

## استفاده از نانو الیاف سلولزی به جای خمیر کاغذ الیاف بلند در ساخت کاغذ از باگاس

### چکیده

در این پژوهش، استفاده از افزودنی‌های نانو الیاف سلولزی و لیگنوسلولزی، نشاسته کاتیونی و پلی‌اکریل‌آمید کاتیونی به خمیر کاغذ باگاس و تاثیر آنها بر مقاومت‌های مکانیکی کاغذ دست‌ساز با هدف جایگزینی آنها با خمیر کاغذ الیاف بلند سوزنی برگ وارداتی در کارخانه کاغذ پارس مورد بررسی قرار گرفت. به این منظور ابتدا نمونه‌های خمیر کاغذ باگاس با افزودن ۳ درصد نانو الیاف سلولزی، ۳ درصد نانو الیاف لیگنوسلولزی، نشاسته کاتیونی در سه سطح ۰/۵، ۰/۷ و ۱ درصد و پلی‌اکریل‌آمید کاتیونی نیز در سه سطح ۰/۰۳، ۰/۰۵ و ۰/۱ درصد به طور مجزا بررسی شد. در مرحله بعد ۳ درصد نانو الیاف سلولزی و ۳ درصد نانو الیاف لیگنوسلولزی همراه ۰/۵ درصد نشاسته و یا ۰/۰۵ درصد پلی‌اکریل‌آمید کاتیونی مخلوط شد. نتایج نشان داد که افزودن نانو الیاف سلولزی به همراه پلی‌اکریل‌آمید و نشاسته کاتیونی باعث افزایش مقاومت‌ها به صورت معنی‌دار شد. بهترین تیمار مربوط به افزودن ۳ درصد نانو الیاف لیگنوسلولزی همراه ۰/۵ درصد نشاسته کاتیونی بود که مقاومت کششی و ترکیب آن بیش‌تر و مقاومت به پارگی و تا خوردگی آن کمتر از تیمار حاوی ۱۲/۵ درصد خمیر کاغذ الیاف بلند بود. تیمار مذکور در مقایسه با کاغذ ساخته شده از خمیر کاغذ باگاس خالص شاهد، رشد شاخص‌های مقاومت کششی، مقاومت به ترکیب، مقاومت به پارگی و مقاومت به تا خوردگی به ترتیب ۱۶/۵۷، ۸/۴۷، ۹/۷۷ و ۱۶۸/۸۵ درصد را نشان داد.

**واژگان کلیدی:** باگاس، نانو الیاف سلولزی، نانو الیاف لیگنوسلولزی، نشاسته، کاغذسازی.

رضا غفران<sup>۱</sup>

محمدهادی مرادیان<sup>۲</sup>

محمدعلی سعادت‌نیا<sup>۳</sup>

پژمان رضایتی چرانی<sup>۴\*</sup>

<sup>۱</sup> دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه صنعتی خاتم الانبیا بهبهان، بهبهان، ایران

<sup>۲</sup> استادیار گروه صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه صنعتی خاتم الانبیا بهبهان، بهبهان، ایران

<sup>۳</sup> استادیار گروه صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه صنعتی خاتم الانبیا بهبهان، بهبهان، ایران

<sup>۴</sup> استادیار گروه صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه صنعتی خاتم الانبیا بهبهان، بهبهان، ایران

مسئول مکاتبات:

[rezayati@bkatu.ac.ir](mailto:rezayati@bkatu.ac.ir)

تاریخ دریافت: ۹۴/۱۰/۳۰

تاریخ پذیرش: ۹۵/۰۳/۰۱

ضروری کرده است. با توجه به کمبود ماده اولیه موردنیاز صنعت کاغذسازی در جهان و ایران توجه خاصی به منابع غیرچوبی مانند باگاس شده است. بررسی‌ها نشان داده است که ویژگی‌های مناسب باگاس از لحاظ ابعاد فیبر و میزان ترکیب‌های شیمیایی، در زمره مواد اولیه مناسب برای استفاده در صنایع کاغذسازی قرار داشته و نسبت به پهن برگان بومی و سایر گیاهان غیرچوبی کشور اولویت دارد [۲، ۱]. از طرفی دیگر امروزه با معرفی مواد افزودنی جدید و نانو ساختارها، تحقیقات در زمینه بهبود

### مقدمه

الیاف سلولزی ماده‌ای طبیعی است که از گیاهان چوبی و غیرچوبی به دست می‌آید. این ماده دوستدار محیط‌زیست و تجدید پذیر در سطح وسیعی در صنایع خمیر و کاغذ مورد استفاده قرار می‌گیرد. مصرف روزافزون کاغذ در کشور ایران و در پی آن، ایجاد فشار بیش‌ازحد بر جنگل‌ها و محیط‌زیست لزوم توجه و اهتمام به صرفه‌جویی و اصلاح الگوی تولید و مصرف در این بخش برای تعدیل روند استفاده افراط‌آمیز و برخلاف اهداف توسعه پایدار را

خمیر کاغذ، تأثیر مثبت بیشتری بر خواص مقاومتی مکانیکی کاغذ حاصل می‌تواند داشته باشد [۱۴].

با این وجود در صورت افزودن بسیار کاتیونی بعد از نانوذره با بار منفی تأثیر مثبت بیشتری در ماندگاری نانوذره آنیونی و نیز کاهش افت میزان زهکشی به دلیل عمل دلمه سازی، قابل انتظار است [۱۵]. پیش‌بینی می‌شود با ماندگاری حداکثری نانو الیاف سلولزی در ساختار کاغذ بتوان به خواص مقاومتی مکانیکی مناسب‌تری در کاغذ دست یافت. یکی از دغدغه‌های دیگر کاربرد نانو الیاف سلولزی، هزینه تولید است که در رابطه با امکان اقتصادی نمودن کاربرد نانو الیاف سلولزی در صنایع کاغذسازی، با توجه به تحقیقات اسپنس<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۱۱) هزینه مواد و انرژی مصرفی برای تولید نانو الیاف سلولزی از منابع مختلف به روش‌های مختلف از ۱۱۵ تا ۱۹۶۰ دلار در هر تن نانو الیاف محاسبه شده است [۱۶]. همچنین انکرفورس (۲۰۱۲) با استفاده از پیش تیمار کربوکسیل متیل الیاف سلولزی، برق مصرفی برای تولید یک تن نانو الیاف سلولزی را به ۵۰۰ کیلووات ساعت کاهش داد [۱۷]؛ بنابراین پس از سرمایه‌گذاری اولیه برای تجهیزات می‌توان انتظار تولید نانو الیاف سلولزی با قیمت صنعتی مناسب برای مصرف محدود آن در نظر گرفت. مضافاً اینکه درصد استفاده از نانو الیاف سلولزی در تحقیقات گذشته به مقدار ۴۰، ۲۰، ۱۰ و ۶ درصد گزارش شده است [۱۱، ۱۲، ۱۳] که در شرایط تحقیق حاضر به ۳ درصد کاهش یافته است. در رابطه با کاربرد صنعتی نانو الیاف سلولزی در قیاس با دیگر افزودنی‌های متداول، مقالات فراوان مروری تاکنون منتشر شده است که در موضوع بحث این مقاله قرار ندارد. فقط به این نکته بسنده می‌شود که تحقیقات دنبال راه‌هایی برای تولید صنعتی نانو الیاف سلولزی از خمیر کاغذ و استفاده از آن برای بهبود ویژگی‌های کاغذ تولیدی از همان خمیر کاغذ است و مراحل نیمه‌صنعتی آن مدتی است شروع شده است به طوری که در سال ۲۰۱۵ میلادی حدود ۱۰ شرکت در این حوزه مشغول فعالیت بوده‌اند [۱۸].

در تحقیق حاضر سعی شده است به بررسی ترکیبی افزودنی‌های نانو الیاف سلولزی همراه با نشاسته و پلی

ویژگی‌های کاغذ به طور گسترده و مستمر در جریان بوده و این کار با هدف کاهش هزینه‌ها و دستیابی به خواص مناسب‌تر انجام می‌شود [۴، ۳]. لذا تولید به صرفه کاغذ با روش‌های نوین و افزودن نانو ساختارها برای کاهش یا حذف استفاده از خمیر کاغذ الیاف بلند وارداتی از کشورهای مختلف جهت رقابت با شرکت‌های بزرگ تولیدی، در کارخانه کاغذسازی مانند صنایع کاغذ پارس امری ضروری است. امروزه این صنایع برای بهبود برخی از مقاومت‌های مکانیکی کاغذ تولیدی از نشاسته کاتیونی استفاده می‌کنند که به دلیل مشکلات فرآیندی امکان استفاده زیاد آن محدود است. در این راستا سعی در استفاده ترکیبی از نشاسته و خمیر کاغذ الیاف بلند وارداتی است. همچنین گزارش‌های تحقیقات اخیر دلالت بر نقش برجسته نانو الیاف سلولزی در بهبود مقاومت‌های کاغذ دارد [۴، ۵، ۶، ۷]. این تحقیقات نشان داده است که استفاده از نانو الیاف سلولزی می‌تواند در تولید کاغذ باعث افزایش مقاومت کششی و اتصال بین فیبرها شود اما بعضاً باعث کاهش مقاومت به پارگی کاغذ و افزایش مقاومت به زهکشی نیز می‌شود [۸].

افزودن نانو الیاف سلولزی موجب کاهش قابلیت آبگیری خمیر کاغذ می‌شود اما افزودن بسیار کاتیونی تا حدی این کاهش را جبران می‌کند. جبران افت زیاد درجه روانی ناشی از افزایش نانو الیاف از طریق دلمه سازی الیاف و نرمه‌های سوسپانسیون توسط بسیارهای کاتیونی می‌تواند صورت گیرد [۹]. از دیگر اثرات افزودن نانو الیاف سلولزی می‌توان به کاهش تخلخل و افزایش اتصال داخلی و مقاومت در مقابل عبور هوا اشاره نمود [۵، ۱۰، ۱۱]. در اکثر تحقیقات کاربرد نانو الیاف سلولزی برای کاغذسازی، یک بسیار کاتیونی به عنوان کمک نگه‌دارنده استفاده می‌شود [۱۱، ۱۲، ۱۳]. در این تحقیقات، از نانو الیاف سلولزی همراه پلی‌اکریل‌امید کاتیونی برای تقویت کاغذ استفاده شده است اما استفاده ترکیبی از نانو الیاف سلولزی به همراه نشاسته کاتیونی و نیز در مورد تقدم افزودن این مواد به سوسپانسیون خمیر کاغذ هنوز تحقیقات چندانی منتشر نشده است. با این وجود به عنوان یک قاعده عمومی کاربرد بسیار کاتیونی قبل از نانوذره واجد بار منفی مانند نانو الیاف سلولزی به سوسپانسیون

اثرات منفی کاربرد این افزودنی‌ها بر خواص فرآیندی تولید و فیزیک کاغذ نهایی در نظر گرفته شد.

### مواد و روش‌ها

در این تحقیق از خمیر کاغذ سودای باگاس، نانو الیاف لیگنوسولوزی (NLH)، نانو الیاف سلولوزی باگاس (NCB)، نشاسته کاتیونی و همچنین بسپار پلی اکریل آمید کاتیونی به ترتیب با مشخصات جدول ۱ و ۲ استفاده شد.

اکریل آمید کاتیونی به منظور جایگزینی آن‌ها با خمیر کاغذ الیاف بلند وارداتی پرداخته شود. لذا این تحقیق با هدف افزودن و تعیین سطح بهینه از افزودنی‌های نانو الیاف سلولوزی و لیگنوسولوزی همراه نشاسته و پلی‌اکریل‌آمید کاتیونی به خمیر کاغذ باگاس تولیدی از کارخانه کاغذ پارس برای امکان‌سنجی جایگزینی آن با خمیر کاغذ الیاف بلند در مقیاس آزمایشگاهی انجام شد. همچنین استراتژی پایانه تر در افزایش ماندگاری نانو الیاف سلولوزی و در پایانه خشک بهبود ویژگی‌های مکانیکی کاغذ ضمن اجتناب از

جدول ۱- مواد اولیه و مشخصات آن‌ها

الیاف سلولوزی	منشأ	روش تولید	شرکت تولیدکننده
خمیر کاغذ	باگاس	سودا	کارخانه کاغذ پارس
نانو الیاف لیگنوسولوزی (NLH)	خمیر کاغذ شیمیایی-مکانیکی رنگ‌بری نشده تولیدی صنایع چوب و کاغذ مازندران	سوپر آسیاب مکانیکی	شرکت تعاونی دانش‌بنیان نانو نوین پلیمر
نانو الیاف سلولوزی باگاس (NCB)	خمیر کاغذ رنگ‌بری شده باگاس از کارخانه کاغذ پارس	هوموژنایزر	شرکت صنعتی توسعه بسپارش نانو سلولوزی کاسپین
نشاسته کاتیونی	ذرت	صنعتی	شرکت گلوکوزان

جدول ۲- مشخصات بسپار پلی‌اکریل‌آمید

بسپار	نام تجاری	وزن مولکولی	چگالی بار	ویژگی‌ها
پلی‌اکریل‌آمید کاتیونی (cPAM)	PL 15 20	۷ میلیون گرم بر مول	۲۰ درصد	جزء بسپارهای با وزن مولکولی زیاد و چگالی بار الکتریکی کم

### روش آماده‌سازی نشاسته کاتیونی

نشاسته کاتیونی مورد استفاده در این پژوهش دارای pH حدود ۶، درجه‌استخلاف (D.S.)<sup>۲</sup> حدود ۲ mol/mol ۰/۳۵، میزان پروتئین ۱/۵ درصد، نیتروژن ۰/۲۵ درصد و رطوبت نیز ۱۰ درصد بر اساس وزن مرطوب بود. برای تهیه محلول نشاسته با غلظت ۰/۵ gr/c درصد (یعنی ۰/۵ گرم نشاسته خالص در ۱۰۰ سی‌سی محلول آب و نشاسته)، مقدار نشاسته ناخالص مورد نیاز با در نظر گرفتن درصد رطوبت تعیین شد. مقدار ناخالص تعیین شده در یک ارلن ریخته و حجم آن با آب مقطر به ۱۰۰ رسید. در حین هم زدن دما درون ارلن با یک دماسنج کنترل و روی درب ارلن نیز یک ورقه فویل برای جلوگیری از تبخیر آب قرار

داده شد. با قرار دادن ارلن روی هیتر در مدت ۳۰ دقیقه دما به آرامی به ۹۰ درجه سانتی‌گراد رسیده و سپس به مدت ۳۰ دقیقه در این دما نگهداری گردید. محلول نشاسته حاصل هر روز به صورت تازه آماده و مورد مصرف قرار گرفت تا از تغییرات ویسکوزیته و غلظت ناشی از اثرات محیطی جلوگیری شود.

### روش آماده‌سازی پلی‌اکریل‌آمید کاتیونی (cPAM)

بسپار پلی‌اکریل‌آمید کاتیونی به روش چرانی (۲۰۱۳) آماده‌سازی شد [۱۰]. به این منظور ابتدا ۰/۰۱ گرم از پلی‌اکریل‌آمید، درون یک بالن ۱۰۰ میلی‌لیتری ریخته شد. سپس ۱/۵ میلی‌لیتر اتانول به آن اضافه و پس از ۲ دقیقه، ۵۰ میلی‌لیتر آب مقطر به داخل بالن اضافه و به

1- Degree of substitution

بود، به مقدار لازم به سوسپانسیون خمیر کاغذ اضافه شد و به مدت ۶۰ ثانیه دیگر سوسپانسیون حاصل (با همان دور) هم زده شد. در ادامه نشاسته کاتیونی به سوسپانسیون اضافه و به مدت ۶۰ ثانیه دیگر با همان دور هم زده شد و سپس در داخل محفظه سیستم ساخت کاغذ دست‌ساز ریخته شد.

برای تهیه کاغذهای ترکیبی با افزودن پلی‌اکریل‌آمید کاتیونی، مانند بالا عمل شد فقط به جای نشاسته از پلی-اکریل‌آمید کاتیونی با درصد خشکی ۰/۰۵ درصد استفاده و پس از اضافه کردن پلی‌اکریل‌آمید مخلوط ۴ دقیقه با دور ۲۲۰۰ بر دقیقه به هم زده شد.

مطابق با استانداردهای آیین‌نامه TAPPI<sup>۲</sup> اندازه‌گیری درجه روانی خمیر کاغذ (T 227 om-04)، ساخت کاغذ دست‌ساز (T 205sp-02)، پالایش خمیر کاغذ با دستگاه PFI Mill (T248 sp-08)، ضخامت (T 411 om-05)، گراماژ (T 410 om-02)، ویژگی‌های کششی (T 404 cm-92)، مقاومت به ترکیدن (T403 om-02)، مقاومت به پارگی (T 414om-98) و مقاومت به تاخوردگی (T511om-96) انجام شد.

### نتایج و بحث

#### مقاومت‌های کاغذهای دست‌ساز حاوی

##### خمیر کاغذ الیاف بلند

شکل ۱ تأثیر درصدهای مختلف اختلاط خمیر کاغذ الیاف بلند (۰، ۱۰، ۱۲/۵، ۱۵ درصد) با خمیر کاغذ باگاس بر مقاومت‌های ترکیدن، پارگی، کشش و تاخوردگی کاغذهای دست‌ساز را نشان می‌دهد. با توجه به آزمون تجزیه واریانس میانگین شاخص مقاومت به ترکیدن، پارگی، کشش و تاخوردگی از اختلاف معنی‌دار در سطح اطمینان ۹۹ درصد برخوردار بود. گروه‌بندی دانکن نیز ۴ تیمار مختلف را در گروه‌های مجزا قرار داد. با افزایش خمیر کاغذ الیاف بلند تغییرات میانگین کلیه مقاومت‌های کاغذ افزایش یافته است. بدیهی است خمیر کاغذ الیاف بلند سوزنی‌برگ به علت طول زیاد و افزایش ضریب درهم‌رفتگی الیاف باعث افزایش پیوند شده و مقاومت‌ها را افزایش داده است.

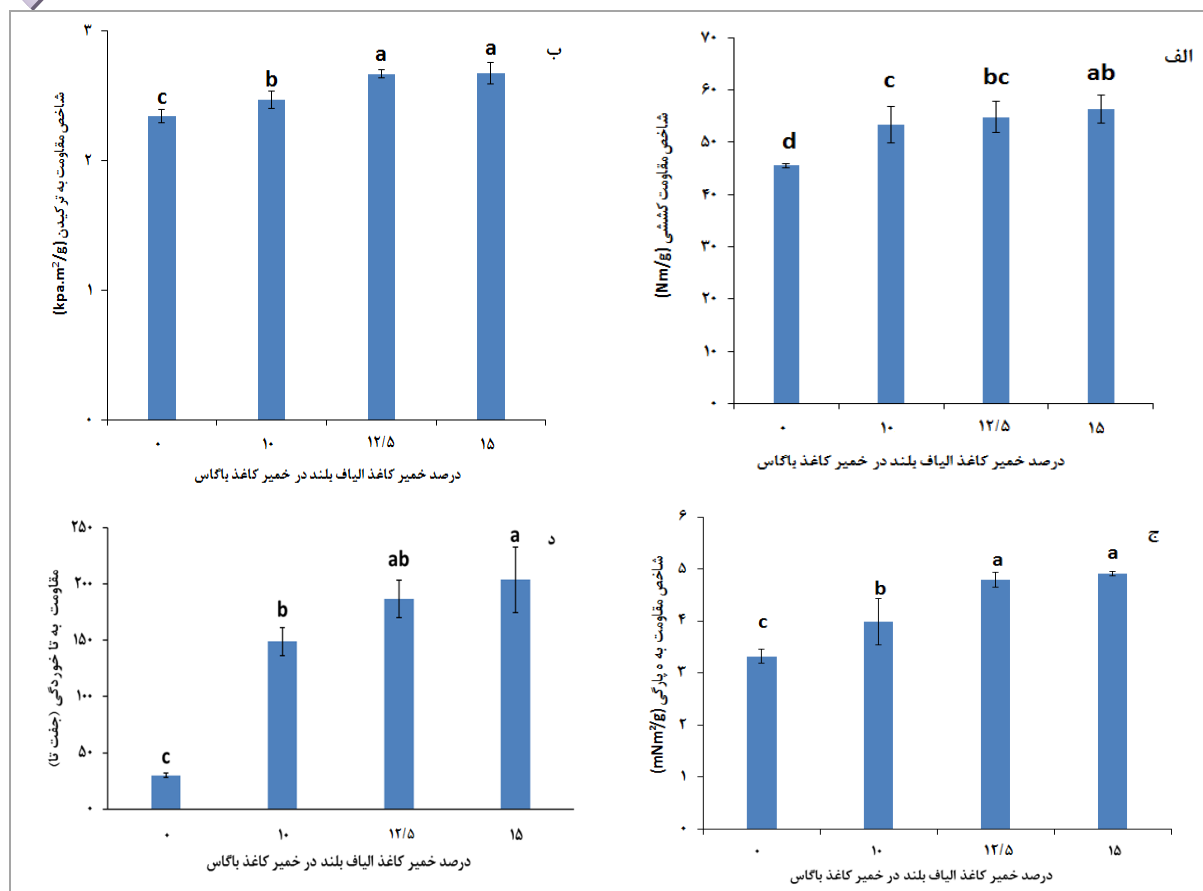
مدت ۲ دقیقه با دست تکان داده شد. محتویات بالن با کمک یک مگنت به مدت ۳ ساعت هم زده شد. بالن حاوی بسیار حدود ۲۴ ساعت در یخچال نگه‌داری شد. سپس هنگام استفاده محتویات بالن با آب مقطر به حجم ۱۰۰ میلی‌لیتر رسانده و به مدت ۱۰ دقیقه هم زده شد. محلول بسیار ساخته‌شده که دارای غلظت ۰/۰۱ درصد بود، برای ماندگاری نانو الیاف در سوسپانسیون خمیر کاغذ جهت ساخت کاغذ دست‌ساز مورد استفاده قرار گرفت.

#### ترتیب افزودن مواد

در مورد ترتیب افزودن آنیون و کاتیون به خمیر کاغذ تحقیقات زیادی صورت گرفته است که هر یک بسته به شرایط می‌تواند مزایایی داشته باشد [۱۵]. در پروژه حاضر نانو الیاف سلولزی به‌عنوان آنیون و نشاسته کاتیونی و پلی‌اکریل‌آمید کاتیونی به‌عنوان کاتیون به خمیر کاغذ اضافه شدند. در صورت اضافه کردن بسیار کاتیونی در ابتدا مسلماً بخشی از الیاف توسط بسیار به هم متصل می‌شوند؛ بنابراین بخشی از بار کاتیونی بسیار صرف اتصال الیاف خواهد شد. در این صورت با اضافه کردن نانو الیاف در مرحله دوم بخشی از نانو الیاف به قسمت‌های باردار بسیار چسبیده و بخشی نیز به‌صورت محلول در سیستم باقی خواهد ماند که با زهکشی خارج خواهد شد. به نظر می‌رسد که در صورت اضافه کردن نانو الیاف در ابتدا، مقدار زیادی از نانو الیاف در سوسپانسیون به‌صورت غیر اتصالی به الیاف در محلول باقی بماند و پس از افزودن بسیار کاتیونی، نانو الیاف به‌شدت میل به جذب به بسیار را خواهد داشت و بنابراین میزان کمتری از نانو الیاف با زهکشی نهایی از سوسپانسیون خمیر خارج می‌شود. لذا در این تحقیق برای حفظ حداکثر نانو الیاف در کاغذ، ابتدا این ماده اضافه شد.

#### تهیه سوسپانسیون خمیر کاغذ

برای تهیه کاغذهای ترکیبی با افزودن نانو الیاف و نشاسته کاتیونی، ابتدا سوسپانسیون خمیر کاغذ با ۰/۳ درصد خشکی با دستگاه همزن با ۲۲۰۰ دور در دقیقه به مدت ۶۰ ثانیه هم زده شد. سپس سوسپانسیون نانو الیاف با همان درصد خشکی (۰/۳ درصد) که از قبل آماده شده



شکل ۱- تأثیر درصدهای مختلف اختلاط خمیر کاغذ الیاف بلند با خمیر کاغذ باگاس بر شاخص‌های مقاومت به ترکیب، پارگی، تا خوردگی و کششی کاغذهای دست‌ساز

بزرگ، شاخص مقاومت کششی را کاهش دهد. همچنین افزودن نانو الیاف لیگنوسلولزی پهن برگان در مقایسه با نانو الیاف سلولزی باگاس افزایش بیشتری در شاخص مقاومت کششی کاغذ ایجاد کرده است.

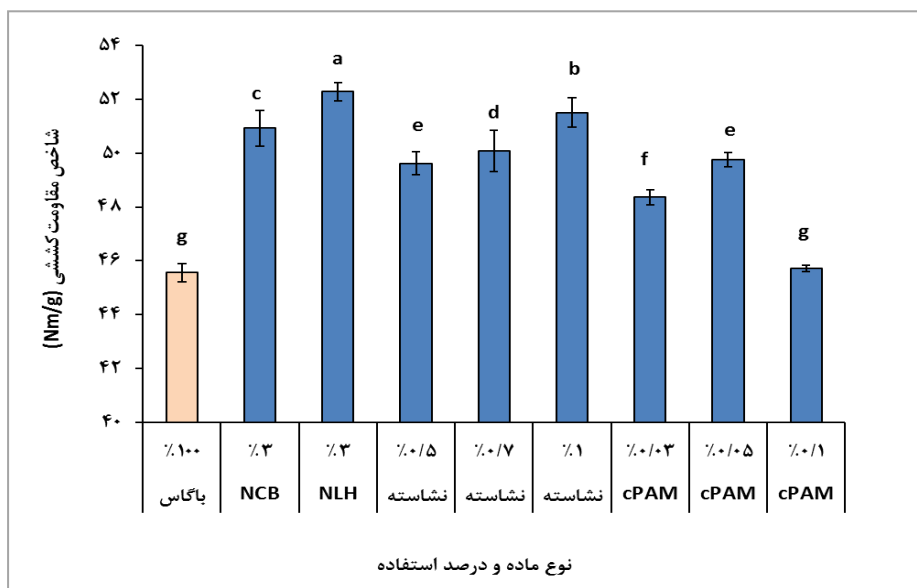
رضایتی و همکاران، اقدام به استفاده از نانو الیاف سلولزی در ساخت کاغذ نموده و گزارش دادند که استفاده از حدود ۶ درصد نانو الیاف سلولزی بهبود مقاومت کششی معادل استفاده از ۲۰ درصد خمیر کاغذ الیاف بلند در ساخت کاغذ از خمیر کاغذ کرافت پهن برگان فراهم می‌سازد [۱۰]. همچنین Sehaqui و همکاران (۲۰۱۳) در گزارشی مشخص نمودند که باقی ماندن نرمه‌ها و نانو الیاف در فضای بین الیاف موجب کاهش تخلخل می‌گردد که در نتیجه آن اتصالات فیبر-فیبر و مقاومت کششی بهبود می‌یابد [۹]. در همین راستا، جعفری پطردی اعلام نموده است که با افزایش سطح اختلاط نانو الیاف سلولزی از ۱ تا ۵ درصد ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی کاغذ بهبود

### تأثیر نانو الیاف سلولزی، نشاسته و پلی‌اکریل‌آمید کاتیونی بر شاخص مقاومت کششی

گروه‌بندی دانکن میانگین‌های شاخص مقاومت کششی افزودنی‌های نانو الیاف سلولزی و لیگنوسلولزی، نشاسته و پلی‌اکریل‌آمید کاتیونی را به تفکیک در ۷ گروه مجزا قرار داد (شکل ۲). بیش‌ترین مقاومت کششی مربوط به خمیر کاغذ نانو لیگنوسلولزی به مقدار ۵۲/۶۳ Nm/g بود که در گروه a قرار گرفت. همچنین مقاومت کششی با افزایش درصد نشاسته کاتیونی سیر صعودی داشته است ولی افزودن پلی‌اکریل‌آمید کاتیونی تا ۰/۰۵ درصد افزایش مقاومت و در ۰/۱ درصد کاهش شاخص مقاومت کششی را نشان داد. افزودن کم پلی‌اکریل‌آمید کاتیونی به دلیل نگه‌داشتن بیش‌تر نانو الیاف و نرمه‌ها و افزایش پیوندهای ممکن شاخص مقاومت کششی کاغذ را بهبود داده اما افزودن مقادیر بیش‌تر پلی‌اکریل‌آمید می‌تواند با به هم زدن شکل‌گیری خمیر کاغذ از طریق ایجاد دلمه‌های

۱۵ درصد خمیر کاغذ الیاف بلند را دارد اما به دلیل مشکلات فرآیندی ناشی از استفاده زیاد نشاسته قابل توصیه نیست. با این وجود استفاده ترکیبی از نشاسته کم تر و نانو الیاف سلولزی دلالت بر قابلیت کاربردی آن جهت جایگزینی الیاف بلند وارداتی در تولید کاغذ از باگاس داشته است [۱۲].

یافته است. همچنین پلی اکریل آمید کاتیونی منجر به بهبود ماندگاری نانو الیاف سلولزی در بافت کاغذ شده و کاغذهای حاوی این ماده دارای بیشترین ویژگیهای مقاومتی بودند [۱۱]. مرادیان و همکاران در تحقیقی گزارش داده‌اند برای تأمین مقاومت کششی مناسب کاغذ، استفاده از ۱ درصد نشاسته کاتیونی قابلیت جایگزینی با

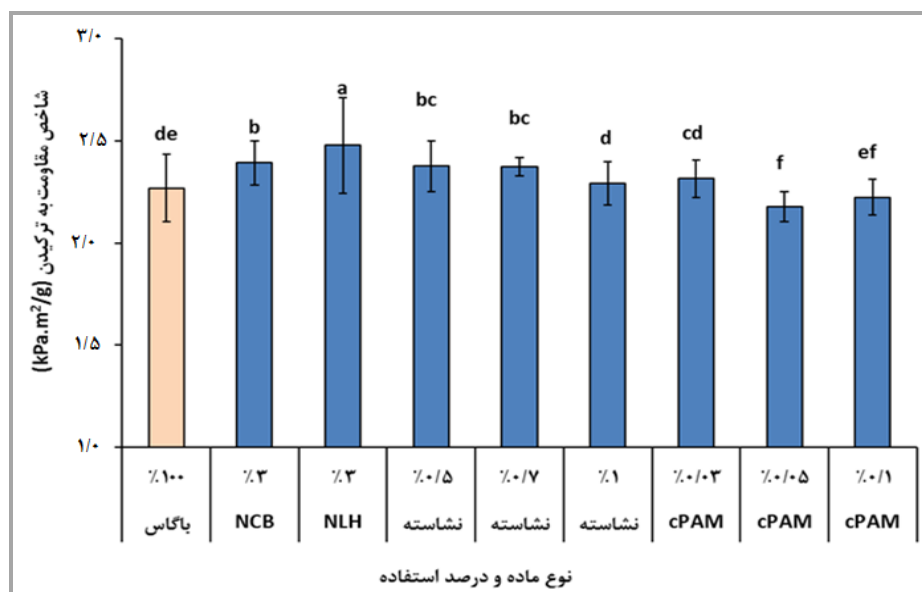


شکل ۲- تأثیر افزودن نانو الیاف سلولزی باگاس (NCB)، نانو الیاف لیگنوسلولزی پهن‌برگ (NLH)، نشاسته و پلی‌اکریل‌آمید کاتیونی (cPAM) بر شاخص مقاومت کششی کاغذ دست‌ساز

الیاف و نشاسته در یک گروه قرار گرفته و بیشترین مقاومت‌ها را نشان می‌دهند ولی تیمارهای پلی‌اکریل‌آمید کاتیونی کم‌ترین مقاومت را نشان داده است که به نظر می‌رسد دلیل آن به هم خوردگی جزئی شکل‌گیری کاغذ باشد. همچنین افزودن نانو الیاف لیگنوسلولزی پهن‌برگ در مقایسه با نانو الیاف سلولزی باگاس افزایش بیشتری در مقاومت به ترکیدن کاغذ ایجاد کرده است.

### تأثیر نانو الیاف سلولزی، نشاسته و پلی‌اکریل‌آمید کاتیونی به تفکیک بر شاخص مقاومت به ترکیدن کاغذ دست‌ساز

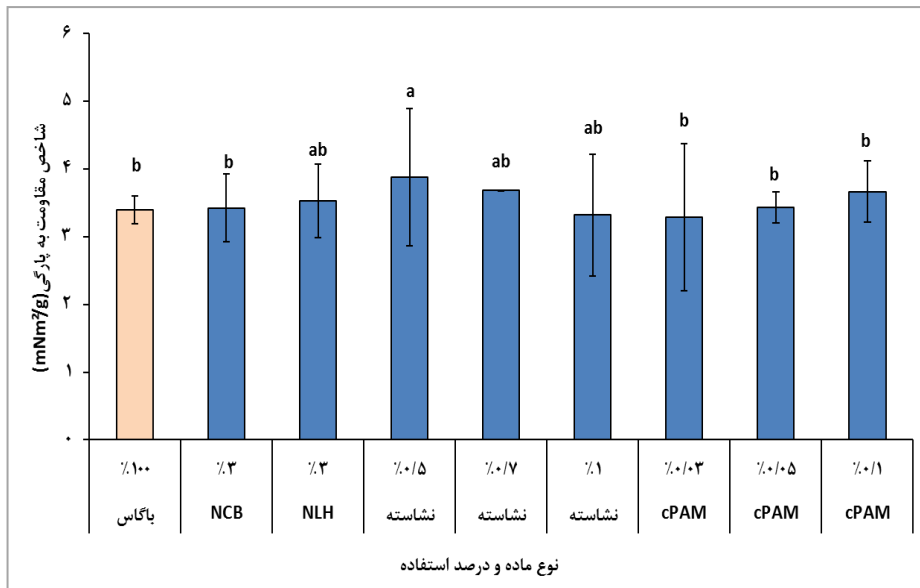
گروه‌بندی دانکن میانگین‌های داده‌های شاخص مقاومت به ترکیدن تیمارهای فوق را در ۳ گروه مستقل قرار داد (شکل ۳). افزودن نانو الیاف سلولزی به دلیل افزایش سطح تماس و ایجاد پیوند بیش‌تر منجر به افزایش مقاومت کششی و ترکیدن کاغذ خواهد شد و همچنین نشاسته کاتیونی پیوند بین الیاف را افزایش داده و مقاومت به ترکیدن را بیش‌تر نموده است. به‌علاوه تیمارهای نانو



شکل ۳- تأثیر افزودن نانو الیاف سلولزی باگاس (NCB)، نانو الیاف لیگنوسلولزی پهن برگان (NLH)، نشاسته و پلی اکریل آمید کاتیونی (cPAM) بر شاخص مقاومت به ترکین در کاغذ دست ساز

تا ۰/۰۵ درصد افزایش مقاومت و در ۰/۱ درصد کاهش شاخص مقاومت به پارگی را نشان می‌دهد. افزودن کم پلی اکریل آمید کاتیونی به دلیل نگه داشتن بیش تر نرمه‌ها و نانو الیاف و افزایش پیوندهای ممکن شاخص مقاومت به پارگی کاغذ را بهبود می‌دهد اما افزودن مقادیر بیش تر پلی اکریل آمید با به هم زدن شکل‌گیری خمیر کاغذ به دلیل کلوخه کردن آن شاخص مقاومت به پارگی را کاهش داده است. هادیلام و همکاران گزارش داده‌اند که با افزودن نانو الیاف سلولزی، مقاومت به پارگی کاغذها کاهش می‌یابد؛ به طوری که کم‌ترین مقاومت به پارگی در نانو کاغذ مشاهده شد، ولی به‌رغم کاهش مقاومت به پارگی در کاغذهای ترکیبی با شرایط مذکور، این کاهش از لحاظ آماری چندان معنی‌دار نبود [۶].

**تأثیر نانو الیاف سلولزی، نشاسته و پلی اکریل آمید کاتیونی بر شاخص مقاومت به پارگی**  
گروه بندی دانکن میانگین‌های شاخص مقاومت به پارگی تیمارهای حاوی افزودنی‌های نانو الیاف سلولزی، نانو الیاف لیگنوسلولزی، نشاسته و پلی اکریل آمید کاتیونی را به تفکیک در ۳ گروه مجزا قرار داد (شکل ۴). بیش‌ترین مقاومت به پارگی که در گروه a قرار دارد مربوط به تیماری است که با افزودن نانو الیاف لیگنوسلولزی، نانو الیاف سلولزی و ۰/۷ و ۱ درصد نشاسته کاتیونی است. همچنین ۰/۰۳ و ۰/۱ درصد پلی اکریل آمید کاتیونی کم‌ترین مقاومت به پارگی را ایجاد کرده است. با افزایش درصد نشاسته کاتیونی شاخص مقاومت به پارگی سیر صعودی داشته است ولی افزودن پلی اکریل آمید کاتیونی

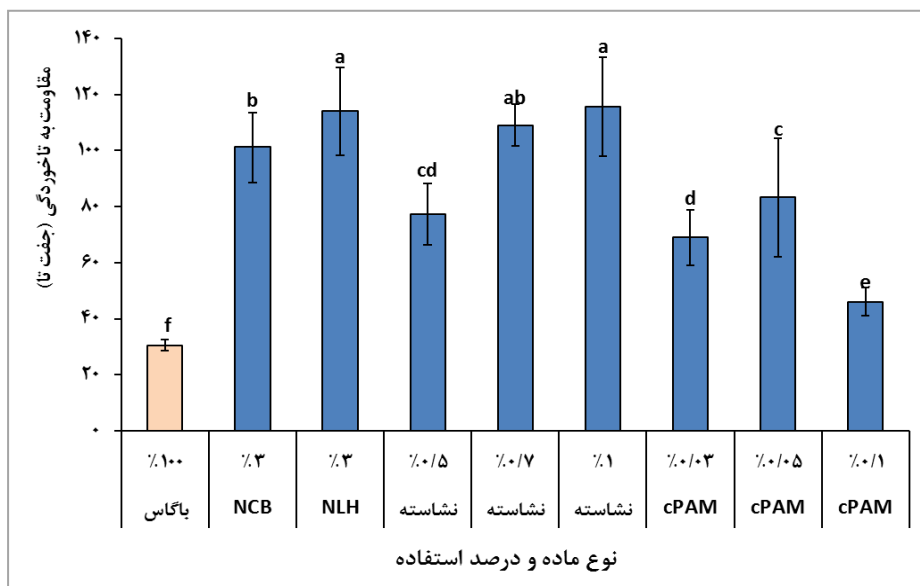


شکل ۴- تأثیر افزودن نانو الیاف سلولزی باگاس (NCB)، نانو الیاف لیگنوسلولزی پهن برگان (NLH)، نشاسته و پلی اکریل آمید کاتیونی (cPAM) بر شاخص مقاومت به پارگی در کاغذ دست ساز

به تاخوردگی به یک درصد نشاسته با ۱۳۳ جفت تا در گروه a است. افزودن نانو الیاف به خمیر کاغذ باگاس به دلیل افزایش سطح تماس و امکان پیوند بیشتر باعث افزایش مقاومت به تاخوردگی شده است. همچنین افزودن نانو الیاف لیگنوسلولزی پهن برگان در مقایسه با نانو الیاف سلولزی باگاس افزایش بیشتری در مقاومت به تاخوردگی کاغذ ایجاد کرده است.

#### تأثیر نانو الیاف سلولزی، نشاسته و پلی اکریل آمید کاتیونی به تفکیک بر مقاومت به تاخوردگی کاغذ دست ساز

گروه بندی دانکن میانگین های مقاومت به تاخوردگی را به ۶ گروه مستقل طبقه بندی کرده است (شکل ۵). کمترین مقاومت به تاخوردگی مربوط به خمیر کاغذ باگاس با میانگین ۳۲/۵ جفت تا در گروه f و بیشترین مقاومت



شکل ۵- تأثیر افزودن نانو الیاف سلولزی باگاس (NCB)، نانو الیاف لیگنوسلولزی پهن برگان (NLH)، نشاسته و پلی اکریل آمید کاتیونی (cPAM) بر مقاومت تاخوردگی در کاغذ دست ساز

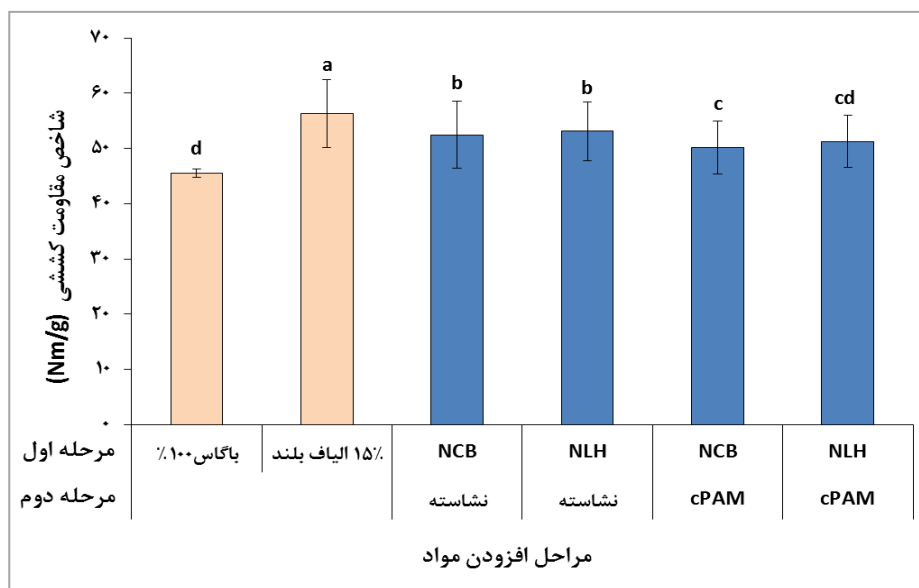


ذرات ریز الیاف کمک کرده و باعث کاهش تخلخل در کاغذ و همچنین افزایش مقاومت در مقابل عبور هوا و اتصال داخلی بهتر در ورق کاغذ می‌گردد [۵].

افزایش مقاومت کششی کاغذ با افزودن ۱۰ درصد نانو الیاف سلولزی به سوسپانسیون خمیر کاغذ کاتیونی شده با پلی‌اکریل‌آمید کاتیونی توسط حسن جان زاده نیز گزارش شده است. در این تحقیق شاخص مقاومت کششی و ترکیب به ترتیب ۱۸/۶۶ و ۱۸/۱۲ درصد افزایش داشته است. همچنین این شاخص‌ها در خمیر کاغذ کاتیونی شده با نشاسته کاتیونی، در بیش‌ترین سطح افزودن نانو الیاف سلولزی (۱۰ درصد) به ترتیب ۱۹/۳۵ و ۱۹/۲۴ درصد بهبود یافته است. نتایج این تحقیق حاکی از موفقیت در به‌کارگیری نانو الیاف سلولزی است [۱۳].

### تأثیر افزودن نانو الیاف سلولزی به همراه نشاسته یا پلی‌اکریل‌آمید کاتیونی بر شاخص مقاومت کششی کاغذ دست‌ساز

گروه‌بندی دانکن میانگین‌های تأثیر افزودن نانو الیاف به همراه نشاسته یا پلی‌اکریل‌آمید کاتیونی بر شاخص مقاومت کششی کاغذ دست‌ساز را در ۴ گروه مجزا قرار داده است (شکل ۶). بیش‌ترین مقاومت کششی مربوط به خمیر کاغذ باگاس حاوی ۱۵ درصد خمیر کاغذ الیاف بلند سوزنی‌برگ به مقدار ۶۲/۴۲ Nm/g بود که در گروه a قرار گرفت. افزودن نانو الیاف همراه نشاسته یا پلی‌اکریل‌آمید باعث افزایش در شاخص مقاومت به کشش شد که دلیل آن می‌تواند افزایش پیوندهای بین الیاف باشد. Hii و همکاران (۲۰۱۲) در تصاویر میکروسکوپ الکترونی نشان داده‌اند که نانو الیاف سلولزی به اتصال بین پرکننده و



شکل ۶- تأثیر افزودن ۳ درصد نانو الیاف سلولزی باگاس (NCB) یا نانو الیاف لیگنوسلولزی پهن‌برگ (NLH) به همراه ۰/۵ درصد نشاسته یا ۰/۰۵ درصد پلی‌اکریل‌آمید کاتیونی (cPAM) بر شاخص مقاومت کششی کاغذ دست‌ساز

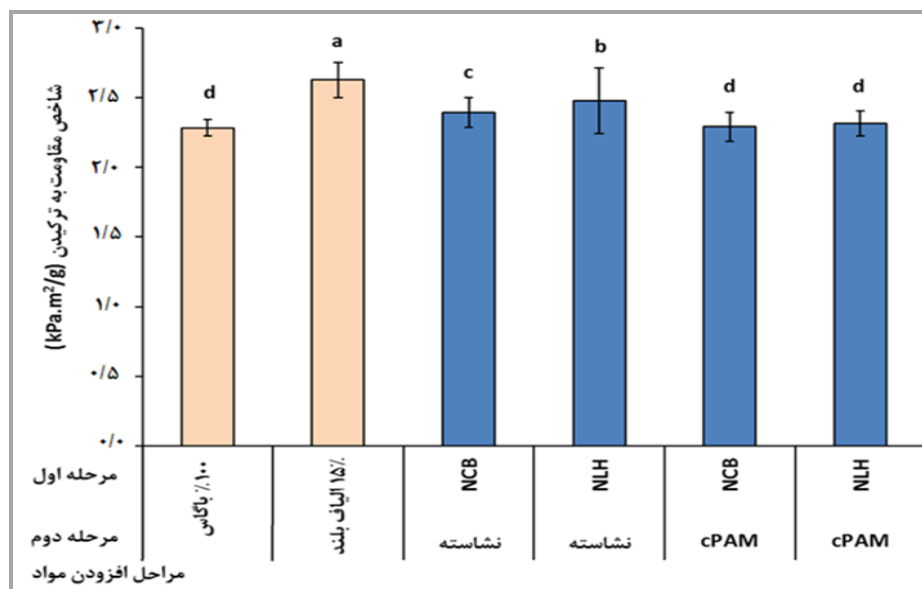
و ایجاد پیوند بیش‌تر منجر به افزایش مقاومت به ترکیب کاغذ خواهد شد و همچنین نشاسته کاتیونی پیوند بین الیاف را افزایش داده و مقاومت را بیش‌تر نموده است. تیمارهای نانو الیاف و نشاسته در دو گروه c, b قرار گرفته که بیش‌ترین مقاومت‌ها بعد از خمیر کاغذ باگاس حاوی ۱۵ درصد خمیر کاغذ الیاف بلند را نشان می‌دهند در حالی که تیمارهای پلی‌اکریل‌آمید کاتیونی با خمیر کاغذ

### تأثیر افزودن نانو الیاف سلولزی همراه نشاسته یا پلی‌اکریل‌آمید کاتیونی بر شاخص مقاومت به ترکیب کاغذ

گروه‌بندی دانکن میانگین‌های داده‌های شاخص مقاومت به ترکیب تیمارهای نانو الیاف با نشاسته یا پلی‌اکریل‌آمید کاتیونی را در ۴ گروه مستقل قرار داد (شکل ۷). افزودن نانو الیاف سلولزی به دلیل افزایش سطح تماس

افزایش بیشتری در مقاومت به ترکیدن کاغذ ایجاد کرده است.

باگاس کمترین مقاومت را نشان داده است. همچنین افزودن نانو الیاف لیگنوسلولزی پهن‌برگان به همراه نشاسته کاتیونی در مقایسه با نانو الیاف سلولزی باگاس

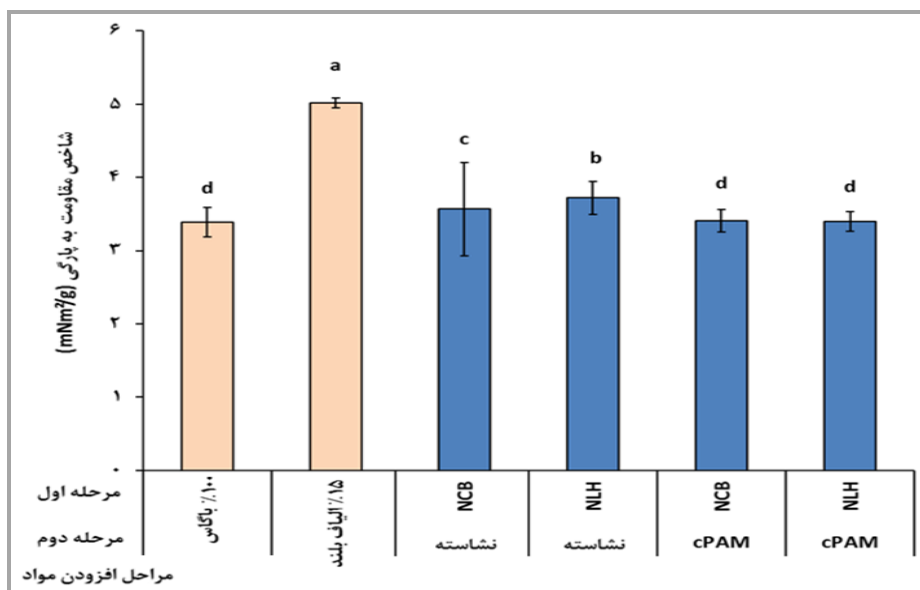


شکل ۷- تأثیر افزودن ۳ درصد نانو الیاف سلولزی باگاس (NCB) یا نانو الیاف لیگنوسلولزی پهن‌برگان (NLH) همراه ۰/۵ درصد نشاسته یا ۰/۰۵ درصد پلی‌اکریل‌آمید کاتیونی (cPAM) بر شاخص مقاومت به ترکیدن کاغذ دست‌ساز

مقاومت را نشان داده است. همچنین افزودن نانو الیاف لیگنوسلولزی پهن‌برگان به همراه نشاسته کاتیونی در مقایسه با نانو الیاف سلولزی باگاس افزایش بیشتری در مقاومت به پارگی کاغذ ایجاد کرده است. تحقیقات Lindström و همکاران (۲۰۱۴) نشان‌گر این است که اضافه کردن نانو الیاف سلولزی با الیاف سلولزی و محلول الکترولیت با وزن مولکولی بالا باعث کاهش تلاطم سوسپانسیون و شکل‌گیری بهتر کاغذ، افزایش مقاومت کاغذ با بهبود اتصال بین الیاف و ترکیبات دیگر در دوغاب خمیر کاغذ می‌شود [۱۴].

#### تأثیر افزودن نانو الیاف سلولزی به همراه نشاسته یا پلی‌اکریل‌آمید کاتیونی بر شاخص مقاومت به پارگی کاغذ دست‌ساز

گروه‌بندی دانکن میانگین‌های شاخص مقاومت به پارگی نانو الیاف به همراه نشاسته یا پلی‌اکریل‌آمید کاتیونی را در ۴ گروه مجزا قرار داد (شکل ۸). تیمارهای نانو الیاف و نشاسته در دو گروه b, c قرار گرفته که بیشترین مقاومت‌ها بعد از خمیر کاغذ باگاس حاوی ۱۵ درصد خمیر کاغذ الیاف بلند را نشان می‌دهند ولی تیمارهای حاوی پلی‌اکریل‌آمید کاتیونی با خمیر کاغذ باگاس کمترین

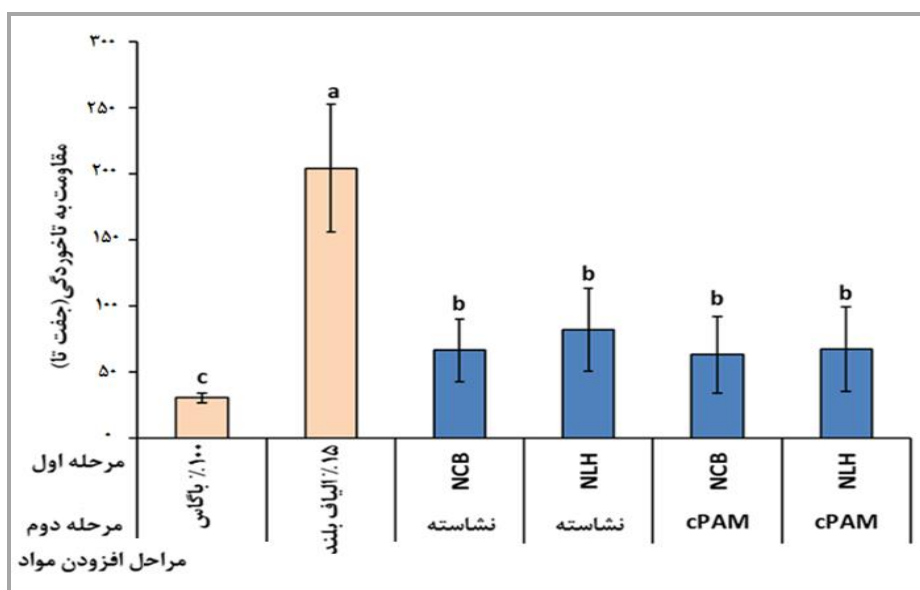


شکل ۸- تأثیر افزودن ۳ درصد نانو الیاف سلولزی باگاس (NCB) یا نانو الیاف لیگنوسلولزی پهن برگان (NLH) به همراه ۰/۵ درصد نشاسته یا ۰/۰۵ درصد پلی اکریل آمید کاتیونی (cPAM) بر شاخص مقاومت به پارگی کاغذ دست ساز

تا خوردگی خمیر کاغذ باگاس حاوی ۱۵ درصد خمیر کاغذ الیاف بلند ۲۵۲ جفت تا در گروه a است. تیمارهای حاوی نانو الیاف سلولزی با نشاسته یا پلی اکریل آمید به خمیر کاغذ باگاس به دلیل افزایش سطح تماس و امکان پیوند بیش تر باعث افزایش مقاومت به تا خوردگی شده است ولی به خمیر کاغذ باگاس حاوی ۱۵ درصد خمیر کاغذ الیاف بلند نرسیده است.

#### تأثیر افزودن نانو الیاف سلولزی به همراه نشاسته یا پلی اکریل آمید کاتیونی بر مقاومت به تا خوردگی کاغذ دست ساز

گروه بندی دانکن میانگین های مقاومت به تا خوردگی را به ۳ گروه مستقل طبقه بندی کرده است (شکل ۹). کم ترین مقاومت به تا خوردگی مربوط به خمیر کاغذ باگاس با ۳۲/۵ جفت تا در گروه c و بیش ترین مقاومت به



شکل ۹- تأثیر افزودن ۳ درصد نانو الیاف سلولزی به همراه ۰/۵ درصد نشاسته یا ۰/۰۵ درصد پلی اکریل آمید کاتیونی بر مقاومت به تا خوردگی کاغذ دست ساز

## نتیجه گیری

ترکیدن بیش تر و مقاومت به پارگی و تاخوردگی کمتر از تیمار حاوی ۱۲/۵ درصد خمیر کاغذ الیاف بلند سوزنی برگ بود. به علاوه تیمار مذکور، بیشترین مقاومت کاغذ دست ساز را ایجاد کرد. همچنین افزودن نانو الیاف لیگنوسلولزی به تنهایی یا به همراه نشاسته یا پلی اکریل آمید کاتیونی در مقایسه با نانو الیاف سلولزی باگاس افزایش بیشتری در مقاومت های کاغذ ایجاد کرده است. در مجموع، استفاده ترکیبی از نشاسته و نانو الیاف سلولزی دلالت بر قابلیت کاربردی آن جهت جایگزینی با خمیر کاغذ الیاف بلند وارداتی در تولید کاغذ از باگاس را داشت.

## تقدیر و تشکر

این تحقیق با حمایت مالی دانشگاه صنعتی خاتم الانبیاء بهبهان انجام شده و بدین وسیله از آن و همچنین گروه صنایع کاغذ پارس به دلیل در اختیار قرار دادن خمیر کاغذ باگاس و انجام آزمایش های مقاومت مکانیکی در آن واحد تولیدی سپاس گزاری می شود.

این تحقیق با هدف بررسی جایگزینی خمیر کاغذ نانو الیاف سلولزی و لیگنوسلولزی با نشاسته و یا پلی اکریل- آمید کاتیونی به جای خمیر کاغذ الیاف بلند سوزنی برگ وارداتی و امکان حذف آن از فرآیند تولید کارخانه کاغذ پارس انجام شد. به طور معمول افزودن خمیر کاغذ الیاف بلند وارداتی، نانو الیاف سلولزی، نشاسته کاتیونی و پلی اکریل آمید کاتیونی به خمیر کاغذ باگاس می تواند موجب بهبود ویژگی های کاغذ تولیدی شود؛ اما هر یک از آن ها محدودیت هایی را در سیستم تولید دارند. این تحقیق با هدف ارزیابی استفاده از نانو الیاف سلولزی، نشاسته کاتیونی و پلی اکریل آمید کاتیونی برای جایگزینی خمیر کاغذ الیاف بلند در تولید کاغذ از خمیر کاغذ باگاس انجام گرفت. استفاده از ۱ درصد نشاسته کاتیونی قابلیت جایگزینی با ۱۲/۵ درصد خمیر کاغذ الیاف بلند را دارد اما به دلیل مشکلات فرآیندی قابل توصیه نیست. در تیمار مربوط به افزودن ۳ درصد نانو الیاف لیگنوسلولزی به همراه ۰/۵ درصد نشاسته کاتیونی، مقاومت کششی و

## منابع

- [1] Samariha, A. and Hemmasi, A.H., 2005. Study of chemical and anatomical properties of bagasse used in Pars Paper Factory. *Agricultural Science Islamic Azad University*, 13(3):465-478. (In Persian).
- [2] Hadilam, M. M., 2012. Production and evaluation of nanofibrillated cellulose (NFC) prepared from  $\alpha$ -cellulose and comparative assessment of its using in chemical paper and bleached bagasse paper. M.Sc. thesis. Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources. (In Persian).
- [3] Johansson, C., Jarnstrom, L., Koch, K., Menzel, C., Olsson, E. and Andersson, R., 2013. A fiber-based substrate provided with a coating based on biopolymer material and a method of producing it. WIPO Patent WO2013180643A1.
- [4] Hassan, E. A, Hassan, M. L. and Oksman, K., 2011. Improving bagasse pulp paper sheet properties with microfibrillated cellulose isolated from xylanase-treated bagasse. *Wood and Fiber Science*, 43(1):76-82.
- [5] Hii, C., Oyvind W. G., Chinga-Carrasco, G. and Eriksen, O., 2012. The effect of MFC on the press ability and paper properties of TMP and GCC based sheets. *Nordic Pulp and Paper Research Journal*, 27(2):388-396.
- [6] Hadilam M. M., Afra, E. and Yousefi, H., 2013. Effect of Cellulose Nanofibers on the Properties of Bagasse Paper. *Forest and Wood product*, 66(3):351-366. (In Persian).
- [7] González, I., Boufi, S., Pèlach, M. A., Alcalà, M., Vilaseca, F. and Mutjé, P., 2012. Nanofibrillated cellulose as paper additive in eucalyptus pulps. *BioResources*, 7(4):5167-5180.
- [8] Afra, E., Yousefi, H. and Aliniya Lakani, S., 2014. Properties of Chemi-Mechanical Pulp Filled with Nanofibrillated and Microcrystalline Cellulose. *Biobased Materials and Bioenergy*, 8(5):489-494.

- [9] 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.
- [10] Sehaqui, H., Zhou, Q. and Berglund, L. A., 2013. Nano fibrillated cellulose for enhancement of strength in high-density paper structures. *Nordic pulp and paper*, 28(2):182-189.
- [11] Rezayati Charani, P., Dehghani-Firouzabadi, M., Afra, E., Blademo, Å., Naderi, A. and Lindström, T., 2013. Production of microfibrillated cellulose from unbleached kraft pulp of Kenaf and Scotch Pine and its effect on the properties of hardwood kraft: microfibrillated cellulose paper. *Cellulose*, 20(5):2559-2567.
- [12] Petroudy, S. R. D., Syverud, K., Chinga-Carrasco, G., Ghasemian, A. and Resalati, H., 2014. Effects of bagasse microfibrillated cellulose and cationic polyacrylamide on key properties of bagasse paper. *Carbohydrate Polymers*, 99(2):311-318
- [13] Moradian, M.H., RezayatiCharani, P. and Saadatnia, M., 2015. Improving Paper Breaking Length Using Cellulosic Nano Fibers in Bagasse Pulp. *Forest and Wood product*, 69(3):603-614. (In Persian).
- [14] Asadpour, G., Resalati, H., Dehghani, M. R., Ghasemian, A. and Mohammad Nazhad, M., 2015. Comparison of using single and dual retention aid system on newspaper pulp properties. *Wood and Forest Science and Technology*, 22 (2):75-93. (In Persian).
- [15] Rodriguez, J. M., 2008. *Micro and Nanoparticles in Papermaking*. Translated to Persian by Latibari, A. J., Khosravani, A., Nabavi, S. M. H., 2011. Ayzh publication, p 7.
- [16] Spence, K. L., Venditti, R. A., Rojas, O. J., Habibi, Y. and Pawlak, J. J., 2011. A comparative study of energy consumption and physical properties of microfibrillated cellulose produced by different processing methods. *Cellulose*, 18(4):1097-1111.
- [17] Ankerfors, M., 2012, Licentiate thesis, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.
- [18] Nechyporchuk, O., Belgacem, M.N. and Bras, J., 2016. Production of cellulose nanofibrils: A review of recent advances. *Industrial Crops and Products*. In press.

## Application of cellulose nanofibers to be replaced with the imported long- fiber pulps in papers made from bagasse

### Abstract

In this research, different additives including cellulose nanofibers, cationic starch, and polyacrylamide were added to bagasse pulp as their impact on the handsheet strengths were investigated aiming to replace them with imported long-fiber softwood pulp in Pars paper factory. For this purpose, 3% bleached bagasse cellulose nanofibers, 3% unbleached nano-lignocellulose fibers, 0.5, 0.7 and 1% cationic starch, and 0.03, 0.05 and 0.1% cationic polyacrylamide were added separately to bagasse pulp. In the next stage, 3% bleached bagasse cellulose nanofibers and 3% unbleached nano-lignocellulose fibers along with 0.5% cationic starch or 0.05% cationic polyacrylamide were used. The results showed that adding cellulose nanofibers along with cationic polyacrylamide or starch increases handsheet strengths, significantly. Yet, the best treatment was the addition of 3% nano-lignocellulose along with 0.5% cationic starch which resulted in the higher tensile and burst strengths and lower tear and fold strengths than that of adding 12.5% long fibers to bagasse pulp. The paper made by this process showed an increase of 16.57% in tensile index, 8.47% in burst index, 9.77% in tear index, and 168.85% in folding strength, compared with the paper made from pure bagasse pulp.

**Keywords:** bagasse, cellulose nanofibers, lignocellulose nanofibers, starch, papermaking.

**R. Ghofran**<sup>1</sup>  
**M. H. Moradian**<sup>2</sup>  
**M. A Saadatnia**<sup>3</sup>  
**P. Rezayati Charani**<sup>4\*</sup>

<sup>1</sup> MSc student, Wood and Paper Industries, Faculty of Natural Resources, Behbahan Khatam Alanbia University of Technology, Behbahan, Iran.

<sup>2</sup> Assistant professor, Wood and Paper Industries, Faculty of Natural Resources, Behbahan Khatam Alanbia University of Technology, Behbahan, Iran.

<sup>3</sup> Assistant professor, Wood and Paper Industries, Faculty of Natural Resources, Behbahan Khatam Alanbia University of Technology, Behbahan, Iran.

<sup>4</sup> Assistant professor, Wood and Paper Industries, Faculty of Natural Resources, Behbahan Khatam Alanbia University of Technology, Behbahan, Iran.

Corresponding author:  
[rezayati@bkatu.ac.ir](mailto:rezayati@bkatu.ac.ir)

Received: 2016/01/20  
Accepted: 2016/05/21