تأثیر نحوه اختلاط نانو الیاف لیگنوسلولزی با خمیرکاغذ بازیافتی در حضور سیستم میکرو ذره بر ویژگی‌های کاغذ نهایی

هما صیادی میلانی[۱]
مهدی رحمانی‌نیا[۲*]

[۱] دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده منابع طبیعی، گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، ایران

[۲] دانشیار، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده منابع طبیعی، گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، ایران

مسئول مکاتبات:
rahmaninia@modares.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۲/۲۰
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۳/۲۸

چکیده

بازیافت کاغذ ازجمله فرایندهای صنعتی متداول و ارزشمند در دنیا می‌باشد. اما در حین این فرایند، بعضی از انواع کاغذهای بازیافتی دچار افت برخی از ویژگی‌های مقاومتی می‌شوند. یکی از روش‌های بهبود این ویژگی‌ها، استفاده از مواد افزودنی همچون نانو الیاف لیگنوسلولزی می‌باشد. برخلاف بسیاری از افزودنی‌ها، به نظر می‌رسد ساختار فیزیکی و شیمیایی منحصربه‌فرد این نانو الیاف در پراکنش آن در خمیرکاغذ و عملکرد آن مؤثر باشد. برای بررسی این مسئله، در این تحقیق دو روش اختلاط متداول (با همزن مکانیکی) و شدید (با پراکنده ساز) موردبررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که افزایش شدت اختلاط سبب پراکنش بهتر نانو الیاف لیگنوسلولزی در سوسپانسیون الیاف می‌گردد و براثر آن شاخص مقاومت به کشش از حدود ۲۱ N.m/g درروش اختلاط متداول به ۳۰ N.m/g درروش اختلاط شدید افزایش‌یافته است. همچنین ازآنجایی‌که اختلاط نانو الیاف سبب کاهش آبگیری از ورقه الیاف می‌شود؛ پس از تعیین روش مناسب اختلاط، تأثیر سیستم میکرو ذره کایتوزان- بنتونیت برای بهبود آبگیری بررسی شد. نتایج نشان داد که سیستم مزبور در این تحقیق توانسته علاوه بر حفظ یا بهبود ویژگی‌های مقاومتی، باعث افزایش مناسب ویژگی‌های آبگیری گردد؛ به‌طوری‌که آبگیری از حدود ۱۳۲ ml CSF در خمیرکاغذ دارای نانوالیاف به ۱۸۹ ml CSF در خمیرکاغذ دارای نانوالیاف و سیستم میکرو ذره رسید.

واژگان کلیدی: نانو الیاف لیگنوسلولزی، روش اختلاط، کایتوزان، میکرو ذرات، ویژگی‌های مقاومتی.

مقدمه

به‌کارگیری انواع کاغذ و مقوا در دنیا به‌ویژه کشورهای توسعه‌یافته همچنان در حال گسترش است [۱]. به دلیل گستردگی مصرف و به دنبال آن رشد جمعیت، عوامل زیست‌محیطی و کمبود تأمین چوب، استفاده از کاغذهای باطله در تولید انواع محصولات کاغذی و سلولزی رو به افزایش است [۲، ۳]. دراین‌بین کاغذ کارتن مقوای کنگره‌ای (OCC)[1] به دلیل کاربرد زیاد، جزو مهم‌ترین دسته کاغذهای باطله برای بازیافت می‌باشد [۴]. الیاف کاغذ باطله به‌ویژه خمیرکاغذهای شیمیایی، زمانی که وارد چرخه بازیافت می‌شوند، در اثر خشک و خیس شدن‌های متوالی و همچنین قرارگیری در معرض مراحل مختلف بازیافت و به دنبال آن افزایش میزان نرمه‌ها، دچار کاهش

[1] Old Corrugated Containers

پتانسیل پیوند یابی می‌شوند، که این پدیده باعث افت برخی از ویژگی‌های مقاومتی در کاغذ تولیدی به‌ویژه در دفعات اول بازیافت می‌گردد [۵، ۶، ۷]. برای حل این مشکلات راه‌کارهای مختلفی مورداستفاده قرار می‌گیرد که ازجمله آن‌ها؛ افزایش پیوند یابی بین الیاف از طریق پالایش الیاف و یا استفاده از افزودنی‌های مقاومت خشک و تر مانند نانو الیاف سلولزی، نشاسته کاتیونی، کایتوزان و ... می‌باشند؛ که دراین‌بین استفاده از نانو الیاف سلولزی به دلیل سطح ویژه بالای نانو الیاف و امکان ایجاد پیوندهای هیدروژنی در تحقیقات اخیر موردتوجه قرارگرفته است [۸، ۹، ۱۰]. نانو الیاف سلولزی/لیگنوسلولزی (CNF/LCNF)[1] الیافی هستند که قطر آن‌ها بین ۱ تا ۱۰۰ نانومتر می‌باشند و با روش‌های مختلفی به‌ویژه روش‌های مکانیکی، تهیه می‌شوند [۱۱]. مطالعه‌ای نشان داد که در حضور عوامل ماندگار کننده‌ای مانند نشاسته کاتیونی، پلی دی‌آلیل‌دی‌متیل‌آمونیوم کلراید و پلی‌آکریل‌آمید کاتیونی، افزودن CNF به دوغاب خمیرکاغذ میزان آبگیری را کاهش داده؛ ولی ویژگی‌های مقاومتی کاغذ افزایش چشمگیری داشته است [۱۲]. همچنین مطالعات Bossu و همکاران در سال ۲۰۱۹ نشان داد که CNF به دلیل داشتن مقاومت مکانیکی ذاتی بالا، انعطاف‌پذیری خوب و پتانسیل بالای آن جهت برقراری پیوند هیدروژنی با الیاف سلولزی سبب بهبود ویژگی‌های مقاومتی کاغذها می‌گردد [۱۳]. علاوه بر این در تحقیق انجام‌شده بر روی افزودن نانو الیاف لیگنوسلولزی به خمیرکاغذ حاصل از کارتن‌های کنگره‌ای کهنه به همراه استفاده از سیستم نانوسیلیکای آنیونی- نشاسته کاتیونی، نتایج نشان داد که نانو الیاف مورداستفاده توانایی افزایش شاخص‌های مقاومتی کششی و خمشی کاغذها را دارند [۱۴].

در مقابل اثرات مثبتی که در استفاده از CNF بیان شد؛ وضعیت پراکنش این نانو الیاف و تأثیر آن بر ویژگی‌های کاغذ مسئله مهم و چالش‌برانگیزی است. ازآنجایی‌که نانو الیاف سلولزی از طریق پیوند هیدروژنی می‌توانند سبب تجمع در یک نقطه از کاغذ شده و به دنبال آن برهم خوردن وضعیت شکل‌گیری شوند؛ پراکندگی بهتر این نانو الیاف می‌تواند نتیجه مطلوبی در ویژگی‌های کاغذ نهایی داشته باشد [۱۵]. در راستای روش افزودن نانو الیاف لیگنوسلولزی تحقیقاتی انجام‌گرفته است. در تحقیق صورت گرفته در سال ۲۰۱۸ توسط Compano و همکاران، ابتدا CNF/CNC[2] (۱/۵ درصد وزنی/ ۰/۳ درصد وزنی) به مدت ۵ دقیقه در دور زیاد داخل آب پراکنده شدند، سپس سوسپانسیون نانو الیاف به داخل پراکنده ساز حاوی خمیرکاغذ بازیافتی روزنامه و مجله اضافه گردید و به مدت‌زمان‌های مشخص در آزمایش (مدت‌زمان خمیر سازی ۱۰ دقیقه، ۶۰ دقیقه بدون پیش خیساندن و با پیش خیساندن) پراکنده شد. سپس مواد کمک نگه‌دارنده (CPAM[3] یا CH[4]) به آن اضافه و به مدت ۳۰ ثانیه مخلوط و کاغذهای ۶۰ گرمی ساخته شد. بهترین نتایج مقاومت به کشش در زمان پراکنده‌سازی ۶۰ دقیقه با پیش خیساندن به دست آمد [۱۵]. همچنین در پژوهشی، ابتدا نشاسته کاتیونی با ۱ درصد وزن خشک خمیر در آب مقطر پراکنده و به مدت ۳۰ دقیقه در دمای ۹۰ درجه سانتی‌گراد با دور همزن ۲۰۰ rpm آماده‌سازی شد و به خمیر تهیه‌شده از باگاس اضافه گردید تا به مدت ۲ دقیقه در دور ۳۰۰ rpm مخلوط گردد. سپس CNF پراکنده‌شده در التراسونیک، به مخلوط اضافه و به مدت ۱ دقیقه هم‌زده شد و کاغذهای ۶۰ گرمی تهیه گردید. نتایج حاصل حاکی از افزایش مقاومت به کشش و مقاومت به ترکیدن کاغذها بود [۱۶]. در مطالعه‌ای دیگر، ابتدا NFC در درجه‌های مختلفی پالایش گردید و غلظت آن به ۰/۱ درصد در آب دیونیزه شده رسید. سپس با PCC[5] (به‌عنوان پرکننده) به مدت ۵ دقیقه در دور ۶۰۰ rpm ترکیب شد. پس‌ازآن نشاسته کاتیونی به‌کل مخلوط اضافه و در دور ۶۰۰ rpm به مدت ۵ دقیقه مخلوط شد و درنهایت به خمیرکاغذ اضافه شد و کاغذهای ۶۰ گرمی تهیه گردید. همچنین درروش دوم همه مواد به ترتیب ذکرشده به خمیرکاغذ جداگانه اضافه شد. نتایج نشان داد که افزودن مواد به‌صورت ترکیبی ویژگی مقاومتی کششی مناسب‌تری را حاصل می‌کند [۱۷]. در تعدادی از تحقیقات، ابتدا به مدت ۲۴ ساعت خمیر با CNF خیسانده و در دور

[1] Cellulosic Nanofiber/Lignocellulosic Nanofiber

[2] Cellulose nanocrystal
[3] Cationic Polyacrylamide
[4] Chitosan
[5] precipitated calcium carbonate

۱۸۰۰۰۰ در داخل پراکنده ساز پراکنده و سپس مواد کمک ماندگاری به آن افزوده شد [۱۸، ۱۹]. همچنین در تحقیق انجام‌شده توسط Petroudy و همکاران در سال ۲۰۱۴ ابتدا MFC (۱ تا ۵ درصد) به خمیرکاغذ اضافه و به مدت ۲۰ دقیقه در دور ۵۰۰ rpm مخلوط شد. سپس پلی‌اکریل‌آمید کاتیونی اضافه و ۲۰ دقیقه دیگر اختلاط در همان دور صورت گرفت و کاغذهای ۶۰ گرمی تهیه گردید. نتایج نشان داد که افزودن نانو الیاف سلولزی، مقاومت کششی نمونه‌ها را افزایش داده است [۲۰]. استفاده از سیستم کایتوزان – بنتونیت در خمیرکاغذهای متداول و اثرات مثبت آن بر ویژگی‌های فرایندی تولید (به‌ویژه آبگیری و ماندگاری) و همچنین ویژگی‌های محصول نهایی موردتوجه و بحث بوده است که در این تحقیق حضور و عملکرد آن در کنار نانو الیاف موردتوجه قرار خواهد گرفت [۲۱].

با توجه به آنچه گفته شد؛ در تحقیقات گذشته تأثیر شدت اختلاط نانو الیاف سلولزی/ لیگنوسلولزی با سوسپانسیون خمیرکاغذ کمتر موردتوجه بوده است. ازآنجایی‌که به نظر می‌رسد این مسئله بر پراکنش نانو الیاف در کاغذ و ویژگی‌های نهایی کاغذ تأثیرگذار باشد؛ لذا در این تحقیق، تأثیر شدت اختلاط (روش متداول هم زدن مکانیکی در مقایسه با اختلاط شدید توسط پراکنده ساز) بر عملکرد نانو الیاف لیگنوسلولزی در کاغذسازی از خمیر بازیافتی حاصل از OCC در حضور سیستم میکرو ذره (کایتوزان – بنتونیت) موردبررسی قرار خواهد گرفت.

مواد و روش‌ها

خمیر سازی از طریق جمع‌آوری کارتن‌های بسته‌بندی از سطح شهر و انجام فرایند طبق استاندارد TAPPI T 200 sp-01با استفاده از ولی‌بیتر[1]در pH خنثی به‌منظور دست‌یابی به درجه روانی ۳۰۰±۲۵ انجام گرفت [۲۲]. بنتونیت با مش ۴۰۰ از شرکت افرازند سمنان خریداری و به مدت ۲ ساعت در آب مقطر (با غلظت ۱ درصد) در دور همزن ۱۰۰۰rpm مخلوط و پراکنده شد. کایتوزان به‌صورت پودری به رنگ کرمی با وزن مولکولی متوسط (۴۰۰ تا ۶۰۰ کیلو دالتون) از شرکت sigma-aldrich خریداری و در اسید استیک ۱ درصد، با غلظت ۰/۵ درصد، به مدت ۲ ساعت حل شد.

در بخش اول آزمایش‌ها، مقایسه دو روش اصلی افزودن نانو الیاف در تیمارهای حاوی فقط نانو الیاف موردبررسی قرار گرفت. درروش اول افزودن (اختلاط متداول)، خمیرکاغذ با درصد خشکی ۰/۵ درصد و نانو الیاف به مقدار ۳ درصد وزن خشک خمیرکاغذ به کمک همزن مکانیکی متداول به مدت ۱۵ دقیقه با دور rpm ۱۵۰۰ با یکدیگر مخلوط شدند. همچنین در این روش خمیرکاغذ با درصد خشکی ۰/۵ درصد و بدون نانو الیاف به‌صورت مشابهی آماده گردید و شاهد ۱ نامیده شد. درروش دوم افزودن (اختلاط شدید) در شرایط مشابه خمیرکاغذ (درصد خشکی خمیرکاغذ ۰/۵ درصد و نانو الیاف به مقدار ۳ درصد وزن خشک خمیرکاغذ) به داخل دستگاه پراکنده ساز[2]منتقل و به مدت ۱۵ دقیقه با دور ۲۵۰۰۰rpm مخلوط شدند. در این روش نیز خمیرکاغذ شاهد با درصد خشکی ۰/۵ درصد و بدون نانو الیاف به‌صورت مشابهی آماده گردید و تیمار شاهد ۲ نام‌گذاری گردید.

پس‌ازاین مرحله کاغذهایی با گراماژ ۱۲۰ گرم بر مترمربع تهیه و ویژگی‌های مقاومت به کشش، مقاومت به خمش و مقاومت به پاره شدن کاغذها به ترتیب طبق استاندارد TAPPI T 494 om-01، SCAN-P 29:95 و TAPPI T 414 om-04 اندازه‌گیری شدند و بر اساس کلیت نتایج مقاومتی در بین دو روش افزودن نانو الیاف به خمیرکاغذ، روش منتخب انتخاب گردید.

در مرحله بعد تأثیر عملکرد سیستم میکرو ذره دارای کایتوزان- بنتونیت بر ویژگی‌های نهایی کاغذ تهیه‌شده از افزودن نانو الیاف به روش منتخب بررسی گردید. در این راستا ابتدا کایتوزان در سطح ثابت ۱ درصد (بر اساس وزن خشک خمیرکاغذ) با دور همزن مکانیکی ۱۰۰۰rpm به مدت ۱ دقیقه به خمیرکاغذ دارای نانو الیاف افزوده شد و در ادامه میکرو ذره بنتونیت با دور همزن ۸۰۰rpm به مدت ۴۵ ثانیه به خمیرکاغذ مزبور افزوده شد.

در پایان کاغذهایی با گراماژ ۱۲۰ گرم بر مترمربع تهیه و ویژگی‌های مقاومت به کشش، مقاومت به خمش و

[1] Valley beater

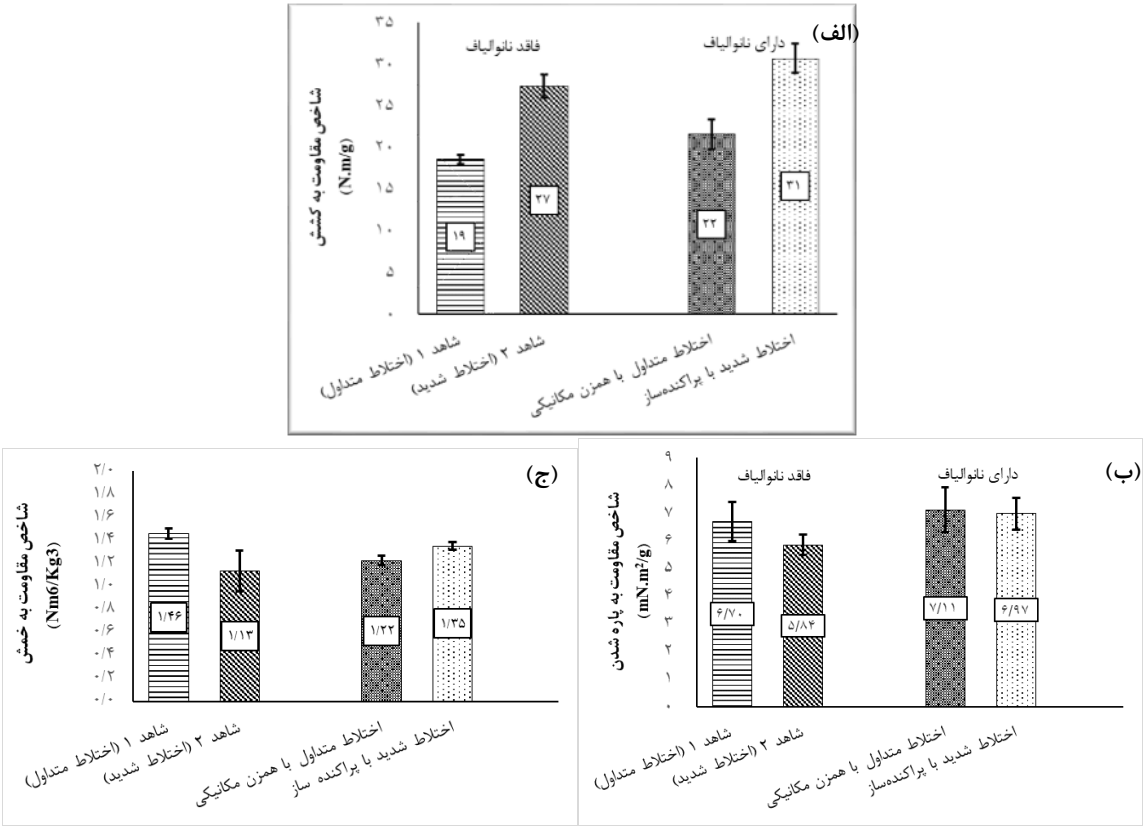
[2] Disintegrator

مقاومت به پاره شدن کاغذها به ترتیب طبق استاندارد T 494 om-01 TAPPI، SCAN-P 29:95 و T 414 TAPPI om-04 اندازه‌گیری شد. همچنین میزان آبگیری و درصد ماندگاری نرمه نیز به ترتیب مطابق استانداردهای TAPPI T 227 om-99 و TAPPI T 261 cm-00 انجام گرفتند [۲۳، ۲۴، ۲۵، ۲۶، ۲۷]. در این تحقیق از تعداد حداقل ۴ تکرار برای هر تیمار بهره گرفته‌شده است و انحراف از معیارها درشکه‌ها ارائه‌شده است.

نتایج و بحث

مقایسه دو روش اختلاط نانو الیاف

شکل ۱ نتایج حاصل از شاخص‌های مقاومت به کشش، مقاومت به خمش و مقاومت به پاره شدن، کاغذهای بازیافتی ۱۲۰ گرم بر مترمربع تهیه‌شده از الیاف بازیافتی OCC را نشان می‌دهد. شاخص مقاومت به کشش یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های کاغذ می‌باشد که به‌شدت تحت تأثیر وضعیت پیوندی ورقه الیاف است [۲، ۵، ۲۹]. شاخص مقاومت به کشش در نمونه کاغذهای شاهد ۱ (اختلاط متداول با همزن مکانیکی) برابر با ۱۸/۵۷ N.m/g و در شاهد ۲ (اختلاط شدید با پراکنده ساز) برابر با ۲۷/۳۶ N.m/g بوده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود حتی در خمیرکاغذهای شاهد نیز که بدون نانو الیاف هستند، ایجاد یک اختلاط شدید بین الیاف موجود در سوسپانسیون خمیرکاغذ بر کیفیت پیوند یابی مؤثر بوده است. به نظر می‌رسد پراکندگی بهتر ایجادشده در دستگاه پراکنده ساز و باز شدن ساختار خمیرکاغذ و جداسازی بهتر الیاف از هم با پیوندهای هیدروژنی بهتر بر مقاومت کششی کاغذ نهایی تأثیرگذار بوده است [۵]. همچنین بررسی نتایج مقاومت به کشش در مورد نمونه‌های حاوی نانو الیاف نیز روند مشابهی با نمونه‌های شاهد نشان می‌دهد. احتمال می‌رود افزایش شدت اختلاط به کمک دستگاه پراکنده ساز علاوه بر دلایل فوق، با کمک به اختلاط بهتر و یکنواخت‌تر نانو الیاف در خمیرکاغذ بر توسعه پیوندی در شبکه الیاف و بهبود هرچه بیشتر مقاومت به کشش تأثیرگذار است. در بررسی شاخص مقاومت به پاره شدن طول الیاف، مقاومت ذاتی تک‌تک الیاف و درنهایت تعداد اتصالات و پیوندهای بین اجزاء لیفی از عوامل تأثیرگذار بر ویژگی کاغذ نهایی می‌باشند؛ که در این میان طول الیاف از اهمیت بیشتری برخوردار است [۲، ۵، ۲۹]. نتایج این ویژگی در نمونه‌های شاهد ۱، شاهد ۲، اختلاط نانو الیاف با همزن و اختلاط نانو الیاف با پراکنده‌ساز به ترتیب اعداد ۶/۷۰، ۵/۸۴، ۷/۱۱ و ۶/۹۷ $mN.m^2/g$ می‌باشد که با مقایسه نتایج می‌توان پی برد که این شاخص مقاومتی تغییر چندانی نکرده است. همان‌طور که اشاره شد مقاومت به پاره شدن در وهله اول وابسته به طول الیاف می‌باشد که به نظر می‌رسد در تیمارهای اعمال‌شده به‌ویژه در داخل دستگاه پراکنده ساز هیچ‌گونه کوتاه شدن الیاف رخ نداده است. همچنین نتایج شاخص مقاومت به خمش در تیمارهای شاهد ۱، شاهد ۲، اختلاط نانو الیاف با همزن و اختلاط نانو الیاف با پراکنده ساز به ترتیب اعداد ۱/۴۶، ۱/۱۳، ۱/۲۲ و ۱/۳۵ $mN.m^2/g$ می‌باشد که تفاوت چندانی را نشان نمی‌دهد. با توجه به نتایج کلی مقاومت‌های موردبررسی به‌ویژه شاخص مقاومت به کشش، می‌توان نتیجه گرفت که روش اختلاط بر پراکنده شدن الیاف و نانو سلولز در سوسپانسیون بوده و روش اختلاط شدید با پراکنده ساز با بهبود این مسئله به‌احتمال‌زیاد توانسته باعث توسعه پیوندی و اتصالات بهتر در ورقه الیاف نهایی شود. لذا روش اختلاط شدید با پراکنده ساز برای ادامه آزمایش‌ها برگزیده شد.



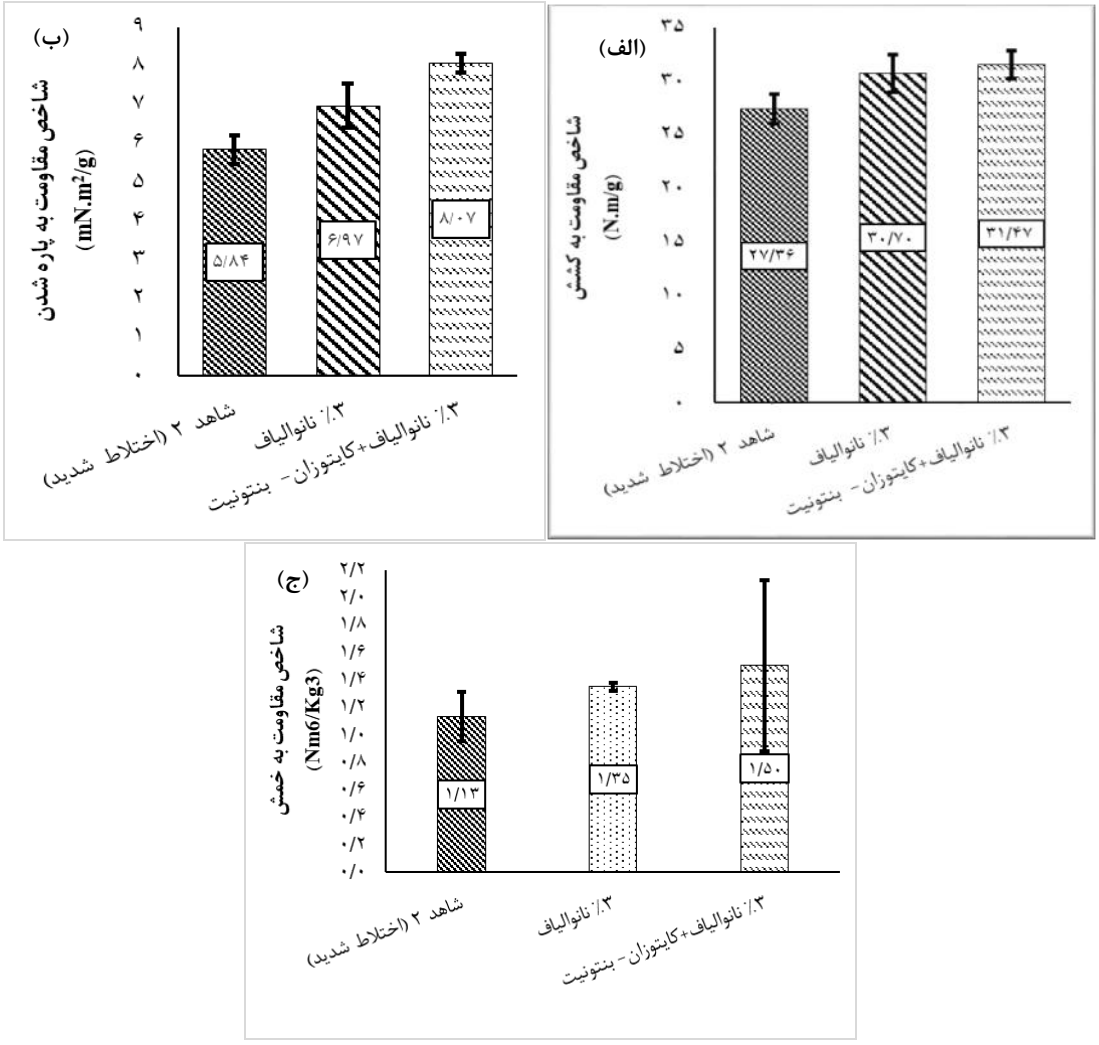
شکل ۱- تأثیر روش اختلاط با همزن متداول و پراکنده ساز بر شاخص‌های مقاومت به کشش در کاغذهای ساخته‌شده نهایی (الف) مقاومت به کشش، (ب) مقاومت به پاره شدن، (ج) مقاومت به خمش

بررسی تأثیر سیستم میکرو ذره کایتوزان بنتونیت

ویژگی‌های مقاومتی

پس از تعیین نحوه اختلاط نانو الیاف در مرحله قبل، در این بخش تأثیر سیستم میکرو ذره کایتوزان - بنتونیت در عملکرد نانو الیاف اختلاط یافته با خمیرکاغذ بازیافتی بررسی شد. در بخش اول به بررسی سه ویژگی مقاومت به کشش، پاره شدن و خمش پرداخته شد. شکل ۲ نشان-دهنده ویژگی‌های مقاومتی کاغذهای تهیه‌شده از روش منتخب در تیمارهای مختلف می‌باشد. همان‌طور که در قبل اشاره شد شاخص مقاومت به کشش کاغذها به‌شدت وابسته به وضعیت پیوند یابی بین الیاف است. شاخص مقاومت به کشش در نمونه کاغذهای شاهد ۲۷/۳۶ نیوتن متر بر گرم بوده است که در بین تمامی تیمارها، کمترین مقدار را به خود اختصاص می‌دهد. با افزودن نانو الیاف این شاخص حدود ۱۲ درصد افزایش یافت که این افزایش حاکی از تشکیل پیوندهای جدید توسط نانو سلولز (به دلیل سطح ویژه بالای نانو سلولز و امکان ایجاد پیوندها هیدروژنی بهتر و بیشتر) می‌باشد. مطالعات مختلفی در این زمینه انجام‌گرفته است که این نتایج را تأیید می‌کند [۱۲، ۱۵، ۱۶ و ۱۸]. افزودن سیستم میکرو ذره دارای کایتوزان- بنتونیت به خمیر حاوی نانو الیاف سلولزی، سبب افزایش مقاومت به کشش نسبت به نمونه شاهد در حدود ۹ درصد شده است. همچنین این تیمار شیمیایی در مقایسه با تیمار حاوی نانو الیاف، جز اندکی افزایش عددی، تفاوت قابل‌ملاحظه‌ای در شاخص مقاومت به کشش ایجاد نکرده است. ازآنجاکه افزودنی‌های کمک آبگیری و کمک - نگه‌دارنده، در بسیاری از مواقع با بر هم زدن وضعیت شکل‌گیری ممکن است باعث کاهش مقاومت‌های حساس به شکل‌گیری شوند، استفاده از آن‌ها با نگرانی‌هایی مواجه است؛ اما خوشبختانه سیستم کایتوزان- بنتونیت در حضور نانو الیاف به‌خوبی عمل کرده و این نگرانی را برطرف نموده است که با توجه به نتایج مثبت ویژگی‌های فرایندی که در ادامه ارائه می‌شود باعث امیدواری در استفاده از آن‌ها

همراه با نانو الیاف می‌شود. در بررسی ویژگی مقاومت به پاره شدن الیاف، همان‌طور که اشاره شد افزودن نانو الیاف به‌تنهایی تأثیری بر این ویژگی نداشت؛ اما افزودن سیستم کایتوزان- بنتونیت به سوسپانسیون خمیرکاغذ سبب گردید که این ویژگی از حدود ۵/۴۸ $mN.m^2/g$ و ۶/۹۷ $mN.m^2/g$ به ترتیب در تیمارهای شاهد و تیمار دارای نانوذره به حدود ۸/۰۷ $mN.m^2/g$ در تیمار حاوی سیستم میکرو ذره برسد. به نظر می‌رسد این افزایش در شاخص مقاومت به پاره شدن به دلیل بهبود پیوند یابی در ورقه الیاف باشد؛ چراکه بر اساس آنچه در قبل گفته شد؛ این مقاومت در درجه اول وابسته به طول الیاف و مقاومت ذاتی الیاف می‌باشد که این دو فاکتور با تیمارهای انجام‌شده تغییری نمی‌کنند. پس به نظر می‌رسد که تقویت عامل پیونددهی با تیمار اعمال‌شده در این تغییر مشاهد شده مؤثر باشد [۲۹، ۳۰]. همچنین نتایج حاصل از مقاومت به خمش کاغذها نشان می‌دهد که تفاوت عددی چندانی بین تیمارها مشاهده نمی‌شود.

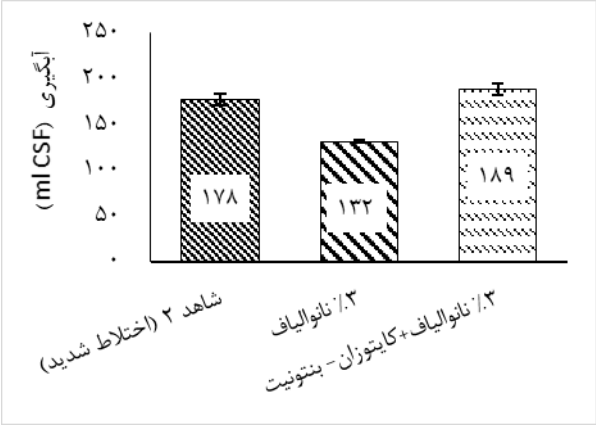


شکل ۲- تأثیر عملکرد سیستم میکرو ذره بر ویژگی‌های مقاومتی درروش اختلاط شدید
(الف) مقاومت به کشش، (ب) مقاومت به پاره شدن، (ج) مقاومت به خمش

ویژگی‌های فرایندی

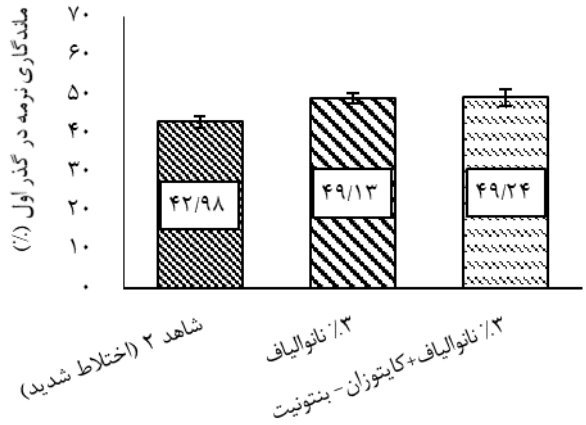
آبگیری از خمیرکاغذ یکی از ویژگی‌های مهم فرایندی در کاغذسازی می‌باشد که نقش مستقیمی بر قابلیت گذر ورقه کاغذ، سرعت ماشین کاغذ و هزینه‌های تولید دارد [۲]. شکل ۳ نشان می‌دهد که افزوده شدن نانو الیاف لیگنوسلولزی به سوسپانسیون خمیرکاغذ، باعث کاهش شدید آبگیری از خمیرکاغذ در حدود ۳۵ درصد نسبت به تیمار شاهد شده است که این نتیجه با نتایج سایر

محققین همخوانی دارد [۹، ۱۸، ۲۰، ۲۹، ۳۰]. به نظر می‌رسد کاربرد نانو الیاف سلولزی در بخش تر کاغذسازی، از طریق بستن منافذ و کاهش نفوذپذیری، سبب افت ویژگی آبگیری از خمیرکاغذ نهایی می‌شود [۹، ۲۸]. اما در مقابل انجام تیمار دارای سیستم میکرو ذره کایتوزان- بنتونیت باعث بهبود و افزایش آبگیری حتی بیشتر از تیمار شاهد شده است که نشان از قابلیت این سیستم در اصلاح مشکل کاهش آبگیری توسط نانو الیاف دارد. به نظر می‌رسد سیستم مزبور این توانایی را دارد که با تشکیل فلاک‌های ریز پایدار و ایجاد پراکنش مناسب در الیاف با برهم‌کنش جزء کاتیونی (کایتوزان) و جزء آنیونی (بنتونیت) علاوه بر بهبود آبگیری، چندان شکل‌گیری نهایی در کاغذ و درنتیجه ویژگی‌های مقاومتی مانند مقاومت به پاره شدن و خمش را تحت تأثیر قرار ندهد و حتی بعضی از آن‌ها مانند مقاومت به کشش را ارتقاء دهد [۲، ۲۹، ۳۰].



شکل ۳- تأثیر عملکرد سیستم میکرو ذره بر آبگیری درروش اختلاط شدید

همچنین، یکی دیگر از مباحث مهم در صنعت کاغذسازی، میزان ماندگاری نرمه‌های موجود در خمیرکاغذ بازیافتی می‌باشد. این ویژگی علاوه بر تأثیرگذاری مستقیم بر وضعیت آب در گردش کارخانه و پساب، می‌تواند بر فاکتورهایی مانند میزان تولید کارخانه و ویژگی‌های مختلف کاغذ تأثیرگذار باشد [۹، ۳۰]. همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، خمیرکاغذ دارای نانو الیاف در مقایسه با خمیرکاغذ شاهد ماندگاری بیشتری از خود نشان داده است و درواقع افزودن نانو الیاف باعث ارتقاء حدود ۱۴ درصدی این ویژگی شده است که در تطابق با یافته‌های پیشین می‌باشد [۲۸]. به نظر می‌رسد افزودن نانو سلولز می‌تواند باعث بسته شدن منافذ ورقه الیاف روی توری و جلوگیری از خروج نرمه‌ها در داخل ورقه کاغذ گردد. همچنین امکان بسته شدن سریع منافذ توری نیز وجود دارد. کاهش سرعت خروج آب از سوسپانسیون خمیرکاغذ ریخته شده درون دستگاه کاغذ دست‌ساز و همچنین کاهش آبگیری از تبعات این مسئله است. همچنین تأثیر تیمار میکرو ذره در حضور نانو الیاف، هرچند نسبت به تیمار شاهد افزایش ماندگاری را نشان می‌دهد؛ اما میزان تغییرات ماندگاری نرمه نسبت به تیماری که فقط دارای نانو الیاف است چندان قابل‌توجه نمی‌باشد. نکته مثبت در این تیمار حفظ ماندگاری نرمه در عین حل مشکل آبگیری از ورقه الیاف است. همان‌طور که ذکر شد، به نظر می‌رسد استفاده از سیستم میکرو ذرات سبب ایجاد فلاک‌های ریز و باثباتی می‌باشد که به دنبال آن باعث حفظ نرمه‌ها و ذرات ریز می‌گردد و در همان حال آبگیری را هم ارتقاء داده است.



شکل ۴: تأثیر عملکرد سیستم میکرو ذره بر ماندگاری نرمه درروش اختلاط شدید

نتیجه‌گیری

با توجه به آنچه بیان شد، شدت اختلاط نانو الیاف با سوسپانسیون خمیرکاغذ فاکتور بسیار مهمی است که در تحقیقات آینده و مصارف صنعتی باید مدنظر قرار گیرد. درواقع نانو الیاف لیگنوسلولزی به علت ساختار خاص خود و دارا بودن سطح ویژه و ضریب لاغری زیاد، تمایل به تجمع و ایجاد فلاک‌های نامناسب در ورقه کاغذ تولیدی دارند که این مسئله باعث ضعف شکل‌گیری و درنتیجه تضعیف مقاومت کاغذ نهایی می‌شود. اما افزایش شدت اختلاط باعث پراکنش بهتر نانو الیاف در سوسپانسیون خمیرکاغذ، شکل‌گیری یکنواخت‌تر و بهبود هرچه بیشتر ویژگی‌های مقاومتی به‌ویژه مقاومت به کشش می‌شود. همچنین نتایج استفاده از کایتوزان- بنتونیت نشان داد که این سیستم میکرو ذره عملکرد موفقی در حضور نانو الیاف در خمیرکاغذ بازیافتی داشته است. این سیستم میکرو ذره در عین تأثیر مثبت بر ویژگی‌های فرایندی به‌ویژه آبگیری، توانسته ویژگی‌های مقاومتی را حفظ یا حتی ارتقاء بخشد.

سپاسگزاری

بدین‌وسیله از صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور بابت حمایت مالی از این تحقیق در قالب طرح پژوهشی به شماره ۹۹۰۳۲۲۴۸ تشکر و قدردانی می‌شود.

منابع

[1] Abdollahbeigi, M., 2021. An Overview of the Paper Recycling Process in Iran. *Journal of Chemical Reviews*, 3(1), 1-19.

[2] Amiri, E., Rahmaninia, M., and Khosravani, A., 2019. Effect of Chitosan Molecular Weight on the Performance of Chitosan-silica Nanoparticle System in Recycled Pulp. *BioResources*, 14(4), 7687-7701.

[3] Viana, L. C., Potulski, D. C., Muniz, G. I. B. D., Andrade, A. S. D., and Silva, E. L. D., 2018. Nanofibrillated cellulose as an additive for recycled paper. *Cerne*, 24(2), 140-148.

[4] Hamzeh, Y., Sabbaghi, S., Ashori, A., Abdulkhani, A., and Soltani, F., 2013. Improving wet and dry strength properties of recycled old corrugated carton (OCC) pulp using various polymers. *Carbohydrate polymers*, 94(1), 577-583.

[5] Rahmaninia, M. and Khosravani, A. M. I. R., 2015. Improving the paper recycling process of old corrugated container wastes. *Cellulose Chemistry and Technology*, 49(2), 203-208.

[6] Howard, R. C., and Bichard, W., 1992. The basic effects of recycling on pulp properties. *MRS Online Proceedings Library* (OPL), 266.

[7] Rahman, M. O., Hussain, A., and Basri, H., 2014. A critical review on waste paper sorting techniques. *International journal of environmental science and technology*, 11(2), 551-564.

[8] Delgado-Aguilar, M., González, I., Pèlach, M. A., De La Fuente, E., Negro, C., and Mutjé, P., 2015. Improvement of deinked old newspaper/old magazine pulp suspensions by means of nanofibrillated cellulose addition. *Cellulose*, 22(1), 789-802.

[9] Rantanen, J., and Maloney, T. C., 2013. Press dewatering and nip rewetting of paper containing nano-and microfibril cellulose. *Nordic Pulp & Paper Research Journal*, 28(4), 582-587.

[10] Ghasemian, A., Ghaffari, M., and Ashori, A., 2012. Strength-enhancing effect of cationic starch on mixed recycled and virgin pulps. *Carbohydrate Polymers*, 87(2), 1269-1274.

[11] Osong, S. H., Norgren, S., and Engstrand, P., 2016. Processing of wood-based microfibrillated cellulose and nanofibrillated cellulose, and applications relating to papermaking: a review. *Cellulose*, 23(1), 93-123.

[12] 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(5), 1005-1020.

[13] Bossu, J., Eckhart, R., Czibula, C., Winter, A., Zankel, A., Gindl-Altmutter, W., and Bauer, W., 2019. Fine cellulosic materials produced from chemical pulp: the combined effect of morphology and rate of addition on paper properties. *Nanomaterials*, 9(3), 321.

[14] Yousefhashemi, S. M., Khosravani, A., and Yousefi, H., 2019. Isolation of lignocellulose nanofiber from recycled old corrugated container and its interaction with cationic starch–nanosilica combination to make paperboard. *Cellulose*, 26(12), 7207-7221.

[15] Campano, C., Merayo, N., Balea, A., Tarrés, Q., Delgado-Aguilar, M., Mutjé, P., and Blanco, Á., 2018. Mechanical and chemical dispersion of nano cellulose to improve their reinforcing effect on recycled paper. *Cellulose*, 25(1), 269-280.

[16] Tajik, M., Torshizi, H. J., Resalati, H., and Hamzeh, Y., 2018. Effects of cationic starch in the presence of cellulose nanofibrils on structural, optical, and strength properties of paper from soda bagasse pulp. *Carbohydrate polymers*, 194, 1-8.

[17] He, M., Yang, G., Cho, B. U., Lee, Y. K., and Won, J. M., 2017. Effects of addition method and fibrillation degree of cellulose nanofibrils on furnish drainability and paper properties. *Cellulose*, 24(12), 5657-5669.

[18] Balea, A., Merayo, N., Seara, M., Fuente, E., Blanco, A., and Negro, C., 2016. Effect of NFC from organosolv corn stalk pulp on retention and drainage during papermaking. *Cellulose Chemistry and Technology*, 50, 377-383.

[19] Merayo, N., Balea, A., de la Fuente, E., Blanco, Á., and Negro, C., 2017. Synergies between cellulose nanofibers and retention additives to improve recycled paper properties and the drainage process. *Cellulose*, 24(7), 2987-3000.

[20] 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, 311-318.

[21] Taheri, A. A., Rahmaninia, M., and Khosravani, A., 2022. Interaction of the electrical conductivity of recycled pulp colloidal suspension with chitosan and bentonite as a papermaking additive system. *BioResources*, 17(1), 1805-1817.

[22] TAPPI T 200 sp-01., 2007. Laboratory beating of pulp (Valley beater method).

[23] TAPPI T 494 om-01., 2007. Tensile properties of paper and paperboard (using constant rate of elongation apparatus).

[24] SCAN-P 29:95., 1995. Bending resistance.

[25] TAPPI T 414 om-04., 2007. Internal tearing resistance of paper.

[26] TAPPI T 227 om-04., 2007. Freeness of pulp (Canadian standard method).

[27] TAPPI T 261 cm-00., 2007. Fine fraction by weight of paper stock by wet screening.

[28] Hollertz, R., Durán, V. L., Larsson, P. A. and Wågberg, L., 2017. Chemically modified cellulose micro-and nanofibrils as paper-strength additives. *Cellulose*, 24(9), 3883-3899.

[29] Rahmaninia, M., Rohi, M., Hubbe, M. A., Zabihzadeh, S. M. and Ramezani, O., 2018. The performance of chitosan with bentonite microparticles as wet-end additive system for paper reinforcement. Carbohydrate polymers, 179, 328-332.

[30] Sabazoodkhiz, R., Rahmaninia, M., and Ramezani, O., 2017. Interaction of chitosan biopolymer with silica nanoparticles as a novel retention/drainage and reinforcement aid in recycled cellulosic fibers. Cellulose, 24(8), 3433-3444.

The Influence of Mixing Method of lignocellulosic Nanofibers with Recycled Pulp in the Presence of Microparticle System on the Final Paper Propertie

Abstract

Paper recycling is one of the valuable conventional processes in the worlds. But in this process, some of recycled paper faces reduction in some of mechanical properties. Using different additives such as lignocellulosic nanofibers (LCNF) is one of the main solutions for improving these mechanical properties. In contrast with some other additives, the special physical and chemical structure of LCNF seems to be effective in its distribution in pulp suspension and also its performance. For this purpose, in this study, two mixing methods, conventional mixing (with mechanical stirrer) and intense mixing (with disintegrator) were considered. The results showed that increasing the mixing intensity of this mixture caused better dispersion of LCNF and the tensile index increased from 21 N.m/g in conventional mixing to 30 N.m/g in intensive mixing. Also, as application of LCNF in pulp suspension would decrease the pulp drainage, so after determination of proper mixing method, the effect of using bentonite-chitosan microparticle system on the drainage of pulp containing LCNF was considered. The results showed that the mentioned system, in addition to maintaining or improving the mechanical properties, caused a suitable increment in drainage from about 132 ml CSF in the pulp containing only LCNF to 189 ml CSF in the pulp containing LCNF and microparticle system.

Keywords: Lignocellulosic Nanofiber, Mixing method, Chitosan, Microparticles, Mechanical properties.

H. Sayadi Milani[1]
M. Rahmaninia[2*]

[1] M. Sc, Tarbiat Modares University, Faculty of Natural Resources, Wood and Paper Science and Technology Department, Iran

[2] Associate Professor, Tarbiat Modares University, Faculty of Natural Resources, Wood and Paper Science and Technology Department, Iran

Corresponding author:
rahmaninia@modares.ac.ir

Received: 2022/05/10
Accepted: 2022/06/18