

اثر نانوالیاف سلولز بر کارایی نشاسته کاتیونی در خمیرکاغذ و کاغذ بازیافتی از کاغذهای باطله بسته‌بندی

چکیده

کاربرد افزودنی‌های شیمیایی نگرشی کارآمد در بهبود ویژگی‌های فرایندی و فراورده‌ای کاغذهای بازیافتی بوده که معرفی مواد جدید همیشه مورد چالش و پرسمان است. نانوالیاف سلولزی، به‌عنوان نانوزیست ماده‌ای با خاستگاه الیاف گیاهی اخیراً مورد اقبال کاربردهایی متنوع نظیر کاغذسازی بوده که لزوم ارزیابی عملکرد آن با توجه به تفاوت شرایط دوغاب‌های خمیرکاغذ را گوشزد می‌کند. با این هدف، تأثیر نانوالیاف سلولز (۰/۱، ۰/۱۵ و ۰/۲ درصد خمیرکاغذ خشک) بر عملکرد شناخته‌شده نشاسته کاتیونی (۰/۵، ۰/۷۵ و ۱ درصد خمیرکاغذ خشک)، به‌عنوان پرکاربردترین پلیمر مصرفی در خمیرکاغذ بازیافتی از کاغذهای باطله قهوه‌ای بسته‌بندی موردپژوهش قرارگرفت. نتایج نشان‌داد، افزودن نانوالیاف سلولز پس از نشاسته کاتیونی نه‌تنها منجر به بهبود ماندگاری نشد، بلکه توانائی نشاسته در بهبود ماندگاری را نیز پیوسته و متناسب با افزایش کاربرد، کاهش داده است. نتایج آبیگری دینامیکی نیز در تأیید ماندگاری بوده و کمترین اتلاف مواد در کمترین میزان کاربرد نانوالیاف سلولز بروز یافت. کاربرد منفرد نانو الیاف سلولز درجه روانی را کاهش و افزودن آن پس از نشاسته نیز بهبود چشمگیر آن را به همراه نداشته و غالباً آن را تنزل داد. افزودن نانوالیاف سلولز به دوغاب حاوی نشاسته هیچ‌گونه بهبود قابل‌توجهی در مقاومت‌های کششی و ترکیدن کاغذ بازیافتی نداشته و مقاومت به پارگی را نیز کاهش داد. به‌طورکلی، برخلاف سامانه‌های متداول ماندگاری - آبیگری پلیمر کاتیونی/نانوذرات، کاربرد نشاسته کاتیونی - نانوالیاف سلولزی از تأثیرگذاری مثبتی بر ویژگی‌های خمیرکاغذ و کاغذ حاصل از بازیافت کاغذهای قهوه‌ای بسته‌بندی برخوردار نبوده است.

واژگان کلیدی: نانوالیاف سلولزی، نشاسته کاتیونی، خمیرکاغذ و کاغذ بازیافتی.

حسین پورکریم دودانگه^۱
حسین جلالی ترشیزی^{۲*}

^۱ دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، مهندسی فناوری سلولز و کاغذ، دانشگاه شهید بهشتی، زیرآب، ایران

^۲ استادیار گروه مهندسی فناوری سلولز و کاغذ، دانشگاه شهید بهشتی، زیرآب، ایران

مسئول مکاتبات:

H.Jalali@sbu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۲/۳۱

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۸/۳۰

مقدمه

بازیافت کاغذهای باطله بسته‌بندی، رایج‌ترین صنعت بازیافت فراورده‌های سلولزی به‌ویژه در ایران بوده و کاهش حجم ضایعات شهری، ارائه مزایای اقتصادی و اجتماعی چشمگیر، کاهش نیاز به الیاف بکر و درنتیجه بهره‌برداری

کمتر از جنگل‌ها را موجب می‌شود [۱]. استفاده از پالایش شدید، روشی برای جبران افت مقاومتی کاغذ بازیافتی برای کاربرد دوباره بسته‌بندی، از دیرباز موردتوجه بوده که علاوه بر آسیب شدید و کاهش چرخه مصرف الیاف، آبیگری و دیگر ویژگی‌های فرایندی تولید را با چالش

ویژگی‌ها را بسته به مکانیسم اعمالی به همراه داشته است [۱۱]. در این پژوهش و با عنایت به برتری بلامنازع کاربرد صنعتی نشاسته کاتیونی در پایانه تر کاغذسازی، سامانه ماندگاری- آبگیری نانوالیاف سلولز در تلفیق با این بیوپلیمر کاتیونی بررسی شد تا عملکرد این نانوماده آلی نوین ارزیابی و مشخص گردد.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش از الیاف خمیر کاغذ OCC حاصل از بازیافت کاغذهای باطله بسته‌بندی، عاری از افزودنی و واجد درجه روانی (CSF) (mL) ۳۲۰-۳۵۰، $\text{pH} \sim 8$ ، دمای 16°C و تهیه‌شده از جعبه تغذیه ماشین کاغذ برای ساخت کاغذهای آزمایشگاهی استفاده گردید. نانوسلولز نوع لیفی (NFC) و واجد خشکی $3/5\%$ ، میانگین قطر الیاف ۳۵ نانومتر، خلوص $\leq 99\%$ و پتانسیل زتای منفی ۲۰-۱۵، تولیدی به‌روش مکانیکی از الیاف رنگبری‌شده کرافت سوزنی‌برگ و به‌صورت ژل سفیدرنگ از شرکت دانش‌بنیان نانونوین پلیمر خریداری و پس از رقیق‌سازی به خشکی $0/1\%$ ، در سطوح صفر (شاهد)، $0/1$ ، $0/15$ و $0/2$ درصد بر اساس جرم خشک خمیر کاغذ به‌صورت منفرد و نیز به همراه بیوپلیمر نشاسته کاتیونی مورد استفاده قرار گرفت. نشاسته کاتیونی به‌صورت پودری و با $\text{pH}=5-7$ ، درجه استخلاف $0/35$ ، رطوبت 12% ، خاکستر 2% و ویسکوزیته $100-60$ cPs از موجودی شرکت چوب و کاغذ مازندران تهیه و با توجه به نامحلول بودن در آب سرد، به‌منظور انحلال به‌صورت روزانه پخته و در سطوح صفر (شاهد)، $0/5$ ، $0/75$ و 1 درصد بر اساس جرم خشک خمیر کاغذ به‌صورت منفرد و نیز به همراه نانو-الیاف سلولز استفاده گردید. نشاسته کاتیونی فراوری‌شده به خمیر کاغذ در حال تلاطم (۵۰۰-۳۰۰ دور بر دقیقه) افزوده و پس از ۱۰-۵ ثانیه، شدت چرخش به ۱۰۰۰-۸۰۰ افزایش و پس از کاهش به حدود ۵۰۰ دور بر دقیقه، نانوالیاف سلولز اضافه گردید. بلافاصله دوغاب مزبور به کاغذساز آزمایشگاهی منتقل و مبتنی بر استاندارد $\text{sp}-02$ TAPPI T۲۰۵ کاغذ تهیه شد. اندازه‌گیری ویژگی‌ها

مواجه می‌سازد [۳-۱]. استفاده از مواد شیمیایی، مناسب-ترین راهکار برای بهبود پیوندیابی الیاف و بازیابی ویژگی‌ها بوده و مواد تجاری متعددی نظیر نشاسته‌ها (سومین ماده اولیه مهم کاغذسازی) و پلی آکریلامید به‌طور گسترده‌ای استفاده می‌شوند [۴، ۵]. استفاده از نانومواد در تلفیق با مواد کاتیونی مزبور در مفهوم مکانیسم مرکب ماندگاری-آبگیری؛ از عملکرد مناسبی برخوردار گشته و ویژگی‌های مقاومتی، شکل‌گیری، قابلیت آبگیری و میزان ماندگاری را بهبود و بهره‌وری تولید را ارتقا می‌بخشد؛ تاجائیکه صنایع کاغذسازی را در زمره پرمصرف‌ترین نانومواد قرار داده است [۴-۷]. استفاده از نانومواد به‌ویژه نانوالیاف سلولز از رویکردهای جدید پژوهشی و نیز ادعایی برای بهبود ویژگی‌های کاغذ بوده [۸] که البته در مقیاس تجاری با چالش‌های روشنی همچون هزینه بالا، قابلیت پراکندگی و ماندگاری پایین، برهمکنش‌های نامطلوب احتمالی، دانش ناکافی در رابطه با استفاده مؤثر از آن و ... نیز مواجه است [۹]. افزودن نانوالیاف سلولز (NFC) به خمیر کاغذهای رنگبری‌شده اکالیپتوس برای تولید کاغذ چاپ و تحریر، حکایت از امکان کاهش پلایش بدون تأثیر منفی بر ویژگی‌های مکانیکی کاغذ را داشته و بهترین نتایج در خمیر کاغذهای اندکی پلایش‌شده حاصل گردیده است [۶]. در پژوهشی دیگر کاربرد نانوالیاف سلولز (۱ و ۲٪) نشاسته کاتیونی (۱٪) در تلفیقی از خمیر کاغذهای سوزنی‌برگ و پهن‌برگ، افزایش چشمگیر مقاومت کشش، کاهش ناچیز ضریب پخش نور، نفوذپذیری هوا، نرخ آبگیری و عدم‌تغییر ماندگاری را به همراه داشت [۶]. مقایسه عملکرد بیوپلیمرهای نشاسته، کایتوزان و کربوکسی متیل سلولز (CMC) در ایجاد مقاومت در شبکه لیفی خمیر کاغذ رنگبری‌شده، برتری کایتوزان در تمامی دامنه‌های خشکی، نشاسته کاتیونی در خشکی بالاتر از 80% و CMC نیز در خشکی بالاتر از 55% ورقه کاغذ را نشان‌داد [۸]. مقایسه نانوالیاف سلولز با نانوذرات گچ نشان‌دهنده برتری نانوالیاف سلولز در خمیر کاغذ مکانیکی بوده و به‌واسطه آب‌دوستی بیشتر نسبت به گچ، بهبود مقاومت‌ها و کاهش تخلخل را سبب گردیده است [۱۰]. مقایسه عملکرد نانوالیاف سلولزی در خمیر کاغذ بازیافتی روزنامه و مجله چاپ‌نشده، کاهش زمان آبگیری و بهبود

1 - Canadian Standard Freeness

2 - Nano Fibrillated Cellulose

نرمه‌ها، مانند پلی موجب اتصال و در کنار هم ماندن اجزا و تشکیل دلمه‌هایی بزرگ‌تر از اجزای منفرد و حفظ در ساختار شبکه الیاف در حال آبدیاری شده و افزایش ماندگاری را سبب می‌گردد. کاربرد منفرد نانوالیاف سلولز تا سطح ۰/۱ درصد نیز افزایش ماندگاری، البته بسیار کمتر از نشاسته کاتیونی را دربر داشته که با در نظر گرفتن تفاوت در مقادیر اعمالی آن‌ها، قابل انتظار است. نانوالیاف سلولز با قرارگیری در فضای بین الیاف، افزایش پیوندپذیری هیدروژنی و نیز تراکم و ماندگاری الیاف و نرمه‌ها را به وجود می‌آورد [۱۲]. در تیمارهای تلفیقی نشاسته/نانوالیاف سلولز، نه تنها نانوالیاف بر ماندگاری اثر مشخص و بارزی نداشته است، بلکه کاهش ماندگاری نسبت به تیمارهای متناظر منفرد نشاسته را نیز موجب شد. نکته جالب توجه، کاهش هرچه بیشتر کارایی نگهدارندگی نشاسته، با افزایش کاربرد نانوالیاف سلولز است. کاهش مزبور در به دام انداختن و نگهداشتن اجزای قابل عبور از منافذ توری ماشین کاغذساز آزمایشگاهی و تشدید آن با افزایش کاربرد نانوالیاف سلولز، احتمالاً ناشی از تشکیل کمپلکس نشاسته/نانوالیاف باشد که خنثی‌کننده بارهای یکدیگر بوده و کارایی مورد انتظار را به شدت کاهش می‌دهد. همچنین سطح ویژه و بار آنیونی بالای نانوالیاف و در پی آن افزایش بار آنیونی سوسپانسیون و دافعه ناشی از آن بین اجزا، کاهش ماندگاری به واسطه افزایش کاربرد نانوالیاف، قابل تفسیر است.

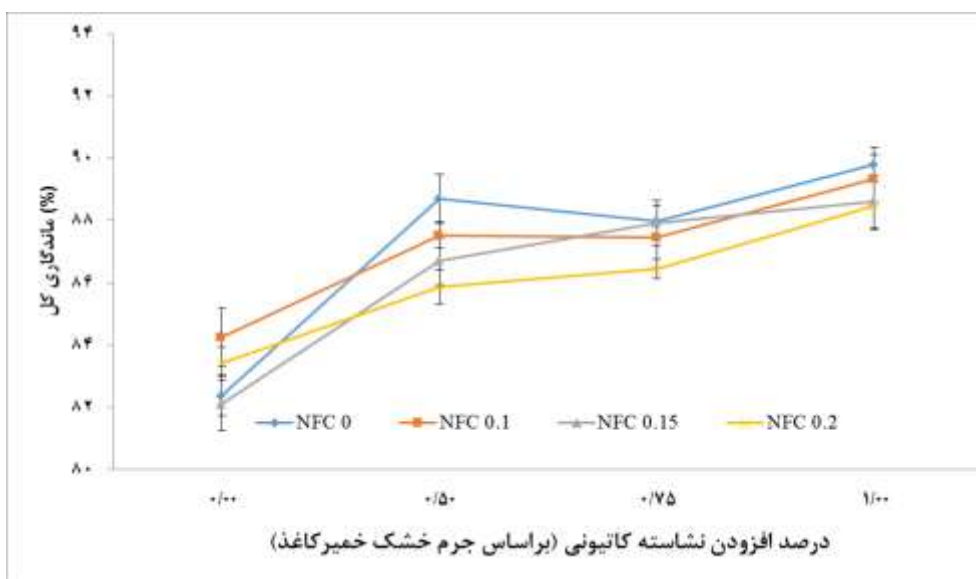
مشمتمل بر درجه روانی CSF (۰۴ - ۲۲۷ om)، شاخص کشش (۰۱ - ۴۹۴ om)، شاخص ترکیدن (۰۲ - om)، شاخص پاره شدن (۰۴ - ۴۱۴ om)، گراماژ (۰۲ - ۴۱۰ om) و ضخامت کاغذ (۰۵ - ۴۱۱ om) همگی منطبق بر استانداردهای آئین‌نامه TAPPI انجام گرفت. ماندگاری در دستگاه DDJ بر اساس استاندارد ۰۰ - cm ۲۶۱، صورت گرفته با این تفاوت که جرم مواد عبور یافته از توری دستگاه مزبور نسبت به جرم کل مواد، به عنوان درصد اتلاف مواد گزارش گردید. دانسیته از تقسیم گراماژ بر ضخامت کاغذ و ماندگاری کل در کاغذساز آزمایشگاهی از نسبت جرم خشک کاغذ تولیدی به جرم خشک کل مواد به کاررفته در تولید آن (مواد لیفی و افزودنی) محاسبه گردید.

نتایج و بحث

در شکل‌های ۱-۷، تأثیر کاربرد منفرد و توام نشاسته کاتیونی و نانوالیاف سلولز بر ویژگی‌های خمیر کاغذ و کاغذ بازیافتی از کاغذهای باطله بسته بندی (OCC) ارائه و تیمار شاهد در سطح صفر نشاسته کاتیونی و خط روند صفر NFC نمایان است.

ماندگاری کل خمیر کاغذ

ماندگاری کل، معیاری از جرم مواد کاغذ مشتمل بر الیاف، نرمه‌ها و مواد افزودنی نسبت به جرم مواد اولیه به کاررفته در تهیه کاغذ است که تداعی‌ساز بهره‌وری و نرخ تبدیل فرایند تولید است [۵، ۹]. ماندگاری کل خمیر کاغذ بر توری کاغذساز آزمایشگاهی، با افزایش کاربرد منفرد نشاسته کاتیونی بهبود چشمگیری یافته و بیشترین جهش در ماندگاری، با کاربرد اولین سطح نشاسته (۰/۵٪) نسبت به عدم کاربرد آن بروز کرده و حدود ۷٪ بهبود ماندگاری و بهره‌وری تولید را سبب گردید (شکل ۱). نشاسته کاتیونی به دلیل جاذبه الکترواستاتیکی، بر سطوح آنیونی الیاف جذب و ضمن برقراری پیوند هیدروژنی و الکترواستاتیک با گروه‌های آنیونی الیاف و



شکل ۱- تأثیر استفاده از نانوالیاف سلولزی بر عملکرد نشاسته کاتیونی در ماندگاری کل خمیر کاغذ OCC

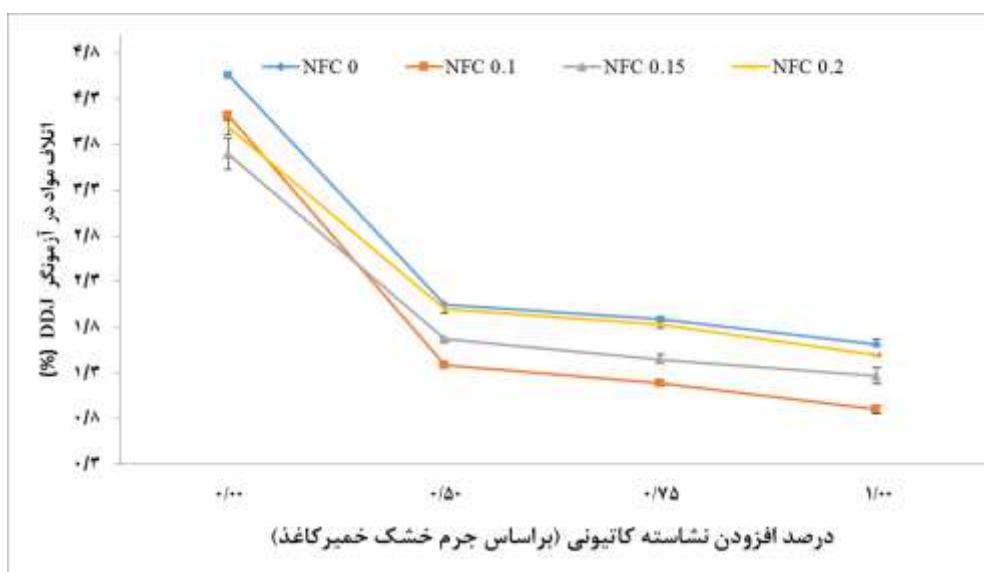
درجه روانی خمیر کاغذ

علاوه بر کیفیت سطح الیاف از منظر پذیرش و نگهداشت آب، آگیری در ماشین کاغذ به میزان زیادی تحت تأثیر شدت و ساختار دلمه‌های شکل‌یافته بین اجزای سوسپانسیون و نیز سیستم ماندگاری است [۱۳]. بهبود توان آگیری خمیر کاغذ، مزایای بسیاری برای صنعت کاغذسازی داشته که می‌توان به امکان افزایش سرعت ماشین، افزایش تولید، کاهش مصرف انرژی در جعبه‌های مکشی، پرس‌ها و خشک‌کن‌ها و به‌طور کلی کاهش هزینه‌های تولید و افزایش بهره‌وری اشاره نمود. کیفیت آگیری از خمیر کاغذ حاوی بیوپلیمرهای مورد مطالعه در شکل ۳ آمده که جهت ارائه بهینه و واضح نتایج و با توجه به دامنه گسترده تأثیرات ایجاد شده، به تیمارهای شاهد و حاوی نانوالیاف منفرد در شکل مزبور پرداخته نشد. کاربرد منفرد نشاسته کاتیونی افزایش درجه روانی خمیر کاغذ نمونه شاهد (۳۵۰ میلی‌لیتر) تا بیش از ۴۰٪ در بالاترین سطح کاربرد آن (۱٪) (۴۹۵ میلی‌لیتر) را سبب گردیده که پدیده‌ای تأیید شده توسط نتایج پژوهش‌های دیگر است [۱۳].

درصد اتلاف مواد در آزمونگر DDJ

با توجه به بغرنجی تعیین درصد مواد عبور یافته از توری کاغذساز آزمایشگاهی برای تحکیم استدلال‌های نتایج ماندگاری، از شبیه‌سازی فرایند در دستگاه آگیری دینامیکی (DDJ) استفاده شد. کاربرد منفرد نشاسته به‌طور چشمگیر و بارزی، میزان اتلاف مواد را کاهش داده (شکل ۲) که در سازگاری کامل و قابل‌تعمیم با استدلال‌های نتایج ماندگاری است. کاربرد منفرد نانوالیاف نیز از درصد اتلاف مواد کاسته و کاربرد آن پس از نشاسته در غالب موارد روند مشابه ماندگاری کاغذساز آزمایشگاهی را رقم‌زده که به‌صورت کاهش اتلاف مواد قابل‌گزارش است. نکته جالب توجه، برتری سطح ۰/۱٪ نانوالیاف در مقایسه با کاربردهای بالاتر آن و در غالب مقادیر نشاسته است که همانند مقیاس بزرگ‌تر (کاغذساز) (شکل ۱)، منجر به حفظ بیشتر مواد در شبکه لیفی، عبور و اتلاف کمتر از منافذ توری دستگاه است. این تغییرات همانند و مؤید نتایج ماندگاری بوده و کاهش کارایی نشاسته در سطوح بالای کاربرد نانوالیاف سلولزی را نشان می‌دهد. به عبارتی با افزایش مصرف نانوالیاف سلولزی، اتلاف مواد بیشتر شده که ناشی از عدم تعادل بار الکترواستاتیکی دوغاب و بروز پدیده‌های محتمل در پیش گفته شده است.

¹- Floc



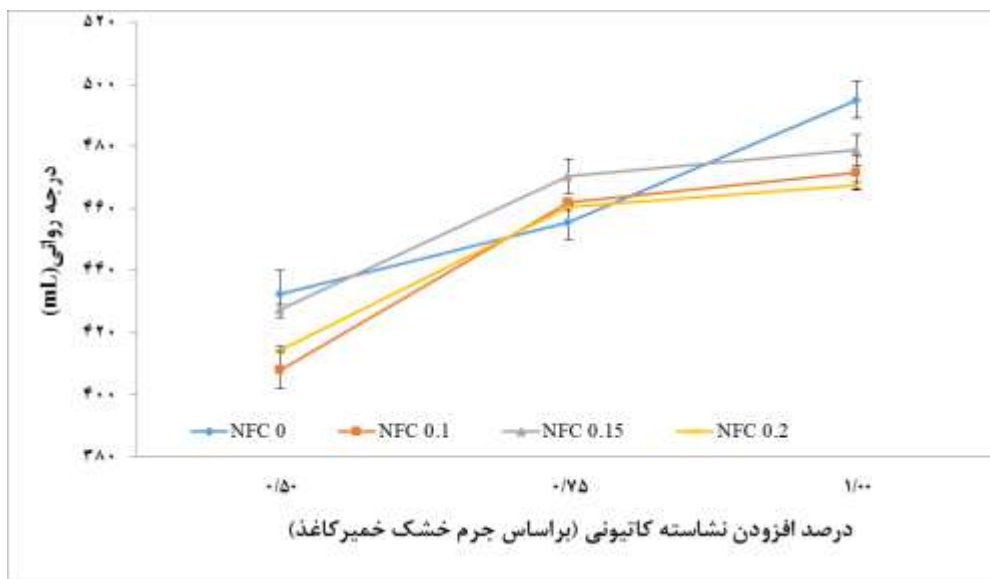
شکل ۲- تأثیر استفاده از نانوالیاف سلولزی بر عملکرد نشاسته کاتیونی در میزان اتلاف خمیر کاغذ OCC در آزمونگر DDJ

نداشته و نه تنها بهبود قابل توجه سهولت جدایش آب را بر جای نگذاشته، بلکه غالباً تسهیل ایجاد شده توسط نشاسته را در خروج آسان تر آب از نم در حال شکل گیری کاغذ، تحت الشعاع قرار داده و منجر به کاهش درجه روانی گردیده است.

دانسیته ظاهری کاغذ

در مصارف بسته بندی، دانسیته جزو مهم ترین ویژگی های فیزیکی کاغذ است که در تفسیر نتایج و بررسی میزان فشردگی کاغذ و ساختار فیزیکی آن بسیار مورد استفاده بوده و انتقال مطلوب تر و بهینه حرارت در خشک کن را سبب می شود. البته دانسیته بالا در کاغذهای بسته بندی نامطلوب است، چراکه کاهش سفتی خمشی را به همراه داشته و در فرایندهای کنگره سازی نیز منجر به پارگی به هنگام خیس شدن کاغذ می گردد [۱۴]. دانسیته کاغذ با پلایش و نیز مواد شیمیایی بهبود یافته که از جنبه های مختلف، مواد شیمیایی برتر هستند. البته ماندگاری بیشتر اجزای دوغاب به ویژه نرمه ها موجب افزایش دانسیته کاغذ می شوند [۵، ۹، ۱۴]. کاربرد منفرد نشاسته کاتیونی به عنوان افزودنی مقاومت خشک به طور چشمگیر و روشنی با ایجاد پیوند بین اجزا و تشکیل شبکه متراکم تر، دانسیته ظاهری را ارتقا (تا بیش از ۰.۱۴) و افزایش مصرف آن از ۰.۷۵٪ به ۱٪، بیشترین تأثیر را بر

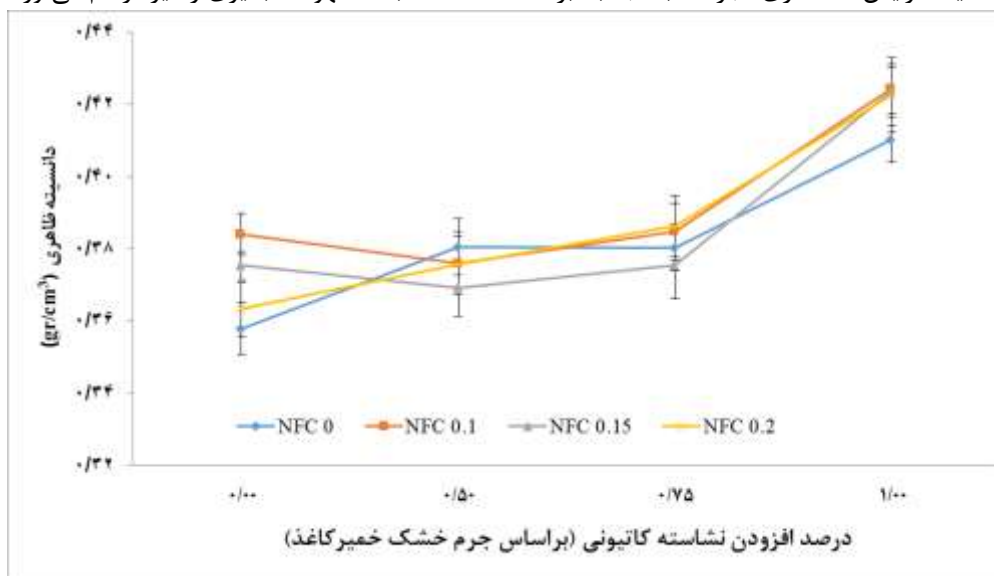
تشکیل فلاک بین اجزای دوغاب و در نتیجه آن کاهش مساحت تماس بین سطوح آب دوست اجزای دوغاب الیاف سلولزی که ماندگاری بالاتر، بهبود شکل گیری و مقاومت ها را نیز سبب می گردد، توسط رهایش آسان تر آب از سوسپانسیون اجزای آب دوست سلولزی و افزایش درجه روانی قابل تأیید و تعمیم است. واضح است که حضور پررنگ تر عامل مولد و مروج دلمه سازی، تأثیر گذارتر بوده که به صورت افزایش پیوسته و محسوس درجه روانی خمیر کاغذ ناشی از افزایش کاربرد نشاسته کاتیونی بروز یافت. فراوانی تشکیل فلاک های ریز، متراکم و متعدد و نیز واجد میزان کمتر آب درگیر شده، در سطوح بالاتر کاربرد این بیوپلیمر قابل گزارش است که پیش تر نیز در سامانه مبتنی بر نشاسته کاتیونی گزارش گردیده است [۱۳]. در نقطه مقابل، کاربرد منفرد نانوالیاف به طور معکوسی منجر به کاهش درجه روانی خمیر کاغذ به حدود ۳۲۵ میلی لیتر شده و تفاوتی نیز بین سطوح نانوالیاف سلولز مشاهده نشد. رفتار ژله ای، قابلیت جذب و نگهداری بالای آب، بالابردن ویسکوزیته سوسپانسیون و همچنین قرارگیری نانوالیاف در حفرات شبکه الیاف سبب کاهش پیوستگی بین حفرات و کاهش درجه روانی می شود. احتمال گرفتگی جزئی منافذ توری بر اثر ماهیت ژله ای و بسیار ریز نانوالیاف نیز قابل گزارش است. دیگر نکته جالب توجه، پیروی سامانه مرکب از روند سامانه پل زنی نشاسته است که البته میزان افزودن نانوالیاف پس از نشاسته، تأثیر ملموسی بر آبرگیری



شکل ۳- تأثیر استفاده از نانوالیاف سلولزی بر عملکرد نشاسته کاتیونی در درجه روانی CSF خمیر کاغذ OCC

دافعه الکترواستاتیکی ناشی از کاربرد بیشتر نشاسته کاتیونی در شبکه شکل‌یافته را نشان می‌دهد. به عبارت دیگر پس از اتصال نرمه‌ها به یکدیگر و به الیاف توسط نشاسته کاتیونی، کوچکی ابعاد ذرات نانوالیاف سلولزی امکان نفوذ به درون ساختار تشکیل‌شده توسط نشاسته کاتیونی را فراهم و چگالی بار زیاد این ذرات منجر به همکشیده شدن ساختار دلمه می‌گردد که با تشکیل دلمه-های اجزا و توزیع متناسب اجزای ماندگار شده نیز قابل استدلال است؛ چراکه نتایج تراکم اجزای دوغاب و نیز کاهش سطح تماس با آب، نه تنها افزایش تراکم و دانسیته کاغذ، بلکه سهولت آبگیری را نیز فراهم می‌آورد.

این ویژگی ساختاری کاغذ در تمامی سطوح منفرد و یا توأم با نانوالیاف سلولزی داشته است. کاربرد منفرد نانوالیاف نیز بهبود دانسیته را موجب شده که با داده‌های ماندگاری سازگار است. چراکه در روند مشابه، ماندگاری کاغذهای حاوی سطوح بالاتر کاربرد منفرد نانوالیاف؛ از میزان ماندگاری کمتری برخوردار گشته که به مفهوم باقی ماندن میزان کمتری از نرمه الیاف‌های سلولزی در ساختار کاغذ در حال شکل‌گیری است. کاربرد نانوالیاف سلولزی پس از نشاسته کاتیونی، غالباً در سطح ۰/۷۵٪ و ۱٪ نشاسته کاتیونی، افزایش تراکم و دانسیته کاغذ را به همراه داشته که علاوه بر تأیید افزایش ماندگاری اجزاء غلبه جاذبه بر

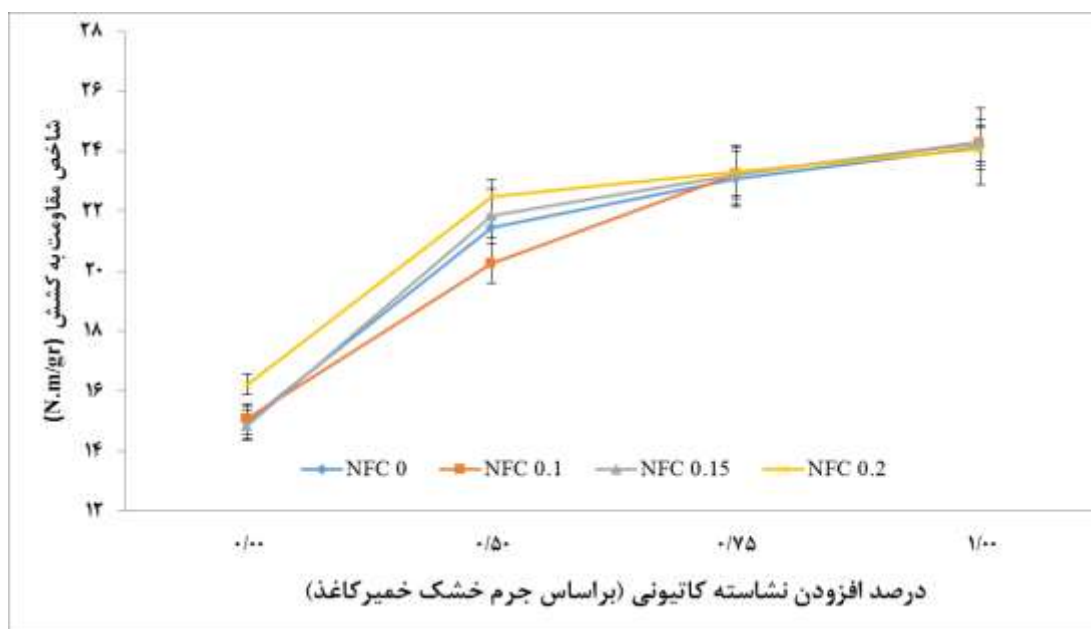


شکل ۴- تأثیر استفاده از نانوالیاف سلولزی بر عملکرد نشاسته کاتیونی در دانسیته کاغذ تولیدی از OCC

مقاومت به کشش

از مهم‌ترین ویژگی‌های کاربردی انواع کاغذ و مقوا بوده که متأثر از مقاومت ذاتی الیاف، تعداد (مساحت پیوند) و مقاومت پیوند، کیفیت توزیع اجزا و شکل‌گیری کاغذ است [۱۶]. نوع و میزان افزودنی‌های پایانه تر کاغذسازی بر توزیع اجزای دوغاب و در پی آن شکل‌گیری کاغذ، تعداد و مقاومت پیوندها موثر بوده که به‌واسطه نقش این مواد در دلمه‌سازی، آبگیری و پیوندیابی شناخته می‌شود [۹]. کاربرد نشاسته کاتیونی و افزایش درصد آن در خمیر کاغذ بازیافتی به‌طور پیوسته و چشمگیری منجر به ارتقای شاخص کشش (تا بیش از ۶۰ درصد) گشته که قابل پیش‌بینی و گزارش‌شده در پژوهش‌های پیشین است [۱]. نشاسته کاتیونی به‌عنوان ماده افزایش‌دهنده مقاومت خشک واجد جرم مولکولی مناسب و خاصیت کاتیونی، بر سطوح آنیونی الیاف سلولزی جذب، حفظ و با آن پیوندهای الکترواستاتیکی و هیدروژنی برقرار می‌کند. پیوندهای مزبور بهبود اتصالات شبکه الیاف را پدیدآورده و به دنبال آن مقاومت کششی بهبود می‌یابد. کاربرد منفرد ۰/۳٪ نانوالیاف سلولزی نیز حدود ۱۰٪ افزایش مقاومتی را سبب

شده، لیکن در سطوح پائین‌تر کاربرد منفرد آن، تأثیر ملموس شاخص کشش مشاهده نشد. نانوالیاف سلولزی به دلیل سطح ویژه بالا و ایجاد درگیری فیزیکی با الیاف خمیر کاغذ، سبب افزایش پیوندیابی هیدروژنی و افزایش سطح پیوند بین الیاف و در نتیجه استحکام بالاتر شبکه الیاف می‌گردد. در یک پژوهش، با کاربرد میکروالیاف سلولزی در خمیر کاغذ باگاس، بهبود مقاومت خشک و تر کششی و کاهش مقاومت پارگی گزارش گردید [۱۵]. در پژوهشی دیگر، افزودن ۲۰ درصد نانوالیاف سلولزی به خمیر کاغذ باگاس، منجر به افزایش مقاومت کششی شد [۱۲]. کاربرد سطوح مختلف نانوالیاف سلولزی، فقط در پایین‌ترین سطح نشاسته کاتیونی (۰/۵٪) تأثیرات متفاوتی بر شاخص کششی داشته و در سطوح بالاتر نشاسته، کاربرد نانوالیاف سلولزی پس از نشاسته، از تأثیری مثبت بر شاخص کشش برخوردار نبوده است؛ بنابراین در این ویژگی، سامانه مرکب نشاسته کاتیونی/نانوالیاف سلولزی از برتری بر سامانه رایج نشاسته برخوردار نبوده که با بار کاتیونی نشاسته در مقایسه با آنیونی نانوالیاف سلولزی تفسیر می‌شود.

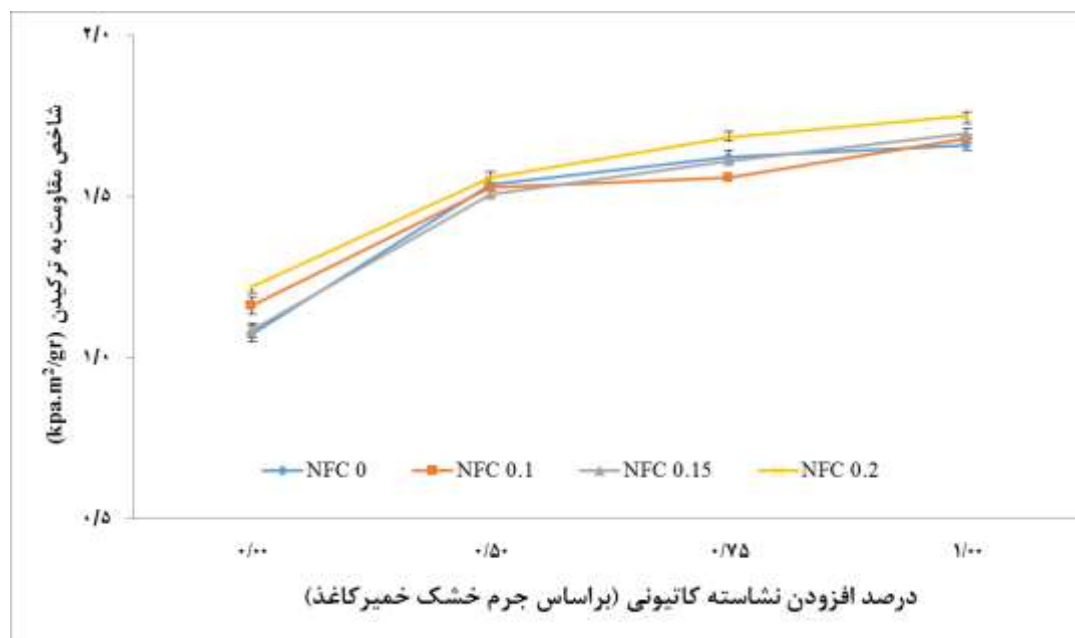


شکل ۵- تأثیر استفاده از نانوالیاف سلولزی بر عملکرد نشاسته کاتیونی در شاخص مقاومت به کشش کاغذ تولیدی از OCC

مقاومت به ترکیدن

مقاومت به ترکیدن کاغذ از عوامل مشابهی با مقاومت کششی پیروی می‌کند. شاخص ترکیدن بر اثر نشاسته کاتیونی به‌طور چشمگیری (۴۳٪) افزایش و همانند شاخص کشش، بیشترین ارتقا، بین سطح صفر و ۰/۵٪ مصرف نشاسته کاتیونی مشاهده گردید و سطوح ۰/۷۵٪ و ۱٪ در هر دو شاخص کشش و ترکیدن، علیرغم افزایش چشمگیر از شیب بهبود ملایم‌تری برخوردار گشته‌اند (شکل ۶). مشابه شاخص کششی، افزودن منفرد نانوالیاف سلولز بهبود شاخص ترکیدن را موجب شد و در سطح کاربرد ۰/۲٪، بیش از ۱۳٪ ارتقای شاخص ترکیدن را به

همراه داشته است. کاربرد نانوالیاف سلولز تنها در سطح ۰/۲ درصد پس از نشاسته موجب بهبود غیرملموس شاخص ترکیدن نسبت به کاربرد منفرد نشاسته گشته و در غالب موارد دیگر تأثیری نداشته است؛ بنابراین و نکته قابل‌توجه، عدم بهبود بارز شاخص ترکیدن کاغذ بازیافتی از کارتن‌های کنگره‌ای کهنه با افزایش سهم نانوالیاف در حضور نشاسته کاتیونی است؛ که مشابه روند و تغییرات روزیافته در شاخص کشش است. به‌عبارتی‌دیگر، سطوح مورد مطالعه نانوالیاف سلولز نتوانسته ارتقای چشمگیر پیوندیابی را در حضور نشاسته و در مقایسه با کاربرد منفرد نشاسته به وجود آورد.



شکل ۶- تأثیر استفاده از نانوالیاف سلولزی بر عملکرد نشاسته کاتیونی در شاخص مقاومت به ترکیدن کاغذ تولیدی از OCC

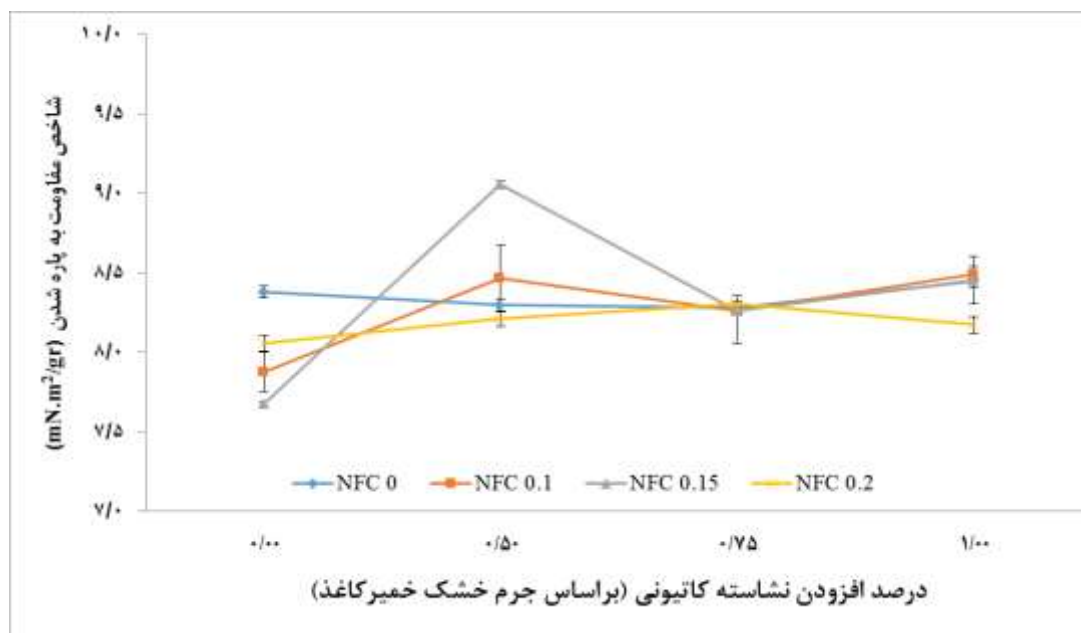
مقاومت به پاره شدن

از جمله ویژگی‌های کاغذ به‌ویژه در کاربردهای بسته‌بندی، مقاومت به پاره شدن آن بوده و عوامل اصلی مؤثر نیز شامل میانگین طول، قطر و مقاومت ذاتی الیاف است که میزان پیوندیابی اجزا و نیز جهت‌یافتگی آن‌ها در ساختار کاغذ نیز تأثیرگذار هستند [۱]. بطوریکه در خمیر کاغذهایی (بازیافتی و مکانیکی) با قابلیت پائین پیوندیابی و تحمل پائین به پالایش، بهبود شاخص پارگی از طریق توسعه و افزایش پیوندها امکان‌پذیر است؛ بنابراین حضور الیافی با میانگین طول و ضخامت کمتر، کاهش این ویژگی را سبب می‌گردد. در تمامی سطوح مختلف کاربرد

منفرد نانوالیاف سلولز، شاخص پارگی کاغذ پایین‌تر از تیمار شاهد فاقد افزودنی گزارش می‌گردد (شکل ۷). همچنین با در نظر گرفتن نتایج ماندگاری (شکل ۱)، مشخص می‌شود که میزان ماندگاری نیز در تیمارهای مورد اشاره ارتقاء یافته که به مفهوم حفظ بیشتر نرמה‌ها در ساختار کاغذ است؛ بنابراین حضور نانوالیاف و تأثیر آن بر ماندگاری بیشتر نرמה‌های الیاف که در سازگاری با افزایش ماندگاری کل و نیز کاهش اتلاف مواد است، کاهش میانگین قطر و طول الیاف کاغذ تولیدی را در پی داشته که به‌صورت تنزل شاخص پارگی کاغذ نمود می‌یابد. کاربرد منفرد نشاسته کاتیونی و افزایش میزان کاربرد آن

پارگی، پررنگ‌تر از طول و قطر الیاف بوده و توانسته حداقل بر کاهش شاخص پارگی ناشی از پایین‌تر آمدن میانگین طول و قطر الیاف فائق آمده، در عین حالیکه نتوانسته بهبود شاخص پارگی را رقم بزند. به‌کارگیری نانوالیاف سلولزی پس از نشاسته کاتیونی نیز عمدتاً تأثیر بارزی را بر شاخص پارگی کاغذ بازیافتی نداشته است.

تأثیر قابل‌توجهی بر شاخص پارگی نداشته است. با عنایت به حفظ مقادیر بیشتر نرمه در کاغذ، تنزل و یا تثبیت شاخص پارگی مورد انتظار است، لیکن با در نظر گرفتن پیوندیابی ضعیف خمیر کاغذهای بازیافتی، ماهیت ضعیف الیاف و ماندگاردن میزان بیشتر نرمه‌های الیاف، چنین استدلال می‌گردد که نقش پیوندیابی بین لیفی در شاخص



شکل ۷ - تأثیر استفاده از نانوالیاف سلولزی بر عملکرد نشاسته کاتیونی در شاخص مقاومت به پاره شدن کاغذ تولیدی از OCC

پلیمر کاتیونی/نانوذرات نداشته است، بلکه عملکرد نشاسته کاتیونی در بهبود ویژگی‌های خمیر کاغذ و کاغذ را نیز تضعیف می‌نماید. مبتنی بر نتایج این پژوهش، به‌واسطه ماهیت بازیافتی و بالابودن میزان آشغال‌ها و نرمه‌های آنیونی و کاتیون‌خواهی خمیر کاغذ قهوه‌ای و نیز تشابه و احتمالاً تشدید آن با نانوذرات آنیونی سلولزی، کاربرد نانوالیاف سلولزی نه تنها تأثیر قابل‌توجهی بر ویژگی‌های فرایند و فراورده ندارد؛ و از عملکرد این افزودنی رایج در بهبود ویژگی‌ها نیز کاسته است. چراکه دانسیته بار عمدتاً پائین نشاسته‌های کاتیونی متداول، تنها در میزان سطوح کاربردی بالاتر می‌تواند جبران‌کننده نیاز کاتیون‌خواهی بالای سوسپانسیون‌های غنی از مواد حل‌شده و کلوییدی آنیونی باشد.

نتیجه‌گیری

نقش بسزای نشاسته کاتیونی در بهبود فرایند و فراورده‌های بازیافتی کاغذی، شناخته‌شده و مورد کاربرد وسیع است؛ لیکن چگونگی و چرایی تأثیر نانوالیاف سلولزی در کاربرد توأم با آن گزارش نگردیده که در این پژوهش بررسی شد. کاربرد نانوالیاف سلولزی پس از نشاسته کاتیونی در خمیر کاغذ بازیافتی، نه تنها تأثیر افزایشی در شاخص‌های مقاومتی و دانسیته (به‌استثنای نانوالیاف - سلولزی ۰/۲٪) کاغذ را موجب نشد، بلکه گاهی کاهش مقاومت‌ها را نیز سبب گردید. ویژگی‌های خمیر کاغذ نیز نوسانات گاه افزایشی و گاه کاهشی نسبت به کاربرد منفرد متداول نشاسته کاتیونی، در سطوح مختلف کاربرد هم‌زمان دو بیوپلیمر نشان‌داد که سطح بهینه تلفیق آن‌ها، بسته به ویژگی مدنظر متفاوت بود. به‌طور کلی کاربرد نانوالیاف سلولزی به همراه نشاسته کاتیونی، نه تنها برهمکنش مثبت چشمگیری همانند سامانه‌های متداول

- [1] Jalali Torshizi, H., Mirshokraie, S.A., Faezipour, M., Hamzeh, Y. and Resalati, H., 2010. Application of galbanum gum (*ferula gummosa*) polysaccharide as a natural polymer to improve dry strength properties of recycled papers obtained from old corrugated cartons. Iranian Journal of Polymer Science and Technology, 23(4): 345-353. (In Persian).
- [2] Gullichsen, J. and Paulapuro, H., 1999. Papermaking Chemistry, Papermaking Science and Technology 19 series, Paper Engineers' Association Press, Finland.
- [3] Andalibian, M., Mahdavi, S., Kermanian, H. and Ramezani, O., 2013. The influence of OCC pulp refining to improve the properties of test liner board. Iranian Journal of Wood and Paper Research, 28(1): 77-88. (In Persian).
- [4] Rahmaninia, M., Mirshokraei, S.A., Ebrahimi, Gh. and Nazhad, M.M., 2011. Effect of cationic starch-nanosilica system on retention and drainage of washed OCC pulp. Journal of Forest and Wood Products, 64 (1): 15-22.
- [5] Jalali Torshizi, H., Zare Bidoki, S., Ramezani, O. and Rudi, H., 2014. Effect of cationic poly acrylamide - nano bentonite system on retention, drainage and properties of paper recycled from OCC. Iranian Journal of Wood and Paper Research, 29(3): 474-483. (In Persian).
- [6] González, I., Boufi, S., Angels Pèlach, M., Alcalà, M., Vilaseca, f. and Mutjé, P., 2012. Nanofibrillated cellulose as paper additive in eucalyptus pulps. BioResources, 7(4): 5167-5180.
- [7] Kajanto, I. and Kosonen, M., 2012. The potential use of micro- and nanofibrillated cellulose as a reinforcing element in paper. Journal of Science & Technology for Forest Products and Processes, 2(6): 42-48.
- [8] Myllytie, P., Holappa, S., Paltakari, J. and Laine, J., 2009. Effect of polymers on aggregation of cellulose fibrils and its implication on strength development in wet paper web. Nordic Pulp and Paper Research, 24(2): 125-134.
- [9] Jalali Torshizi, H., Zare Bidoki, S., Ramezani, O. and Rudi, H., 2015. Effect of nano silica and cationic polyacrylamide on retention, drainage and strength properties of recycled paper from OCC. Journal of Forest and Wood Products, 68(4): 771-784.
- [10] Ioelovich, M. and Figovsky, O., 2010. Structure and properties of nanoparticles used in paper compositions. Mechanics of Composite Materials, 46(4): 435-442.
- [11] Merayo, N., Balea, A., Fuente, E., Blanco, A. 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.
- [12] Hadilam, M.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.
- [13] Khosravani, A., Jahan latibari, A., Mirshokraei. S.A., Rahmaninia, M. and nazhad, M.M., 2010. Studying the effect cationic starch- anionic nano silica system on retention and drainage. BioResources, 5(2): 939-950.
- [14] Niskanen, K., 1999. Paper physics, In: Papermaking Science and Technology series, vol. 16. .Gullichsen, J., and Paulapuro, H. eds. Fapet Oy, Helsinki, , Finland, 324 p.
- [15] Hassan, E.A., Hassan, M.L. and Oksman, K., 2011. Improvement of paper sheets properties of bagasse pulp with microfibrillated cellulose isolated from xylanase treated bagasse. Wood and Fiber Science, 43(1): 1-7.
- [16] Janzadeh, H., Hedjazi, S., Yousefi, H., Mahdavi, S. and Abdolkhani, A., 2014. The effect of using cellulose nanofibers and cationic starch on the properties of soda-aq pulp from rice straw. Journal of Forest and Wood Products, 67(1): 105-117.

The effect of cellulose nanofibres on cationic starch efficiency in pulp and paper recycled from packaging waste paper

Abstract

Application of chemical additives is an effective approach to improve the properties of recycled paper products and process, which new additives introduction are always under challenge and question. Recently, Cellulosic Nano Fibers (CNF) as a nano-bio-material originated from the plant fibers received a great attention in different area such as papermaking, which acquainted the performance assessments regarding to the various conditions of the different furnishes. With this respect, the effect of CNF (0.1, 0.15 & 0.2% OD pulp) on the well-known performance of cationic starch (CS) (0.5, 0.75 & 1% OD pulp), as the most famous polymer used in papermaking, were studied in the pulp recycled from packaging brown waste papers. The results showed that addition of CNF after starch didn't improve pulp retention, but also declined starch performance in the recycled pulp retention improvement, continuously and corresponding to CNF usage increment. Also, the results obtained from dynamic drainage jar approved retention data, and the least pulp loss was occurred at the lowest CNF addition. Individually addition of CNF decreased the pulp freeness (CSF) and its addition after starch didn't positively affect CSF, significantly; and often decreased it. The CNF addition to the starch contained pulp had no meaningfully effect on tensile and burst strengths of the recycled paper and diminished tear strength, too. Generally, unlike the traditional retention-drainage systems comprising cationic polymer/nanoparticles, the application of cationic starch/cellulose nanofibers revealed no positive effects on the properties of pulp and paper recycled from packaging brown papers.

Keywords: cationic starch, cellulose nanofibers, recycled pulp and paper.

H. Pourkarim Dodangeh¹
H. Jalali Torshizi^{2*}

¹ M.Sc. student, Cellulose and paper technology department, Shahid Beheshti university, Zirab, Iran

² Assistant Prof., Cellulose and paper technology department, Shahid Beheshti university, Zirab, Iran

Corresponding author:
H_Jalali@sbu.ac.ir

Received: 2017/05/21

Accepted: 2017/11/21