‌گیری شد. زیرا تقریباً بر روی تمام خواص فیزیکی، مکانیکی، الکتریکی و نیز قابلیت چاپ‌پذیری کاغذ مؤثر می‌باشند. با استفاده از حجیمی

کاغذ می‌توان به وضعیت نسبی مقاومت‌های آن پی برد، زیرا با افزایش اتصالات داخلی ورقه، حجیمی (بالک) کاهش می‌یابد. البته هرچه اتصالات بین الیاف قوی‌تر باشد، حجیمی کاغذ کمتر می‌شود (Khalili et al., 2011). بنابراین به دلیل کاهش ابعادی شدید فیبرهای سلولزی از مقیاس میکرومتری به نانومتری، تراکم‌پذیری آنها بیشتر، منافذ کوچک‌تر و ساختار نهایی شبکه فیبری چگال‌تر شده که در نهایت با افزودن نانوفیبر به واسطه توسعه چشم‌گیر پیوندهای هیدروژنی در کاغذ نهایی و عدم برگشت‌پذیری این تراکم، ضخامت کاغذهای تقویت‌شده با نانوفیبر کاهش، دانسیته افزایش و حجیمی نیز کاهش می‌یابد. نتایج این پژوهش، برای ضخامت، دانسیته و حجیمی کاغذ، با یافته‌های دیگر محققان مطابقت دارد (Hadilam et al., 2011; Alinia et al., 2013; Hasanjanzadeh et al., 2014).

نتیجه‌گیری

نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که سیستم افزودن نانوفیبر سلولزی با استفاده از توری مخصوص در مقایسه با سیستم متداول ساخت کاغذ دست‌ساز در آزمایشگاه مقاومت‌های مکانیکی و فیزیکی بالاتر و چشم‌گیری دارد. به دلیل بهبود مقادیر شاخص‌های مقاومت‌کششی، ترکیدن و پارگی کاغذهای تقویت‌شده با نانو فیبر سلولزی و همچنین توسعه چشم‌گیر شاخص سفتی خمشی و مقاومت به لهیدگی حلقه‌ای کاغذ در اثر افزودن نانوفیبر سلولزی، می‌توان پیش‌بینی کرد که این کاغذها در مقایسه با کاغذهای معمول استفاده شده در ماشین‌هایی مانند ماشین‌های چاپ و بسته‌بندی که تحت نیروهای کششی، ترکیدن، پارگی، فشار، لهیدگی و غیره قرار می‌گیرند، از مقاومت و کارایی بیشتری برخوردار باشند. با توجه به ویژگی‌های خمیر کاغذ کرافت پر بازده و همچنین ویژگی‌های فیزیکی و مقاومت‌های مکانیکی کاغذ تقویت‌شده با نانوفیبر سلولزی حاصل از آن، می‌توان افزودن نانوفیبر سلولزی به خمیر کاغذ کرافت پر بازده صنوبر دلتوئیدس رقم ۵۵-۶۹ برای تولید کاغذ تاپ‌لاینر قهوه‌ای را به صنایع کاغذ و بسته‌بندی توصیه کرد.

سپاسگزاری

از مسئولان و کارکنان محترم بخش تحقیقات علوم چوب و فراورده‌های مؤسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور و همچنین آقای مهندس سلیمی (مسئول آزمایشگاه شرکت کارتن ایران) که در انجام آزمایش‌های این مقاله نهایت همکاری را داشته‌اند، صمیمانه تشکر و قدردانی می‌شود.

منابع مورد استفاده

2014. The effect of polyelectrolyte on rice straw soda-AQ pulp drainage and of rice straw. *Iranian Journal of Wood and Paper Science Research*, 29(1): 170-181.
- Hassan, E.A., Hassan, M.L., Oksman, K., 2011. Improving bagasse pulp paper sheet properties with microfibrillated cellulose isolated from xylanase-treated bagasse. *Wood Fiber Sci.* 43(1): 76-82.
- Henriksson, M., Berglund, L. A., Isaksson, P., Lindstrom, T., and Nishino, T., 2008. Cellulose Nanopaper Structures of High Toughness. *Biomacromolecules*, Vol.9, Issue (6): 1579-1585.
- Khalili, A., Ghasemian, A., Saraeian A.R., Dahmardeh galehnow, M and Manzorolajdad, S.M., 2009. Study on the mechanical and optical properties of kraft liner paper produced from mixing of OCC and virgin hardwoods kraft pulp. *Iranian Journal of Wood and Paper Science Research* 24(2): 264-274.
- Lindgren, A., 2010. Preparation of Nanofibers from Pulp Fibers. Master Thesis.collaboration with Eka Chemicals AB.
- Malmir chegini, Kh., Talaei pour, M., Pourmousa, Sh., 2011. The impact properties of paper and ink on the print quality of the packaging industry based on measurement of printing density index, *Iranian journal of Wood and Paper Science*, 26 (1): 39-57.
- Scot, W., 2005. The fundamentals of paper properties. Translated in Persian by Afra, A., Aeej Publication, Tehran, Iran.
- 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.
- Talaei pour, M., Khademi eslam, H., Malmir chegini, Kh., 2009. The effects of the paper and ink characteristics on the optical properties of packaging papers, *Iranian Journal of Wood and Paper Science*, 24(2): 325-340.
- Yousefi, H., Faezipour, M., Nishino, T., Ebrahimi, G., and Shakeri, A., 2011. All-cellulose composite and nanocomposite made from partially dissolved micro and nanofibers of canola straw. *Polymer Journal*, 43: 559-564.
- Yousefi, H., Nishino, T., Faezipour, M., Ebrahimi, G., and Shakeri, A., 2011. Direct fabrication of nanocomposite from cellulose microfibers using ionic liquid-based nanowelding. *Biomacromolecules*, 12: 4080-4085.
- Alinia, A., Afra, A., Resalati, H. and Yousefi, H., 2013. Effect of Mixing Temperature of CMP (Chemi-mechanical) Pulp and Cellulose Nanofiber on Paper Properties. *Iranian Journal of Wood and Paper Industries*, Vol. 3, No. 2, Fall & Winter 2013: 77-89.
- Chang, F., Lee, S.H., Toba, K., Nagatani, A., and Endo, T., 2011. Bamboo nanofiber preparation by HCW and grinding treatment and its application for nanocomposite. *Wood Science and Technology*. 46: 393-403.
- Ferrer, A., Flipponen, L., Rodríguez, A., Laine, J., Rojas, J.O., 2010. Valorization of residual Empty Palm Fruit Bunch Fibers (EPFBF) by microfluidization: Production of nanofibrillated cellulose and EPFBF nanopaper. *Bioresource Technology*. 125: 249-255.
- Hadilam, M., Afra, E., and Yousefi, H., 2013. Effect of Cellulose Nanofibers on the Properties of Bagasse Paper. *Journal of Forest and Wood Products*, 66(3): 351-366
- Hadilam, M., Afra, E., Ghasemian, A., and Yousefi, H., 2012. Preparation and properties of ground cellulose nanofibers. *Journal of Wood and Forest Science and Technology*, Accepted.
- Hamasi, A., Sabour, M., Talaei pour, M., Azad fallah, M., 2012. The Effect of xylanase on the properties of APMP pulp of the poplar, *Iranian journal of Wood and Paper Science*, 27 (1): 156-166.
- Hasanjan zadeh, H., Hejazi, S., Yousefi, H., Mahdavi, S., Abdolkhani, A., 2014. The effects of using cationic starches and cellulose nanofibers on the pulp of Soda Antrakinone rice stem, *Journal of Forest and Wood Products*, *Iranian Journal of Natural Resources*, 67(1): 105-117.
- Hasanzadeh, H., Hedjazi, S., and Mahdavi, S.,

Evaluating the addition of cellulose nano fibers to reinforce of high yield kraft pulp produced from *P.deltoides* clone 69-55 wood

S. Ghahramani¹, S. Hedjazi² and S. Mahdavi³

1-MSc., Student, Department of Wood and Paper Science and Technology, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran

2*-Corresponding Author Associate Professor, Department of Wood and Paper Science and Technology, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran, Email: shedjazi@ut.ac.ir

3- Associate Professor, Wood Research Division and Forest, Research Institute of Forests and Rangelands, Tehran, Iran

Received: Feb., 2015

Accepted: Oct., 2015

Abstract

In this research, the potential of cellulose nanofibers to reinforce high yield kraft pulp (HYKP) produced from *Populus deltoides* clone 69-55 wood for making unbleached kraft liner board (UTKL) was investigated. The variable conditions of cooking were included the cooking time and temperature each at two levels. Sulfidity and active alkali were constant in the all cooking and liquid to wood ratio was 4 to 1. Optimum pulp was selected according to the pulp yield and kappa no. to be reinforced by cellulose nanofiber. Then, the pulp was refined by PFI mill to reach 385 ml. CSF. The cellulose nanofiber was added in three levels (5, 10 and 15%) to HYKP, then mixed for 5 min. and handsheet was made by special wire. The result indicated that 15% addition of cellulose nanofiber to high yield kraft pulp increased tensile index by 68%, burst index by 51.32%, tear index by 21.51%, bending stiffness index by 120.14% and ring crush tests (RCT) by 124.59%, compared to the HYKP. Therefore it is recommended that nanofiber can be added to HYKP for UTKL production based on the yield and also physical and strength of reinforced pulp.

Keywords: Cellulose nanofiber, high yield kraft, top liner, Deltoids poplar, mechanical properties, physical properties.