

تأثیر نانوسیلیکا و پلی‌اکریلامید کاتیونی بر ماندگاری آبگیری و ویژگی‌های مقاومتی کاغذ بازیافتی از کارتن‌های کنگره‌ای کهنه

- ❖ حسین جلالی ترشیزی*: استادیار گروه فناوری سلولز و کاغذ دانشکده مهندسی فناوری‌های نوین دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران
- ❖ سعیده زارع بیدکی: کارشناس ارشد گروه فناوری سلولز و کاغذ دانشکده مهندسی فناوری‌های نوین دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران
- ❖ امید رضائی: استادیار گروه فناوری سلولز و کاغذ دانشکده مهندسی فناوری‌های نوین دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران
- ❖ حمیدرضا رودی: استادیار گروه فناوری سلولز و کاغذ دانشکده مهندسی فناوری‌های نوین دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

چکیده

کاغذسازان برای ارتقای عملکرد فرآورده نهایی کاغذی و همچنین بهبود کارایی فرایند تولید از مواد شیمیایی متنوع استفاده می‌کنند. در حضور میزان ثابت نشاسته کاتیونی، به منزله عامل مقاومت خشک و تا حدودی کاهنده بار آنیونی اجزای سوسپانسیون کاغذسازی، تأثیر سامانه پلی‌اکریلامید کاتیونی/نانوسیلیکا بر میزان ماندگاری و آبگیری و ویژگی‌های کاغذ تولیدی از بازیافت کارتن‌های کنگره‌ای کهنه (OCC) و همچنین حجم آبگیری در دستگاه آبگیری دینامیکی^۱ (DDJ) ارزیابی شد. نتایج نشان داد در حضور نشاسته کاتیونی کاربرد منفرد پلیمر اکریلامید کاتیونی در مقایسه با سیلیکای آنیونی در همه ویژگی‌های مورد مطالعه کارآمدتر است و موجب ارتقای ویژگی‌های مطالعه شده در مقایسه با عدم کاربرد این دو افزودنی می‌شود. با کاربرد سامانه نشاسته/CPAM، نانوسیلیکا خروج حجم بالاتر آب (تا ۰/۶) و به عبارتی کاهش مدت زمان لازم برای تشکیل ورقه کاغذی (تا ۱۰٪) همراه ماندگاری بیشتر (بیش از ۰/۲) و در نتیجه به هم پیوستن و متراکم‌تر شدن نرمه‌ها و الیاف از طریق پل زنی و شبکه‌سازی و همچنین کمک به خنثی‌سازی هر چه بیشتر بار آنیونی سطحی اجزای دوغاب و تشکیل دلمه‌هایی بزرگ‌تر پدید آمد. سازوکارهای متراکم‌ساز یادشده به بهبود احتمالی شکل‌گیری پیوندهای درون‌شبکه‌ای منجر می‌شود که از این رهگذر شاخص کششی را تا بیش از ۴۵ درصد و شاخص ترکیدن را بیش از ۵۰ درصد بهبود می‌بخشد. تأثیر نانوذرات آنیونی سیلیکا بر استحکام دلمه‌های تشکیل‌یافته توسط CPAM به صرف انرژی بیشتر برای پاره کردن کاغذ می‌انجامد و بیش از ۱۲ درصد بر شاخص پارگی می‌افزاید. بنابراین، با استفاده از سامانه پلی‌اکریلامید کاتیونی/نانوسیلیکا، علاوه بر نرخ تبدیل بالاتر ماده اولیه به محصول و راندمان بالاتر تولید، فرآورده‌ای با ویژگی‌های کاربردی بالاتر و مطلوب‌تر نیز به دست می‌آید.

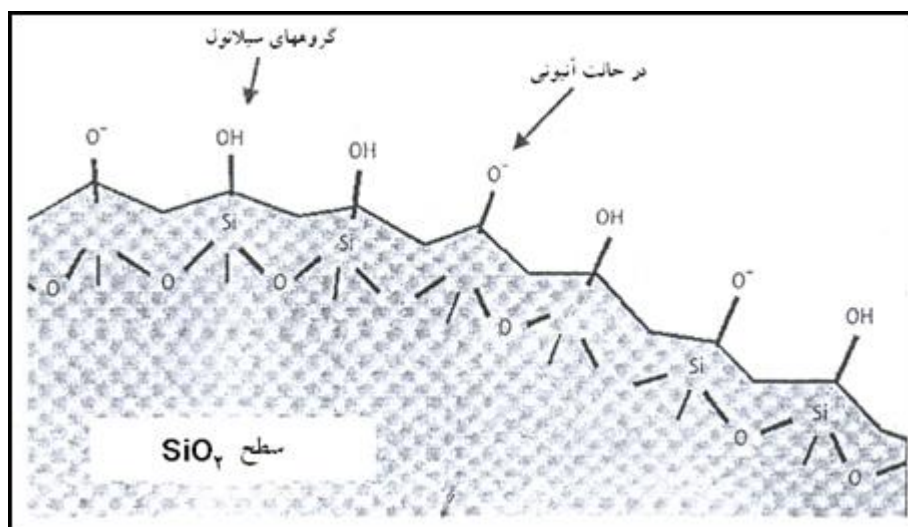
واژگان کلیدی: آبگیری، پلی‌اکریلامید کاتیونی، ماندگاری، نانوسیلیکا، ویژگی‌های مقاومتی کاغذ بازیافتی OCC.

مقدمه

به‌رغم کمبود جدی مواد اولیه چوبی، تولید و مصرف کاغذ و فرآورده‌های کاغذی، به‌ویژه در مناطقی نظیر چین، رشدی بسیار سریع دارد [۱]. از این رو گزینه‌هایی همچون استفاده از الیاف غیر چوبی و بازیافت کاغذ به منظور تأمین مواد اولیه مورد توجه است. لیکن در کاربرد الیاف گیاهان غیر چوبی مشکلات و ملاحظات زیادی وجود دارد. از دیدگاه فرایند کاغذسازی، یکی از عوامل محدودکننده در کاربرد خمیر کاغذهای بازیافتی ماندگاری و آبگیری ضعیف‌تر آن‌ها به‌ویژه در گرماژهای بالاست. لیکن این مشکل را می‌توان تا حد زیادی به کمک کاربرد کمک‌نگهدارنده و کمک‌آبگیرنده‌ها کاهش داد. از بین گزینه‌های موجود برای کمک به حل مشکل، سامانه‌های مزبور اقبالی رو به رشد داشته‌اند. البته، بهبود آبگیری با حذف بخشی از ریزه‌الیاف و با تحمل هزینه اتلاف ماده اولیه نیز مقدور است [۱]. با این حال، در زمینه شناخت تأثیر سامانه‌های مختلف کمک‌ماندگاری-آبگیری در خمیر کاغذهای مختلف بر ویژگی‌های فرایندی و فرآورده‌ای کاغذ دانش و تجربه کافی وجود ندارد. کاربرد سامانه کمک‌نگهدارندگی تک‌جزئی در ماشین کاغذهای مدرن و الزامات کنونی، که ماندگاری و آبگیری و شکل‌گیری را بسیار حائز اهمیت می‌سازد، سازگار نیست. سامانه‌های کمک‌ماندگاری مبتنی بر نانوذرات دارای سطوح مناسب ماندگاری و آبگیری‌اند و به شکل‌گیری مناسب ورقه کاغذی کمک می‌کنند. امروزه، حذف سریع و بیشتر آب در ماشین کاغذ مقوله‌ای مهم و وابسته به شاخص‌های اقتصادی و

فنی است. از آنجا که بیشتر هزینه تولید به بخش خشک‌کن ماشین کاغذ اختصاص می‌یابد، حذف هر چه بیشتر و سریع‌تر آب در پایانه تر و واگذار نکردن آن به پرس‌ها و خشک‌کن‌ها می‌تواند موجب صرفه‌جویی در هزینه‌های فرایند تولید شود. صنعت کاغذسازی، به لحاظ میزان مصرف ذرات نانو در مقیاس وسیع صنعتی، پیش‌روست [۲] و بیشترین استفاده از ذرات نانو مربوط به بهره‌گیری از ذرات نانوسیلیکا و سدیم مونت موریلونیت (بتونیت) در پایانه تر کاغذسازی است [۳ و ۴]. سیلیکا (SiO_2) ماده‌ای جامد با پیوندهای کووالانسی است که بین هر دو اتم سیلیس آن یک اتم اکسیژن قرار می‌گیرد و در طبیعت به‌وفور یافت می‌شود (شکل ۱) [۵]. مزیت اصلی نانوسیلیکا در مقایسه با میکروسیلیکا مساحت سطح بالاتر آن است که موجب برهم‌کنش بیشتر در بسترهای مورد استفاده می‌شود.

همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، سطح ذرات سیلیکا پوشیده از آنیون‌هاست و طبیعتاً با کوچک‌تر شدن ابعاد ذره و افزایش سطح چگالی بار ماده نیز به‌طور چشمگیری افزایش می‌یابد. کاربرد سامانه نشاسته کاتیونی/نانوسیلیکا در خمیر کاغذ مکانیکی-حرارتی^۱ (TMP) برای نگهداشت پرکننده کربنات کلسیم رسوبی نشان داد ماندگاری بالاتر و کاغذهای مستحکم‌تری به دست می‌آید [۶]. بررسی کاربرد توأم CPAM با نشاسته کاتیونی اصلاح‌شده با کربوکسی متیل عملکردی بی‌نظیر دارد و در مقایسه با نشاسته اصلاح‌نشده ماندگاری و شکل‌گیری بهتری به وجود می‌آورد و توانایی مقاومت‌زایی بیشتری نیز دارد [۷].



شکل ۱. سطح ذرات نانوسیلیکا و عامل ایجاد بار منفی در سطح این ذرات [۵]

نگهداشت رزین‌های حاصل از عملیات خمیرسازی مواد لیگنوسولولزی و جلوگیری از تشکیل قیر در ماشین کاغذسازی نشان داد PEO^۲، علاوه بر بروز بهترین عملکرد در نگهداشت ذرات قیر، بهترین ماندگاری و آبگیری را در خمیرکاغذ TMP^۳ دارد [۱۱]. کاربرد کاپتوزان به مثابه دلمه‌ساز در پایانه‌تر کاغذسازی نشان داد عملکرد آن در مقایسه با PEI^۴ و pDADMAC^۵ بالاتر است و بهبود بسیار بیشتری در آبگیری و مقاومت‌های کاغذ ایجاد می‌کند [۱۲]. همچنین مطالعه سیستم نشاسته کاتیونی/نانوسیلیکا در خمیرکاغذ شسته شده حاصل از بازیافت OCC بهبود آبگیری و ماندگاری را نشان داد [۱۳]. بررسی تأثیر میزان کاربرد نشاسته کاتیونی در تلفیق با نانوسیلیکا به منزله سامانه ماندگاری نشان داد مقادیر بالای کاربرد منفرد آن موجب کاهش آبگیری و ماندگاری نرمه‌ها و پرکننده‌ها می‌شود؛ ولی حضور نانوسیلیکا

همچنین، سازوکار جذب نرمه‌ها بر سطح الیاف با استفاده از سامانه CPAM، بنتونیت و مقایسه آن با سامانه فاقد میکروذره بنتونیت نشان داد صفحات بنتونیت به افزایش مقاومت پیوندی بین لایه‌های پلیمری جذب شده بر سطوح الیاف و نرمه‌ها منجر می‌شود و مهاجرت پلیمر را بین اجزای دوغاب کاهش می‌دهد [۸]. همچنین، بررسی‌ها نشان داد در کاغذهای ظریف حاوی پرکننده بالا سامانه نشاسته کاتیونی/نانوسیلیکا منجر به ارتقای مقاومت پیوندیابی درونی می‌شود و به سبب تشکیل میکروفلاک به خروج آب بیشتر و سریع‌تر می‌انجامد [۹]. همچنین، اخیراً گزارش شده افزودن نانوکریستالین سلولز در حالت اکسید شده با TEMPO^۱ و اکسید نشده به خمیرکاغذ جوهرزدایی شده به بهبود ماندگاری و تا حدودی کاهش نرخ آبگیری منجر می‌شود؛ در حالی که تلفیق آن با CPAM به وضوح بهبود آبگیری و ماندگاری را در پی دارد [۱۰]. از طرفی نیز تأثیرگذاری هفت سامانه کمک‌نگهدارنده مختلف بر

2. Poly Ethylene Oxide (PEO)
 3. Thermo Mechanical Pulp (TMP)
 4. Poly Ethylene Imine (PEI)
 5. Poly di allyl di methyl ammonium chloride (pDADMAC)

1. 2,2,6,6-tetramethyl piperidin-1-yloxy methyl

با استاندارد ۰۲-sp-۲۰۵ T آیین‌نامه TAPPI استفاده شد.

نشاسته کاتیونی

نشاسته کاتیونی نوع سوم استفاده شده در این تحقیق، با منبع گیاهی گندم، از شرکت بویاخ‌ساز با درجه استخلاف (D.S) ۰٫۳، رطوبت ۷٫۸ درصد، دمای ژلاتینی شدن ۸۵ تا ۹۰ درجه سانتی‌گراد، pH برابر ۶٫۵ و خاکستر ۳٫۳۲۵ درصد بود. در این پژوهش نشاسته کاتیونی به مثابه ماده مقاومت خشک و همچنین کاهنده اولیه بار آنیونی اجزای دوغاب در مقدار ثابت ۱ درصد بر اساس وزن خشک خمیرکاغذ استفاده شد. با توجه به اینکه پلیمرهای نشاسته کاتیونی در آب سرد نامحلول‌اند، باید پخته شوند. بنابراین، دما به تدریج افزایش یافت و پس از رسیدن به ۹۰ °C به مدت سی دقیقه حفظ شد. سپس اجازه داده شد به دمای محیط برسد. گفتنی است، به منظور جلوگیری از تخریب ساختار نشاسته پخته شده با گذشت زمان^۴ تهیه محلول یادشده به صورت روزانه صورت گرفت [۱۷ و ۱۸].

پلی‌اکریلامید کاتیونی

پلی‌اکریلامید کاتیونی به صورت محلول در آب با میزان مواد جامد ۲۵ درصد از موجودی شرکت چوب و کاغذ مازندران تهیه و در دو سطح کاربرد ۰ و ۰٫۲ درصد وزن خشک خمیرکاغذ به سوسپانسیون الیاف اضافه شد. این ماده با نام تجاری Farinret K325 و تولیدشده در شرکت دگوسا^۵ پلی‌الکترولیتی بر پایه پلیمرهای اکریلیکی است که جرم مولکولی

همه شاخص‌های اشاره شده را بهبود می‌بخشد [۱۴]. با توجه به شناخت تأثیر نامطلوب پیش‌تیمار با مواد رایج شیمیایی جمع‌کننده آشغال‌های آنیونی بر عملکرد مواد افزودنی مقاومت خشک [۱۵] و کاهش شانس نشست سایر مواد کاتیونی به دلیل کم شدن بار آنیونی الیاف و همچنین شناخت قابلیت نشاسته کاتیونی در خنثی‌سازی آشغال‌های آنیونی و کاهش اثر منفی مواد کلونیدی و حل شده بر سامانه ماندگاری [۱۶]، در این پژوهش از نشاسته کاتیونی استفاده شد تا علاوه بر داشتن قابلیت پلیمری، از جنبه ایجاد مقاومت خشک، کم شدن بار آنیونی سامانه را نیز منجر شود. بنابراین، با توجه به اهمیت آبیگری و ماندگاری در پایانه تر و نقش تعیین‌کننده آن‌ها در اقتصاد کاغذسازی، ارزیابی چگونگی تأثیرگذاری سامانه ماندگاری-آبیگری مبتنی بر پلی‌اکریلامید کاتیونی/نانوسیلیکا در حضور نشاسته کاتیونی بر ماندگاری و آبیگری و ویژگی‌های مقاومتی کاغذهای بازیافتی از کارتن‌های کنگره‌ای کهنه^۱ بررسی شد.

مواد و روش‌ها

خمیر کاغذ

سوسپانسیون خمیرکاغذ بازیافتی OCC کارخانه مهر استان یزد به منزله منبع لیفی به کار رفت. پس از اندازه‌گیری درجه روانی کانادایی^۲ (CSF) بر اساس استاندارد ۹۹-۲۲۷ om T آیین‌نامه TAPPI^۳ (~۳۲۰ میلی‌لیتر) و میزان pH خط تولید (~۷) از آب با سختی ۱۶۰ ppm برای ساخت کاغذ دست‌ساز برابر

4. Retrogradation
5. Degussa

1. Old Corrugated Container
2. Canadian Standard Freeness
3. Technical Association of Pulp and Paper Industry

افزوده و پس از گذشت سی ثانیه کاغذهای دست‌ساز سالم حداقل در ده تکرار ساخته شد.

اندازه‌گیری ویژگی‌ها

اندازه‌گیری ویژگی‌های کاغذ دست‌ساز طبق استانداردهای جدول ۱ بر اساس آیین‌نامه TAPPI انجام شد.

جدول ۱. اندازه‌گیری ویژگی‌های خمیر کاغذ و کاغذ و استانداردهای مربوطه

T۲۲۱ cm- ۹۹	زمان آبگیری
T۴۱۰ om-۰۲	گراماژ کاغذ
T۴۹۴ om- ۰۱	شاخص کشش
T۴۱۴ om- ۹۸	شاخص پارگی
T۴۰۳ om- ۹۷	شاخص ترکیب

اندازه‌گیری حجم آبگیری در دستگاه DDJ، بر اساس دستورالعمل آن و در مدت زمان سی ثانیه، انجام شد. اندازه‌گیری و محاسبه ماندگاری کل نیز بر اساس منابع [۱۹] و مطابق رابطه ۱ صورت گرفت:

$$(۱) \quad \text{ماندگاری کل} = \frac{\text{وزن شیت نهائی با لحاظ کردن رطوبت}}{\text{وزن کلیه مواد}} \times ۱۰۰$$

آنالیز آماری نتایج به کمک نرم‌افزار SPSS و با آزمون فاکتوریل و گروه‌بندی دانکن در سطح اطمینان ۹۹ درصد انجام شد.

یافته‌ها و بحث

نتایج اندازه‌گیری ویژگی‌های فرایند تولید مطالعه‌شده در این پژوهش و همچنین ویژگی‌های مقاومتی کاغذ

بالا و چگالی بار کاتیونی متوسطی برای آن گزارش شده است. به دلیل اینکه محصول تولیدشده انحصاری است، شرکت تولیدکننده اطلاعات اندکی درباره وزن مولکولی و دانسیته بار ارائه داده و به کلماتی مانند کم و متوسط و زیاد اکتفا کرده است.

نانوسیلیکا

طبق برگه اطلاعات نانوآکسید سیلیس پودری سفیدرنگ است با خلوص ۹۸٫۳ درصد (بر مبنای SiO_2)، میزان pH سوسپانسیون (۹ ~)، تعداد گروه‌های آنیونی شونده 15 nm^{-2} ، و متوسط اندازه ذرات ۲۰ تا 30 nm ؛ که از مجتمع فناوری‌های نوین فدک تهیه شد و با توجه به خاصیت جذب آب بالای ذرات سیلیکا و همچنین به منظور دلامینه شدن ساختار و عملکرد بهتر آن سوسپانسیون ۱۰ گرم بر لیتر آن به مدت بیست و چهار ساعت به‌شدت هم زده شد. افزودن نانوسیلیکا از سوسپانسیون آماده‌شده و در حال تلاطم انجام شد.

نحوه و ترتیب اختلاط مواد شیمیایی

بر اساس نوع تیمار و مواد افزودنی مورد مصرف برای هر تیمار، ابتدا نشاسته کاتیونی اضافه شد. در گام بعدی پلی‌اکریلامید کاتیونی و در نهایت نانوذره سیلیکا به سوسپانسیون الیاف افزوده شد. اختلاط نشاسته کاتیونی و پلی‌اکریلامید در شرایط تلاطم سوسپانسیون الیاف توسط هم‌زن دیجیتالی و با اغتشاش 1000 rpm^1 و با فاصله زمانی یک دقیقه صورت گرفت. در آخرین مرحله، با کاهش سرعت هم‌زن به 800 rpm نانوذره سیلیکا به مقدار مطلوب

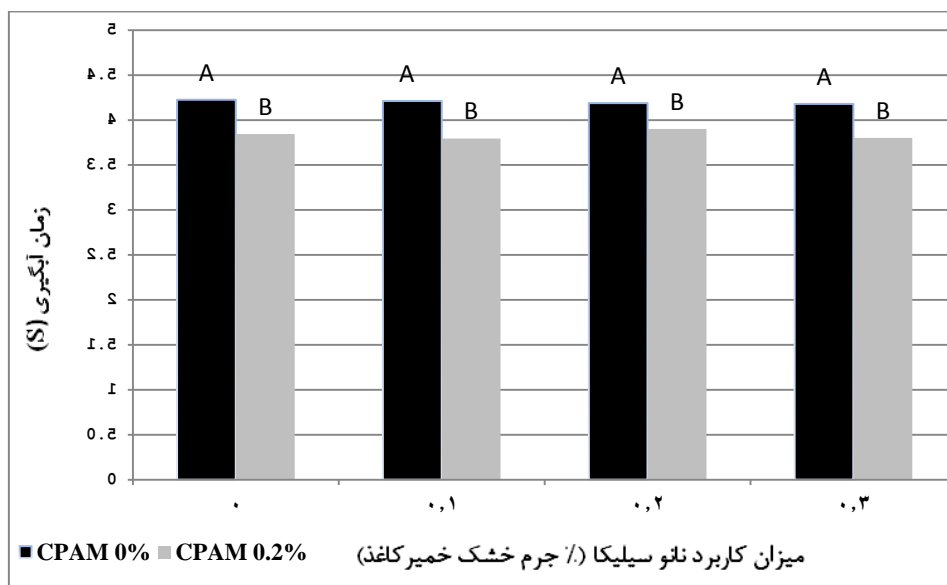
1. Rotation per Minute

مواد جمع‌کننده آشغال آنیونی متداول در این پژوهش و واگذار کردن این نقش به نشاسته کاتیونی از یک طرف و ماهیت خمیر کاغذ بازیافتی مورد مطالعه از منظر فراوانی آشغال‌های آنیونی از طرف دیگر موجب عدم تأثیر معنادار، به‌رغم بروز کاهش زمان آبگیری، شد. کاربرد CPAM به‌تنهایی به‌طور معنادار زمان آبگیری را کاهش داد؛ لیکن، همانند عدم حضور پلیمر مزبور، افزایش سطح کاربرد نانوسیلیکا در حضور پلیمر بلندزنجیره کاتیونی نیز تغییر معنادار در مدت زمان لازم برای تشکیل ورقه کاغذی پدید نیاورد (شکل ۲).

دست‌ساز تولیدشده از بازیافت کارتن‌های کنگره‌ای کهنه در شکل‌های ۲ تا ۷ می‌آید.

زمان آبگیری در ماشین کاغذسازی آزمایشگاهی

هنگام ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی کاغذ دست‌ساز، مدت زمان لازم برای آبگیری از خمیر کاغذ نشان داد ترکیب نشاسته کاتیونی/نانوسیلیکا، به‌رغم ایجاد روند کاهشی در زمان آبگیری، در سطح اعتماد ۹۹ درصد تأثیر معنادار ندارد و افزایش میزان کاربرد نانوذره نیز از این حیث معنادار نیست. به کار نبردن



شکل ۲. تأثیرپذیری زمان آبگیری از کاربرد نانوسیلیکا در حضور و عدم حضور پلی‌اکریلامید کاتیونی

در آن‌ها باشد که حدود ۱۰ درصد کاهش زمان لازم برای آبگیری را در پی دارد. با در نظر گرفتن مقادیر بالای ریزه‌الیاف‌ها و همچنین مواد کلوئیدی و معلق آنیونی در خمیر کاغذهای بازیافتی، لزوم کاربرد پلیمرهای بلندزنجیره کاتیونی برای دستیابی به تولید سریع‌تر تأکید می‌شود. البته افزایش (حدود ۵٪)

تأثیر پلیمر اکریلامید بر بهبود آبگیری می‌تواند حاصل اجتماع و دلمه‌سازی نرمه‌ها و الیاف از طریق پل‌زنی و شبکه‌سازی و همچنین کمک به خنثی‌سازی هر چه بیشتر بار آنیونی سطحی اجزای دوغاب، کاهش سطوح جانبی اجزای آب‌دوست، فشرده شدن دلمه‌های تشکیل‌یافته، و کاهش قابلیت نگهداری آب

نگهدارندگی کمتر آب می‌شود. افزودن نانوسیلیکا در کنار CPAM افزایش حجم آبگیری را تشدید می‌کند. لیکن ارتقای سطح کاربرد نانوذره مزبور، به‌رغم ایجاد روند بهبود پیوسته سرعت جدایش آب، در مقایسه با عدم کاربرد آن، فقط در بالاترین سطح مورد مطالعه نانوسیلیکا موفق به ایجاد تفاوت معنادار شد و بیش از ۲ درصد افزایش حجم خروج آب را در پی داشت. به‌طور کلی، استفاده از سامانه پلی‌اکریلامید کاتیونی/نانوسیلیکا در حضور نشاسته کاتیونی منجر به بیش از ۶ درصد ارتقای حجم آبگیری در مقایسه با سامانه منفرد نشاسته کاتیونی شد (شکل ۳).

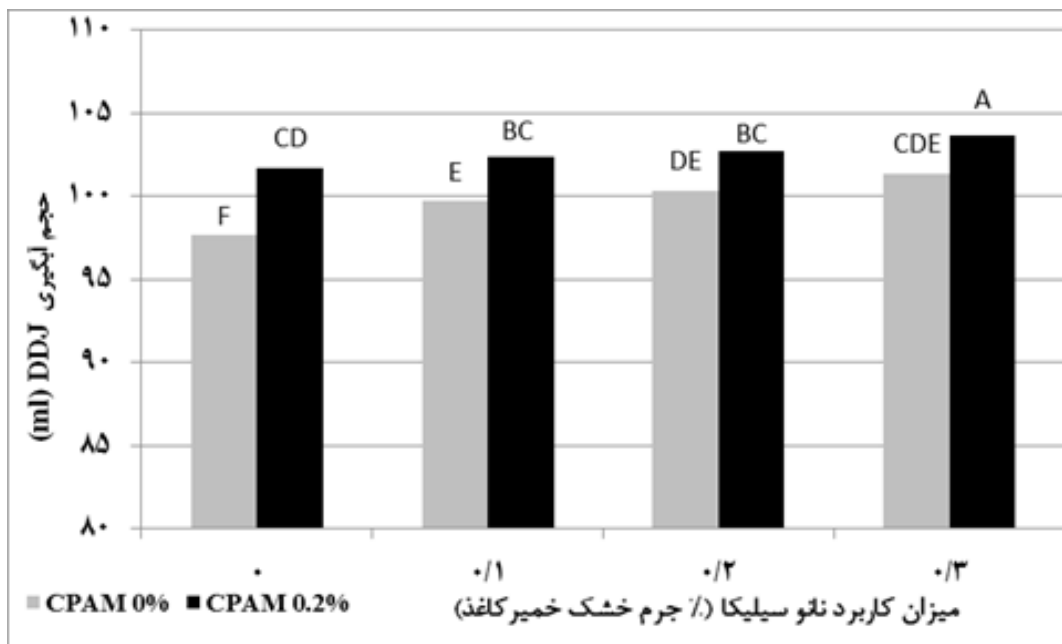
درصد ماندگاری اجزای سوسپانسیون

ویژگی ماندگاری در پایانه تر کاغذسازی هم از جنبه بهره‌وری تولید و هم الزامات زیست‌محیطی بسیار مهم است. مطابق شکل ۴، کاربرد نانوسیلیکا هیچ‌گونه تأثیر معنادار بر ماندگاری اجزای دوغاب خمیرکاغذ در حضور نشاسته کاتیونی ندارد. لیکن حضور منفرد CPAM میزان ماندگاری را (حدود ۱٪) ارتقا می‌بخشد. علاوه بر احتمال از دست رفتن بخش عظیم توان کاتیونی نشاسته، به واسطه آشغال‌های آنیونی، نشاسته کاتیونی، به دلیل ماهیت شاخه‌دار و طول زنجیره مولکولی کوتاه‌تر، توانایی برابری با پلی‌اکریلامید را در تشکیل فلاک ندارد؛ نیز از توانایی و تمایل بیشتری بر مسطح شدن و خوابیدن بر سطح لیاف برخوردار است، که احتمالاً به عدم ارائه دنباله‌های آزاد و بیرون‌زده از سطح برای عملکرد نانوذرات در جهت تشکیل فلاک‌های چگال‌تر و بزرگ‌تر منجر می‌شود.

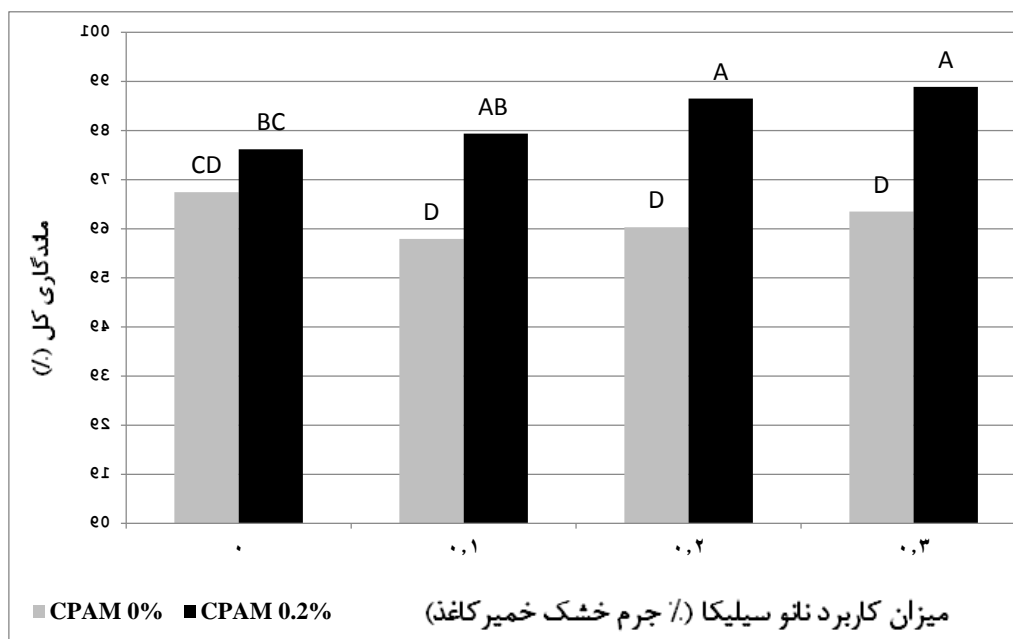
سرعت آبگیری از خمیرکاغذ بکر گاه گندم با استفاده از سامانه سیلیکا/CPAM و همچنین میکروبتونیت/CPAM [۱] و بهبود آبگیری از خمیرکاغذ گاه گندم در سامانه دوجزئی نشاسته کاتیونی/سیلیکای آنیونی نیز گزارش شده است [۲۰].

حجم آبگیری در دستگاه آبگیری دینامیکی

افزودن نانوسیلیکا به دوغاب خمیرکاغذ بازیافتی حاوی نشاسته کاتیونی موجب افزایش حجم آبگیری و به عبارتی تسریع رهایش آب می‌شود. لیکن به‌رغم خروج بیشتر آب همراه کاربرد میزان بیشتری از نانوذره تفاوت آماری معنادار پدید نیامد. در سامانه‌های ماندگاری-آبگیری مبتنی بر پلیمر/پارتیکل، ذره آنیونی به‌کاررفته نقش پل و ذره حد واسط بین پلیمرهای نشست‌یافته بر سطح لیاف و نرمه‌ها را ایفا کرد و موجب نزدیکی و تراکم بیشتر آن‌ها شد؛ که از این رهگذر سهولت بیشتر خروج و رهایش آب از دوغاب خمیرکاغذ (افزایش ۳/۵٪) فراهم می‌شود. کاربرد منفرد پلیمر CPAM به‌طور بارز حجم آبگیری را افزایش داد تا جایی که میزان خروج آب بیش از ۴ درصد بیشتر شد. با عنایت به طول زنجیره بلندتر پلیمرهای سنتزی، نظیر اکریلامید، تشکیل فلاک‌های بزرگ‌تر و واجد اجزای بیشتر از دوغاب دور از انتظار نیست که به مفهوم کاهش مساحت سطوح خارجی در تماس با آب و در نتیجه بهبود خروج آب است. همچنین، ایفای نقش خنثی‌کننده آشغال‌های آنیونی و تکمیل وظیفه نشاسته کاتیونی در به حداقل رساندن دافعه اجزای آنیونی دوغاب خمیرکاغذ باعث نزدیکی بیشتر اجزا و



شکل ۳. تأثیرپذیری حجم آبیگری از کاربرد نانوسیلیکا در حضور و عدم حضور پلی‌اکریلامید کاتیونی



شکل ۴. تأثیرپذیری ماندگاری کل از کاربرد نانوسیلیکا در حضور و عدم حضور پلی‌اکریلامید کاتیونی

سامانه CPAM/نانوسیلیکا نشان می‌دهد با کاربرد و افزایش کاربرد نانوذره روند افزایشی پیوسته‌ای (بیش از ۱٪) در حفظ مواد و تبدیل آن‌ها به کاغذ ایجاد می‌شود که از لحاظ آماری نیز معنادار است؛ تا جایی

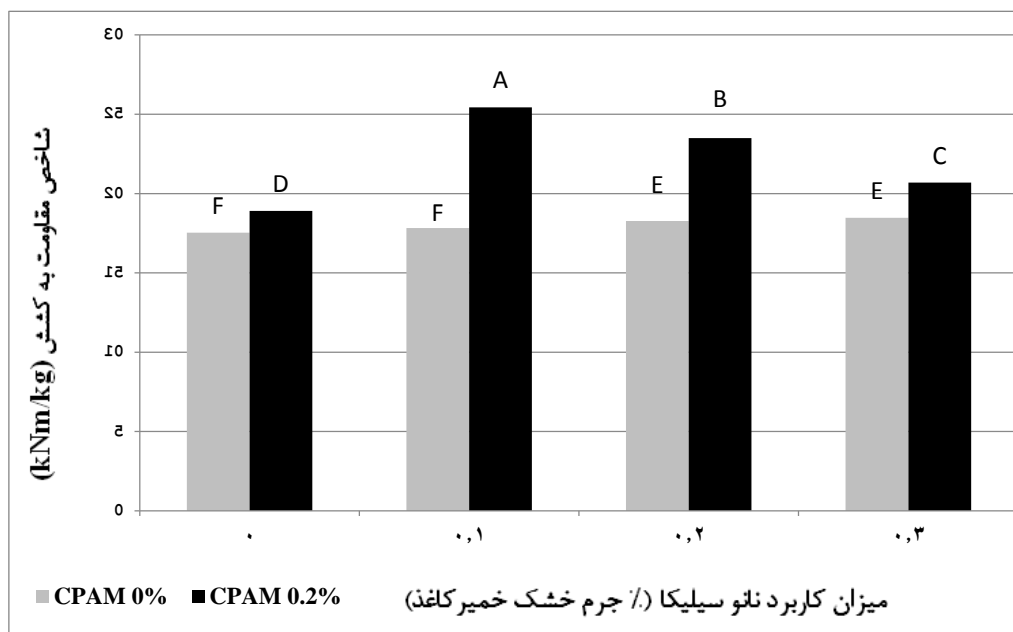
به همین دلیل، کاربرد نانوسیلیکا نتوانسته تغییر افزایشی معناداری بر ماندگاری بر جای گذارد. نتایج زمان آبیگری در ماشین ساخت کاغذ آزمایشگاهی نیز با نتایج ماندگاری سازگار است. نتایج ماندگاری

مقایسه با عدم استفاده از سامانه CPAM، نانوسیلیکا منجر به مقاوم‌تر شدن کاغذ آزمایشگاهی تولیدی شد. استحکام آفرینی چشمگیر کاغذ به کمک سامانه CPAM، نانوسیلیکا مرهون خنثی‌سازی بار آنیونی فراوان سیستم بازیافت کاغذ OCC، پل‌زنی پلیمر بلندزنجیره اکریلامید کاتیونی، تشکیل فلاک، و احتمالاً شکل‌گیری مناسب‌تر کاغذ در مقایسه با عدم کاربرد آن است. نقصان مقاومتی بروزیافته در سطوح بالاتر کاربرد نانوذره احتمالاً می‌تواند ناشی از دلمه‌سازی بیش از حد و تشکیل فلاک‌های بسیار بزرگ باشد که درهم‌ریختگی نسبی شکل‌گیری و در پی آن کاهش نسبی مقاومتی را سبب می‌شود. بهبود پیوسته مشاهده‌شده در ویژگی‌های ماندگاری، زمان آبگیری، و حجم آبگیری نیز می‌تواند نتایج یادشده را تأیید کند.

که در مقایسه با عدم کاربرد سامانه یادشده بیش از ۲ درصد افزایش در میزان ماندگاری حاصل شد. افزایش ماندگاری کل و ماندگاری پرکننده‌ها در کاغذهای چاپ و تحریر با کاربرد سامانه‌های CPAM، نانوذرات سیلیکا و بتونیت نیز گزارش شده است [۱].

شاخص مقاومت به کشش کاغذهای آزمایشگاهی

شاخص کششی کاغذهای تولیدشده از بازیافت کاغذهای کنگره‌ای کهنه با کاربرد نانوسیلیکا، نشاسته کاتیونی روند افزایشی ملایمی داشت و در بالاترین سطح نانوسیلیکای مورد مطالعه افزایش معنادار مقاومتی بیش از ۵ درصد یافت (شکل ۵). لیکن حضور منفرد پلیمر بلندزنجیره CPAM به طور بارز و معنادار موجب افزایش ۸ درصدی مقاومت در برابر کشش کاغذ تولیدی شد. به کار بردن نانوسیلیکا در همه سطوح ارتقای مقاومتی چشمگیری به وجود آورد و ۳۵ درصد در مقایسه با عدم کاربرد نانوسیلیکا و بیش از ۴۵ درصد در



شکل ۵. تأثیرپذیری شاخص کششی کاغذ از کاربرد نانوسیلیکا در حضور و عدم حضور پلی‌اکریلامید کاتیونی

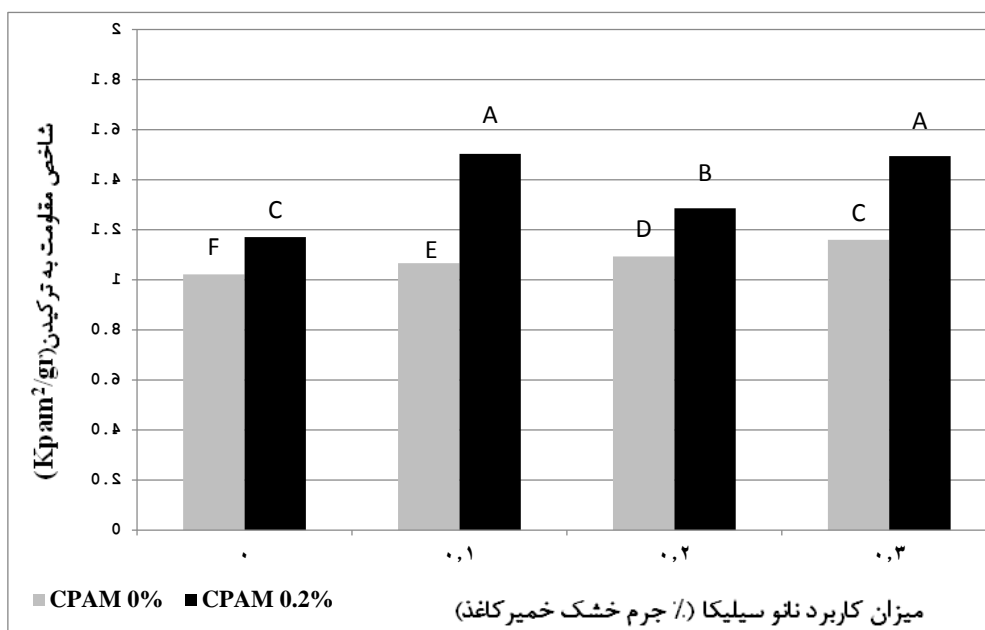
الیفای هر دو نقش توسط نشاسته کاتیونی، شاخص ترکیدن را به صورت شایان توجه ارتقا می‌دهد. سایر استدلال‌های ارائه شده در ویژگی شاخص کششی در این ویژگی نیز مصداق می‌یابد.

شاخص مقاومت به پارگی کاغذهای آزمایشگاهی

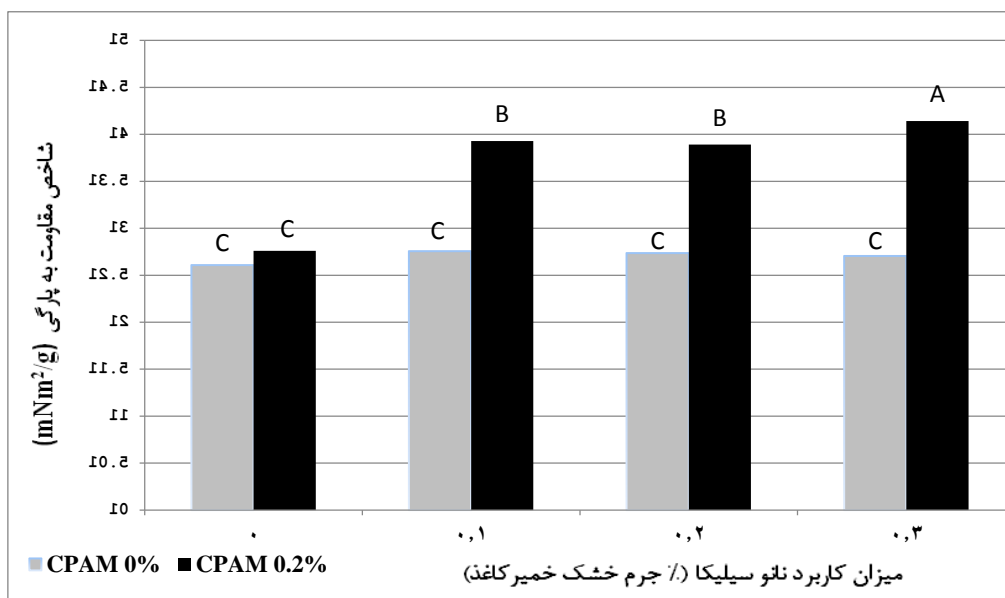
شاخص پارگی، که معرف چغرمگی و سفتی کاغذهای بسته‌بندی است و از منظر توانایی جذب تکانش‌ها و ضربات وارده حین حمل و نقل کارتن اهمیت دارد، علاوه بر کیفیت و کمیت پیوندیابی بین الیاف، تا حد زیادی تابع ویژگی‌های ذاتی الیاف است [۲۱]. شاخص پارگی به‌رغم افزایش جزئی در سامانه‌های نشاسته کاتیونی/نانوسیلیکا و نشاسته کاتیونی/CPAM تغییر معنادار دیگری در سایر تیمارها نداشت (شکل ۷).

شاخص مقاومت به ترکیدن کاغذهای آزمایشگاهی

شاخص ترکیدن کاغذهای بازیافتی، که مثلاً در کاغذهای کیسه سیمان بسیار مهم است، تأثیر افزایشی معنادار و پیوسته‌ای از افزودن نانوسیلیکا به دوغاب خمیرکاغذ حاوی نشاسته کاتیونی پذیرفت و افزایش حدود ۱۴ درصد تحمل نیروی وارده پیش از ترکیدن با کاربرد ۰٫۳ درصد نانوسیلیکا را به نمایش گذاشت (شکل ۶). با این حال افزودن فقط ۰٫۲ درصد CPAM به دوغاب خمیرکاغذ حاوی نشاسته کاتیونی نیز حدود ۱۵ درصد بهبود استحکام را در پی داشت. از طرفی همه سطوح کاربرد نانوسیلیکا جهش چشمگیری (تا حدود ۵۰٪) در مقاومت کاغذ به وجود آورد. بنابراین، فراهم‌سازی نقش خنثی‌سازی بارهای آنیونی برای پلیمر کوتاه‌زنجیره نشاسته و وانهادن وظیفه دلمه‌سازی بر عهده پلیمر بلندزنجیره CPAM و تقویت آن توسط نانوذره سیلیکا، به جای



شکل ۶. تأثیرپذیری شاخص ترکیدن کاغذ از کاربرد نانوسیلیکا در حضور و عدم حضور پلی‌اکریلامید کاتیونی



شکل ۷. تأثیرپذیری شاخص پارگی کاغذ از کاربرد نانوسیلیکا در حضور و عدم حضور پلی‌اکریلامید کاتیونی

در مقایسه با عدم حضور پلیمر بلندزنجیره اکریلامید کاتیونی موجب جداسازی آسان‌تر آب از دوغاب خمیرکاغذ و کاهش مدت زمان لازم برای تشکیل ورقه کاغذی و به عبارت دیگر افزایش بهره‌وری تولید می‌شود. تأثیر مثبت پلیمر اکریلامید بر بهبود رهایش آب، به‌ویژه با در نظر گرفتن سهم زیاد ریزه‌الیاف‌ها و مواد کلئیدی و معلق آنیونی در خمیرکاغذهای بازیافتی، شایان توجه است. این امر ناشی از اجتماع و کلوخه شدن نرمه‌ها و الیاف از طریق پل‌زنی و شبکه‌سازی و همچنین کمک به ختنی‌سازی هر چه بیشتر بار آنیونی سطحی اجزای دوغاب است، که پیش‌تر توسط نشاسته کاتیونی آغاز و به کاهش سطوح جانبی اجزای آب‌دوست، متراکم‌تر شدن کلوخه‌ها، و کاهش قابلیت نگهداری آب منجر شده است. در چنین سامانه‌هایی، میکرو و نانوذرات آنیونی نقش پل و ذره حدواسط را بین پلیمرهای کاتیونی نشست‌یافته بر سطح الیاف و

بهبود مکانیسم دلمه‌سازی در سامانه‌های CPAM/نانوسیلیکا و با حضور نشاسته کاتیونی، که منجر به توزیع و میرا کردن تنش برشی وارده درون فلاک‌های متراکم و محکم تشکیل شده می‌شود، به طور ملموس و معنادار (بیش از ۱۲٪) شاخص پارگی را ارتقا می‌بخشد. با اینکه معمولاً کمتر انتظار می‌رود شیمی پایانه‌تر کاغذسازی بر این ویژگی مقاومتی، به سبب تبعیت عمده از خصوصیات ذاتی الیاف، تأثیر خاصی داشته باشد، بهبود دلمه‌سازی خمیرکاغذ، به‌ویژه خمیرکاغذهای بازیافتی، که سرشار از ریزه‌الیاف‌هایی با قابلیت پیوندیابی ضعیف‌اند، توانسته بر مقاومت به پارگی اثرگذار باشد. موفق‌تر بودن سامانه‌های دلمه‌سازی مبتنی بر میکروذرات در مقایسه با سامانه‌های منفرد پلیمرهای رایج در پژوهش‌های دیگر نیز تأیید شده است [۶، ۸، ۹].

نتیجه‌گیری

سامانه متشکل از نشاسته کاتیونی/CPAM/نانوسیلیکا

نرمه‌ها ایفا می‌کند و علاوه بر متراکم و بزرگ‌تر شدن آن‌ها، که موجب ماندگاری بالاتر می‌شود، سهولت بیشتر خروج آب را نیز فراهم می‌آورد. بنابراین، با عنایت به طول زنجیره بلندتر پلیمرهای سنتزی، نظیر اکریلامید، به تشکیل فلاک‌های بزرگ‌تر و واجد اجزای بیشتر از دوغاب کمک می‌کند و همچنین نقش خنثی‌کننده اشغال‌های آنیونی و تکمیل وظیفه نشاسته کاتیونی را در به حداقل رساندن دافعه اجزای آنیونی دوغاب خمیرکاغذ و نگهداشت اجزای دوغاب بر توری شکل‌گیری ارتقا می‌بخشد که به مفهوم تولید اقتصادی‌تر با پیامدهای زیست‌محیطی کمتر است.

در حضور نشاسته کاتیونی، شاخص‌های مقاومت کششی و ترکیدن کاغذهای تولیدشده از بازیافت کاغذهای کنگره‌ای کهنه با کاربرد نانوسیلیکا روند افزایشی معنادار داشت؛ لیکن سامانه دوپلیمری نشاسته کاتیونی/CPAM در مقایسه با آن دارای برتری عمدتاً معنادار بود. اضافه شدن نانوسیلیکا در همه سطوح و به‌ویژه در حضور هر دو پلیمر مطالعه‌شده ارتقای مقاومت چشمگیری به وجود آورد و به مقاوم‌تر شدن معنادار کاغذ آزمایشگاهی تولیدی

منجر شد. خنثی‌سازی بار آنیونی فراوان سیستم بازیافت کاغذ OCC، پل‌زنی پلیمر بلندزنجیره اکریلامید کاتیونی، تشکیل فلاک، و احتمالاً شکل‌گیری مناسب‌تر کاغذ در مقایسه با عدم کاربرد آن بهبود پیوندیابی شبکه الیاف را در پی داشت؛ لیکن دلمه‌سازی بیش از حد و تشکیل فلاک‌های بسیار بزرگ و درهم‌ریختگی شکل‌گیری و در پی آن کاهش مقاومت‌های کششی و ترکیدن در سطوح بالاتر کاربرد نانوذره نیز ایجاد شد. توزیع و مستهلک کردن تنش برشی وارده توسط آزمونگر پارگی درون فلاک‌های متراکم و محکم تشکیل‌شده بر اثر بهبود مکانیسم دلمه‌سازی در سامانه‌های CPAM، نانوسیلیکا در حضور نشاسته کاتیونی ارتقای ملموس و معناداری شاخص پارگی را نیز سبب می‌شود. به طور کلی، در حضور نشاسته کاتیونی کاربرد منفرد پلیمر اکریلامید کاتیونی در مقایسه با سیلیکای آنیونی در همه ویژگی‌های مطالعه‌شده کارآمدتر بود و موجب ارتقای ویژگی‌ها در مقایسه با عدم کاربرد این دو افزودنی شد.

References

- [1]. Vishtal, A., Rousu, P., Hultholm, T., Turku, K., Paananen, P., and Käyhkö, J. (2011). Drainage and retention enhancement of a wheat straw-containing pulp furnish using microparticle retention aids. *BioResources*, 6(1), 791-806.
- [2]. Hubbe, M. A. (2005). *Emerging Technologies in Wet-End Chemistry*. Chapter 2: Nanotechnology in the Wet End. PIRA International Ltd, 3-28.
- [3]. Cauley, T. A. (2000). The Hydrocol Microparticle System comes to Standard News Production, TAPPI 2000 Papermakers Conf. Trade Fair, 545.
- [4]. Main, S. and Simpson, P. (1999). Retention Aids for High Speed Paper Machines. *TAPPI Journal*, 82(4):78.
- [5]. Hubbe, M. A. (2005). Microparticle Programs for Drainage and Retention, in: *Micro and Nanoparticles in Papermaking*, Rodriguez JM(Ed), TAPPI PRESS, Georgia, Atlanta, 1-33.
- [6]. Sang, Y., McQuaid, M., and Englezos, P. (2012). Pre flocculation of precipitated calcium carbonate filler by cationic starch for highly filled mechanical grade paper. *Bioresources*, 7(1), 354-373.
- [7]. Wang, S., Sun, X., You, F., Dai, H., Mao, S., and Wang, J. (2012). Application of cationic modified carboxymethyl starch as a retention and drainage aid in wet end system. *Bioresources*, 7(3): 3870-3882.
- [8]. Asselman, T. and Garnier, G. (2001). The flocculation mechanism of microparticulate retention aid systems", *Journal of pulp and paper science*, 27(8): 273-278.
- [9]. Khosravani, A. and Rahmaninia, M. (2013). The potential of nanosilica – cationic starch wet end system for applying higher filler content in fine paper. *Bioresources* 8(2): 2234-2245.
- [10]. Xu, Q. H., Li, W. G., Cheng, Z. L., Yang, G., and Qin, M. H. (2014). TEMPO/NaBr/ NaClO - mediated surface oxidation of nanocrystalline cellulose and its micro particulate retention system with cationic polyacrylamide. *Bioresources*, 9(1): 994-1006.
- [11]. Allen, L. H. and Lapointe, C. L. (2005). Effectiveness of retention aids for pitch control in TMP newsprint manufacture. Part I: Low shear. *Pulp & Paper Canada Journal*, 106(12): 102-107.
- [12]. Nicu, R., Bobu E., and Desbrieres, J. (2011). Chitosan as cationic polyelectrolyte in wet-end papermaking systems. *Cellulose Chemistry and Technology* 45 (1-2): 105-111.
- [13]. 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.
- [14]. Khosravani, A., Jahan Latibari, A., Tajvidi, M., Mirshokraee, S. A., and Nazhad M. M. (2010). Studying the influence of cationic starch dosage on performance of anionic nanosilica – cationic starch system in fine paper. *Journal of Forest and Wood Products*, 63 (1): 1-8.
- [15]. Wang, L. and Zhang, Y. (2013). Influence of Anionic Trash Catcher Pretreatment on the Effectiveness of Dry Strengthening Agent. *Bioresources*, 8(4), 6078-6086.
- [16]. Zhang, H., Hu, H., He, Z., and Ni, Y. (2009). Highly substituted cationic starch as an anionic trash catcher for high yield pulp containing furnish. *TAPPI Journal*, July, 31-36.
- [17]. 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.

- [18]. Rudi, H., Ebrahimi, G., Hamzeh, Y., Behrooz, R., and Nazhad, M. M. (2012). The effect of degree of substitution of cationic starch on multi-layer formation of ionic starches in recycled fibers. *Iranian Journal of Polymer Science and Technology*, 25(1): 11-18.
- [19]. Krogerus, B. (2000). *Papermaking Chemistry*, Chapter 4, Laboratory testing of retention and drainage. Helsinki University of Technology.
- [20]. Wagberg, L., Zhao X. P., Fineman I., and Li F. N. (1990). Effects of retention aids on retention and dewatering of wheat straw pulp. *TAPPI Journal*, 73(4): 177-182.
- [21]. Niskanen, K. (2008). *Paper Physics*, Chapter 2, Fibres and Bonds, Helsinki University of Technology.