

## اثر استفاده از نانوفیبرهای سلولزی بر خواص کاغذ باگاس

❖ **محمد مهدی هادیلام**؛ کارشناس ارشد صنایع خمیر کاغذ، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران؛ و عضو باشگاه پژوهشگران و نخبگان دانشگاه آزاد اسلامی، واحد شهرضا، باشگاه پژوهشگران جوان، شهرضا، ایران

❖ **الیاس افرا**؛ استادیار گروه صنایع خمیر کاغذ، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

❖ **حسین یوسفی**؛ استادیار گروه مهندسی و تکنولوژی چوب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

### چکیده

در این تحقیق اثر استفاده از نانوفیبرهای سلولزی بر خواص کاغذهای دست‌ساز ساخته‌شده از خمیر کاغذ صنعتی باگاس بررسی شد. نانوفیبر سلولزی که با روش سوپراسیاب از آلفاسولوز صنعتی سوزنی‌برگان تهیه شده بود به مقدار صفر و بیست درصد وزنی به کاغذهای دست‌ساز حاصل از خمیر کاغذ صنعتی باگاس اضافه شد. نانوکاغذ متشکل از صد درصد نانوفیبر سلولزی نیز برای مقایسه تهیه شد. خواص مورد بررسی شامل زمان آب‌گیری خمیر، وزن پایه، ضخامت، دانسیته، شفافیت، مقاومت به کشش، و مقاومت به پارگی بودند. نتایج نشان داد که زمان آب‌گیری پس از افزودن نانوفیبر سلولز به خمیر پایه افزایش یافت. با افزودن نانوفیبر سلولز، شفافیت (کیفی) ظاهری و دانسیته افزایش، و ضخامت کاغذها کاهش یافت. کاغذهای حاوی بیست درصد نانوفیبر مقاومت کششی بیشتری در مقایسه با کاغذهای بدون نانوفیبر نشان دادند و بیشترین مقاومت کششی متعلق به نانوکاغذ (کاغذ صرفاً شامل مواد نانو) بود. به‌رغم خواص مثبت تقویت‌کنندگی نانوفیبرهای سلولزی در مقاومت کششی، با افزودن نانوفیبر سلولز مقاومت به پارگی کاغذها کاهش نشان داد؛ به‌طوری که کمترین مقاومت به پارگی در نانوکاغذ مشاهده شد، ولی به‌رغم کاهش مقاومت به پارگی در کاغذهای ترکیبی با شرایط مذکور، این کاهش از لحاظ آماری چندان معنی‌دار نبود.

واژگان کلیدی: باگاس، سوپراسیاب، نانوفیبر سلولزی، ویژگی‌های فیزیکی و مقاومتی.

## مقدمه

با توجه به کمبود منابع چوبی و خواص جالب باگاس در صنعت کاغذ، در جهان و ایران توجه خاصی به این منبع غیرچوبی شده است. بررسی‌ها نشان داده است که باگاس از لحاظ ابعاد فیبر و میزان ترکیب‌های شیمیایی، در زمره مواد اولیه مناسب برای استفاده در صنایع کاغذسازی قرار داشته و نسبت به پهن‌برگان بومی و سایر گیاهان غیرچوبی کشور اولویت دارد [۱].

با توجه به خواص ضعیف‌تری که عموماً الیاف باگاس در مقایسه با الیاف چوبی به‌ویژه خمیرکاغذهای الیاف بلند دارد، سعی شده از روش‌های گوناگون در حین فرایند تهیه خمیرکاغذ و کاغذسازی، خواص نهایی و کاربرد این الیاف در محصولات ارتقا داده شود. از این روش‌ها می‌توان عملیات پالایش، افزودن خمیرکاغذ الیاف بلند، و همچنین افزودن عوامل مقاومت خشک به‌صورت مواد سنتزی و طبیعی به خمیرکاغذ یا بر روی کاغذ تولیدی نهایی با استفاده از روش‌هایی چون پوشش‌دهی را نام برد [۲، ۳]. از نمونه فعالیت‌های انجام‌شده برای بهبود خواص می‌توان به استفاده از مواد فعال‌ساز سطحی برای بهبود فرایند خمیرسازی به‌روش سودا از باگاس اشاره کرد. استفاده از مواد فعال‌ساز سطحی باعث شد که مقاومت مکانیکی کاغذهای حاصل از این خمیرکاغذ بهبود یابد و بهتر از مقاومت‌های مکانیکی کاغذ حاصل از خمیرکاغذ سودای معمولی باشد [۴].

از نانومواد افزودنی می‌توان برای بهبود خواص خمیرکاغذ و کاغذ تهیه‌شده از الیاف ضعیف‌تر مثل باگاس استفاده کرد. ایده استفاده از نانومواد به‌منظور افزایش عملکرد کاغذ و مقوا، تمام محدوده خواص و ویژگی‌های کاربردی کاغذ، یعنی از بهبود خواص نوری تا تقویت خواص ممانعتی نسبت به آب و هوا (رطوبت)، و تقویت خواص مکانیکی و مقاومتی را پوشش می‌دهد [۵]. نظر محققان و دانشمندان بر این است که نانوفناوری از مهم‌ترین روش‌های توسعه راهبردی در صنعت کاغذسازی و پیشرفت آن در آینده

خواهد بود [۶]. بهبود خواص کاغذ با استفاده از نانومواد (نانومواد سلولزی یا معدنی) به روش‌های گوناگون، از جمله افزودن افزودنی‌های در ابعاد نانو به سوسپانسیون خمیرکاغذ، تهیه نانوکاغذ (فیلم متشکل از صددرصد نانوفیبرهای سلولزی)، اضافه‌کردن نانوفیبر به کاغذ و مقواهای معمول، تولید محصول لایه‌ای (کاغذ چندلایه) و پوشش‌دهی کاغذ با مواد نانو ساختار و... قابل انجام است. در این بین نانومواد زیست‌پایه، به‌ویژه نانومواد پایه سلولزی به‌سبب خواص ویژه مقاومتی و ایمنی در کاربرد به‌واسطه زیست‌تخریب‌پذیر بودن اهمیت خاصی دارند [۳، ۵].

با توجه به آنچه گفته شد، محققان به تحقیقات در زمینه استفاده از نانومواد سلولزی در صنعت کاغذسازی توجه کرده‌اند. در سال ۲۰۰۹ در گزارش گروهی از محققان اشاره شد که استفاده از نانوفیبرهای سلولزی به‌عنوان لایه سطحی (۸-۰ درصد از وزن پایه کل) روی کاغذ پایه، مقاومت ورقه‌های کاغذی را به‌طور معنی‌داری افزایش و نفوذپذیری به هوا را کاهش داد. تصاویر میکروسکوپ الکترونی مشخص کرد که لایه نانوفیبرهای سلولزی به‌وسیله ساختار متراکم ایجادشده به‌وسیله فیبریل‌ها تخلخل را کاهش داده و در نتیجه خواص ممانعتی بالایی را ایجاد کرده است [۷]. آیولین و همکاران نانوفیبر سلولز کربوکسی متیله‌شده را به‌صورت لایه‌ای در کاغذ چندلایه استفاده کردند و نفوذپذیری کاغذهای حاصل را نسبت به اکسیژن و روغن بررسی نمودند. نتایج این محققان در بررسی خواص ممانعتی ایجادشده به‌وسیله نانوفیبر سلولز نشان داد که نفوذپذیری کاغذها بر اثر استفاده از نانوفیبر سلولز به‌شدت کاهش یافت [۸]. هنریکسون و همکاران از نانوفیبریل‌های سلولزی چوب برای تولید نانوکاغذهای سلولزی متخلخل با سختی بالا استفاده کردند. آن‌ها موفق به ساخت نوعی نانوکاغذ با مقاومت کششی ۲۱۴ MPa شدند که این مقاومت از مقاومت کششی چدن بیشتر و در حد مقاومت کششی فولاد است [۹].

بر این نوع از الیاف در کاغذ ترکیبی منحصر است و رفتار میکروالیاف و نانوالیاف در اختلاط با همدیگر بر خواص کاغذ و فرایند آب گیری (بر اساس سیستم آب گیری) نیز بررسی شد. یافتن روند میزان تغییرات و بررسی اثر تغییرات در درصدهای متفاوت نانوفیبر سلولز از اهداف این پژوهش نبود و بنابراین در این زمینه بررسی ای انجام نشد. خشک کردن فیلمها در آون (دمای ۱۰۰ درجه سلسیوس و زمان ۱۲ ساعت) انجام شد [۱۰]. وزن پایه نمونهها  $80 \pm 2$  گرم بر متر مربع در نظر گرفته شد.

### آزمونها و اندازه گیریها

#### زمان آب گیری

زمان آب گیری سوسپانسیون در فیلتراسیون خلأ بر اساس استاندارد T ۲۲۱ cm-۹۹ آیین نامه تاپی (با کمی اصلاح برای انطباق با سیستم آب گیری این پژوهش) برای همه تیمارها و نمونهها با استفاده از زمان سنج (بر حسب ثانیه) ثبت شد.

#### اندازه گیری خواص فیزیکی

ضخامت: اندازه گیری ضخامت نمونهها با دستگاه اندازه گیری ضخامت بر روی نمونهها، طبق استاندارد T ۴۱۱ om-۰۵ آیین نامه تاپی، انجام شد. دانسیته: دانسیته نمونهها از تقسیم وزن پایه (گرم) بر ضخامت نمونههای کاغذ تعیین شد.

#### آزمون مقاومت کششی

در ارزیابی خواص کششی کاغذ، شاخص مقاومت کششی بر اساس استاندارد T ۴۹۴ om-۰۱ آیین نامه تاپی محاسبه شد.

#### آزمون مقاومت به پارگی

این آزمون با دستگاه مقاومت به پارگی المندروف و طبق استانداردهای آزمون T ۴۱۴ om-۰۴ آیین نامه تاپی بر روی نمونهها انجام شد.

با توجه به خواص جالب نانوفیبر سلولز و ویژگی ذاتی باگاس (که به تعدادی از آنها بر اساس تحقیقات محققان اشاره شد)، هدف از این تحقیق بررسی تأثیر استفاده از نانوفیبرهای سلولزی بر خواص کاغذ حاصل از خمیر کاغذ باگاس به منظور جبران ضعفهای عمومی الیاف این خمیر کاغذ در ایجاد یک شبکه لینی مستحکم در ساختار کاغذ است. تأثیر افزودن نانوفیبر سلولز در ظاهر، تعدادی از ویژگیهای فیزیکی و ویژگیهای مقاومتی بر اساس مقاومت کششی و مقاومت به پارگی کاغذها نیز بررسی شد. تأثیر افزودن نانوفیبر بر فرایند آب گیری از سوسپانسیون خمیر طی ساخت کاغذها بر اساس زمان آب گیری خمیر نیز بررسی شد.

#### مواد و روشها

ماده اولیه سلولزی این مطالعه، خمیر کاغذ سودا از باگاس رنگبری شده (شرکت هفت تپه) به عنوان خمیر کاغذ پایه کاغذسازی با درجه روانی CSF ۵۰۰ و خمیر کاغذ آلفا سلولز الیاف بلند (سوزنی برگان) رنگبری شده وارداتی به عنوان ماده اولیه تولید نانوفیبرهای سلولزی بوده است. خمیر کاغذ آلفا سلولز سوزنی برگان (وارداتی) به منظور حذف ناخالصیها، پس از شست و شو با آب در محلول هیدروکسید پتاسیم با غلظت ۵ درصد تیمار شد. سپس سوسپانسیون با غلظت یک درصد آلفا سلولز تهیه شد و یکبار از دستگاه سوپر آسیاب عبور داده شد تا بر اثر نیروهای برشی و فشاری، نانوفیبرهای سلولزی تولید شوند. فیبرها و نانوفیبرها طبق استاندارد T ۲۰۵ آیین نامه تاپی<sup>۱</sup> به کاغذ و نانوکاغذ تبدیل شدند. همچنین کاغذهایی از خمیر کاغذ باگاس حاوی ۲۰ درصد وزنی نانوفیبرهای سلولزی تشکیل شد. شایان ذکر است که فقط به عنوان نمونه برای بررسی رفتار نانوفیبر در کاغذهای ترکیبی درصد اختلاط ۲۰ درصد لحاظ شد که مقداری بینابین و مناسب باشد. همچنین در صورت افزودن درصد بیشتر نانوفیبر قیمت تمام شده هر کاغذ افزایش می یابد. از طرف دیگر، هدف این تحقیق به بررسی اثر افزودن نانوفیبر

## شفافیت کاغذهای تهیه شده

به عنوان عاملی از مشخصات ظاهری کاغذها، با استفاده از دوربین دیجیتال مانند روش نوگی و همکاران [۱۴] و یوسفی و همکاران [۱۵] از نمونه‌ها عکس برداری شد تا از طریق مشاهده چشمی تفاوت

شفافیت ظاهری کاغذها بررسی و مقایسه شود. بنابراین، در این زمینه یک صفت توصیفی-مقایسه‌ای گزارش شده است. در جدول ۱ به اختصار صفات و ویژگی‌های بررسی شده و استانداردهای مربوطه آورده شده است.

جدول ۱. ویژگی مورد بررسی و استانداردهای مربوطه

ویژگی یا صفت مورد بررسی	استاندارد
زمان آبیگری	T ۲۲۱ cm-۹۹ آیین‌نامه تاپی (اصلاح شده)
ضخامت	T ۴۱۱ om-۰۵
دانسیته	تقسیم وزن پایه بر ضخامت
مقاومت کششی	T ۴۹۴ om-۰۱
مقاومت به پارگی	T ۴۱۴ om-۰۴
شفافیت	مانند روش نوگی و همکاران (۲۰۰۹) و یوسفی و همکاران (۲۰۱۱)

## میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدان

برای بررسی اثر فرایند آسیاب بر ابعاد فیبرهای آلفاسلولز و نیز تهیه ریزنگاره از نمونه‌های کاغذی از دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدان (FE-SEM) استفاده شد. برای تهیه ریزنگاره‌های الکترونی، نمونه‌ها ابتدا در خلأ خشک و سپس با ذرات پلاتینوم/پالادیوم اندود شدند.

## تحلیل آماری

بررسی و تحلیل داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار آماری SPSS در قالب طرح تحلیل واریانس یک‌طرفه انجام شد. همچنین شاخص خطا برای متوسط داده‌ها محاسبه و روی هر نمودار نشان داده شد.

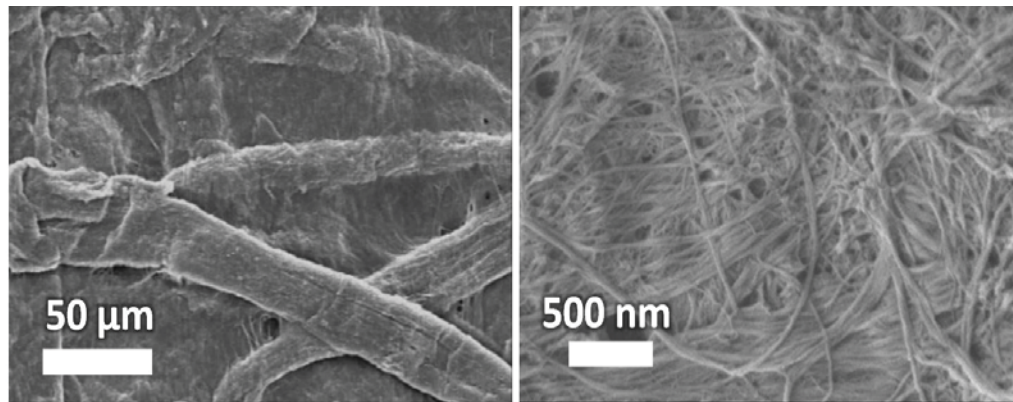
## بحث و نتایج

شکل ۱ ریزنگاره الکترونی روبشی گسیل میدان نانوفیبرهای سلولزی (الف) و کاغذ باگاس حاوی ۲۰

درصد نانوفیبر سلولزی (ب) را نشان می‌دهد. قطر متوسط نانوفیبر سلولزی و فیبرهای باگاس به ترتیب  $28 \pm 11$  nm و  $20/5 \pm 4/4$   $\mu$ m به دست آمد. نتایج بررسی پراش اشعه ایکس و ریزنگاره الکترونی روبشی گسیل میدان ارائه شده در گزارش‌های منتشر شده از سوی این تیم تحقیقاتی [۸]، [۹] و همچنین شکل و ابعاد نانوفیبرها بیانگر دست‌یابی به ابعاد نانو و تهیه نانوفیبر سلولزی از خمیر کاغذ الیاف بلند سوزنی‌برگ است. ملاحظه می‌شود نانوفیبرهای سلولزی فرایند سوپراسیاب توزیع قطری مناسبی در ابعاد نانومتری دارند. قطر نانوفیبرهای سلولزی ۷۳۰ برابر کوچک‌تر از قطر فیبرهای باگاس است. در ریزنگاره کاغذ باگاس حاوی نانوفیبر (شکل ۱، ب)، بخشی از چند فیبر باگاس دیده می‌شود و فضای بین آن‌ها با نانوفیبرها پوشانده شده است که در این بزرگ‌نمایی دیده نمی‌شوند. پرکردن منافذ بین فیبرها سبب ایجاد شبکه پیوسته نانوفیبر-فیبر شده است [۳، ۱۰].

تولید نانوفیبرها، مقاومت و ضعف ساختاری ذاتی الیاف در بین خود الیاف از یک منبع لیگنوسلولزی و منابع گوناگون نسبت به همدیگر و نیز پاسخ آنها به فرایند سوپراسیاب و... نسبت داد. همچنین عده‌ای از محققان برای دستیابی به نانوالیاف یکدست‌تر و با دامنه قطری کمتر فرایند آسیاب را چندین مرتبه انجام می‌دهند، اما نانوفیبرهای تهیه‌شده این تحقیق - همان‌طور که گفته شد - فقط با یک بار عبور از دستگاه سوپراسیاب تهیه شده‌اند.

در مطالعات دیگر، متوسط قطری نانوفیبریل‌های تولیدشده با روش سوپراسیاب از ساقه کلزا ۳۲ نانومتر [۱۱] و برای الیاف نانوفیبریل‌شده از چند منبع گوناگون لیگنوسلولزی در محدوده ۹۰-۲۰ nm گزارش شده است [۱۲]. در این تحقیق، دستیابی به نانوفیبرهای سلولزی از طریق فرایند سوپراسیاب با متوسط قطری مناسب و قابل مقایسه با دیگر نتایج پژوهش‌های انجام‌شده و موفقیت‌آمیز بوده است. تفاوت و تنوع در اندازه نانوفیبرها در این تحقیق و نیز در مقایسه با نتایج دیگر پژوهشگران را می‌توان به منبع الیاف اولیه



شکل ۱. ریزنگاره‌های الکترونی نانوفیبر (الف) و کاغذ باگاس حاوی نانوفیبر (ب)

تهیه کاغذ از نانوالیاف نیز به کاغذهای با شفافیت ظاهری زیاد دست پیدا کرده‌اند. مقایسه بین شفافیت کاغذهای ترکیبی و نانوکاغذ کمتر در منابع علمی دیده می‌شود، اما چانگ و همکاران [۱۶] پس از مقایسه شفافیت چندسازه‌های تهیه‌شده از نمونه‌های خمیرکاغذ اولیه رنگ‌بری‌شده و همچنین رنگ‌بری‌نشده، کم‌بودن شفافیت نمونه رنگ‌بری‌نشده را به حضور لیگنین در ساختار این چندسازه‌ها مربوط دانسته‌اند. خمیرکاغذ مورد استفاده به‌عنوان ماده اولیه تولید نانوفیبر این پژوهش کاملاً خالص (آلفا سلولز) و فاقد هر نوع ناخالصی از جمله لیگنین بوده است [۳]. شفافیت بیشتر کاغذهای نانوفیبر و شفافیت کمتر کاغذهای میکروفیبر باگاس این تحقیق از این منظر با تحلیل نتایج و دلایل

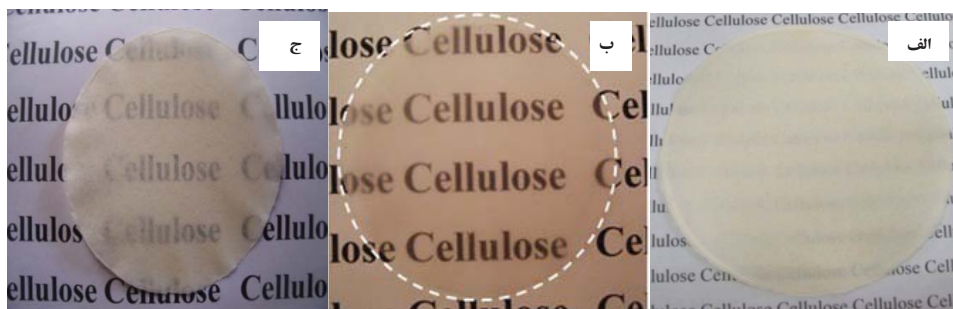
شکل ۲ تصاویر دوربین دیجیتال از شفافیت کیفی کاغذ، نانوکاغذ، و کاغذ حاوی نانوفیبر سلولز را نشان می‌دهد. بیشترین و کمترین سطح شفافیت کیفی به ترتیب مربوط به نانوکاغذ (۱۰۰ درصد NFC) و کاغذ (۱۰۰ درصد باگاس) است. همچنین اضافه کردن نانوفیبر به خمیرکاغذ باگاس باعث افزایش شفافیت کاغذهای ترکیبی شده است. حضور جزء نانومتری سلولز در ساختار کاغذ سبب توسعه شدید سطح پیوند، کاهش خلل و فرج، و کاهش ناهمواری سطح شده که همه این عوامل موجب شکست کمتر نور و افزایش شفافیت می‌شود [۱۰، ۱۳، ۱۴، ۱۵].

محققان دیگر چون نوگی و همکاران [۱۴]، یوسفی و همکاران [۱۵]، و چانگ و همکاران [۱۶] پس از

می‌شود [۱۳]؛ در نتیجه، نور کمتری از این ساختار کاغذ عبور می‌کند و آن مقدار نور عبوری نیز بدون تغییر عبور نمی‌کند و در نهایت شفافیت کاغذ پایین و بر ماتی و کدورت ساختار کاغذهای معمول افزوده می‌شود.

وجود کلمات در پشت ورقه‌های کاغذ دست‌ساز و با توجه به شفافیت کاغذها نشان‌دهنده بهتر شفافیت و پشت‌نمایی نانوکاغذ و نیم‌پشت‌نمایی کاغذ ترکیبی است. همچنین این کلمات با توجه به رنگ کاغذ زمینه (که کاملاً سفید است) بیننده را در تشخیص کاغذ دست‌ساز نسبت به ورق کاغذ زمینه و محیط اطراف، یاری می‌دهد. به جز نانوکاغذ - که در شکل ۲ حدود آن با خط چین مشخص شده - حدود دیگر کاغذها با چشم به راحتی قابل تشخیص شده است.

دیگر محققان چون چانگ و همکاران [۱۶] هم‌خوانی دارد. خمیر کاغذ باگاس (حتی با آنکه از خمیر کاغذ باگاس رنگ‌بری شده و تمیز شده تهیه شده است) دارای مقداری ناخالصی، از جمله مواد رنگ‌ساز و مقدار کم لیگنین باقی‌مانده در داخل خمیر کاغذ - حتی پس از طی فرایندهای تولید خمیر و رنگ‌بری در کارخانه - است [۳] که گاه حتی با بررسی چشمی و ته‌مایه زرد فام خمیر نیز قابل تشخیص است. نیز می‌توان کاهش شفافیت کاغذهای خمیر باگاس را به وجود میکرو حفرات در ساختار خود میکروالیاف و همچنین در ساختار و سطح کاغذ تهیه شده از الیاف این خمیر نسبت داد. این حفرات در الیاف و کاغذ در هنگام عبور نور از ضخامت کاغذ باعث شکست و پراکنش نور در دسته امواج عبوری



شکل ۲. مقایسه شفافیت ظاهری (الف) کاغذ باگاس، (ب) نانوکاغذ، و (ج) کاغذ باگاس تقویت‌شده با نانوفیبر

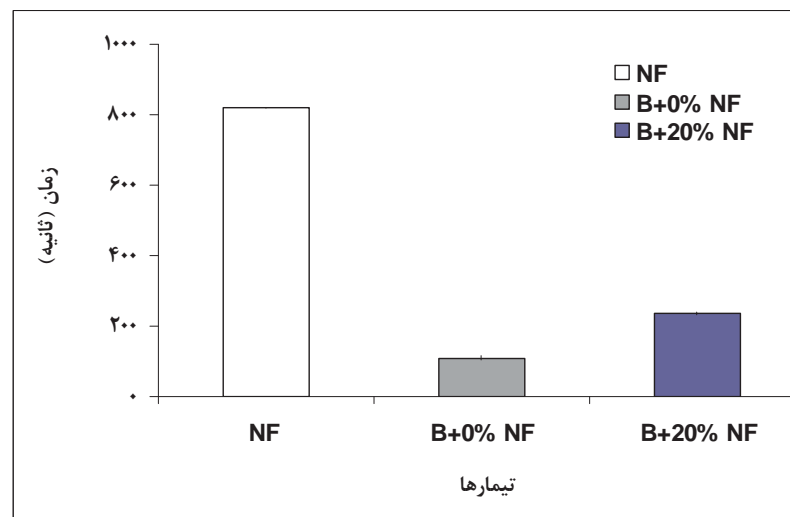
مربوط به خمیر کاغذ فیبر باگاس خالص (خمیر کاغذ معمولی عاری از نانوفیبر) بوده است. زمان آب‌گیری با سطح ویژه همبستگی بالایی دارد [۱۷]. از آنجا که در حین فرایند سوپراسیاب ابعاد فیبرهای سلولزی از مقیاس میکرومتری به نانومتری تبدیل می‌شود، سطح ویژه به شدت افزایش می‌یابد و نیروی موینگی و ظرفیت نگه‌داری آب در واحد حجم سلولز افزایش می‌یابد. به علاوه، با افزایش ته‌نشینی نانوفیبرها از میزان ارتباط پیوسته بین منافذ می‌کاهد، و ممانعت فیزیکی در برابر جریان سیال ایجاد می‌شود [۳، ۱۶، ۱۸].

نتایج حاصل با نتایج دیگر پژوهش‌ها در این زمینه هم‌راستا و هماهنگ است. تاپال و همکاران گزارش

شکل ۳ داده‌های مربوط به زمان آب‌گیری کاغذ، نانوکاغذ، و کاغذ حاوی نانوفیبر (کاغذ ترکیبی)، و جدول ۲ نتایج آزمون آماری آن را نشان می‌دهد. زمان آب‌گیری پارامتر مهمی در فرایند ساخت کاغذ است، زیرا بهره‌وری و بازده تولید ماشین کاغذ با طولانی شدن زمان آب‌گیری، محدود می‌شود [۱۳]. از طرف دیگر، زمان آب‌گیری می‌تواند به عنوان معیاری از درجه فیبریل شدن مورد سنجش و استفاده قرار گیرد [۱۶]. بیشترین زمان آب‌گیری در فرایند آب‌گیری در حین تولید کاغذها مربوط به نانوکاغذ است. این در حالی است که در مراحل بعد، بیشترین زمان آب‌گیری مربوط به خمیر کاغذهای ترکیبی و کمترین زمان آب‌گیری

زمان آب گیری این سوسپانسیون نسبت به سوسپانسیون خمیر کاغذ CMP خالص می شود. این محققان نیز کوچکی و نفوذ این نانوالیاف در شبکه الیاف و منافذ بین آن، افزایش پیوندهای هیدروژنی آنها با الیاف، و ماندگاری بیشتر آب در ساختار تشک الیاف در حال آب گیری را دلیل افزایش زمان آب گیری دانسته اند [۱۹].

کرده اند که افزودن سلولز نانوفیبریل شده نرخ آب گیری را حین تولید کاغذ کاهش و میزان مقاومت را افزایش می دهد [۱۸]. علی نیا و همکاران نیز با بررسی میزان آب گیری از سوسپانسیون در تهیه کاغذهای ترکیبی خمیر کاغذ شیمیایی مکانیکی CMP به همراه نانوفیبر سلولز به این نتیجه رسیدند که افزودن نانوفیبر سلولز، سبب افزایش



\* NF: نانوفیبر سلولز، و B: باگاس است.

شکل ۳. مقایسه زمان آب گیری از سوسپانسیون خمیر کاغذ حین شکل گیری کاغذها

جدول ۲. جدول تجزیه واریانس مقادیر زمان آب گیری

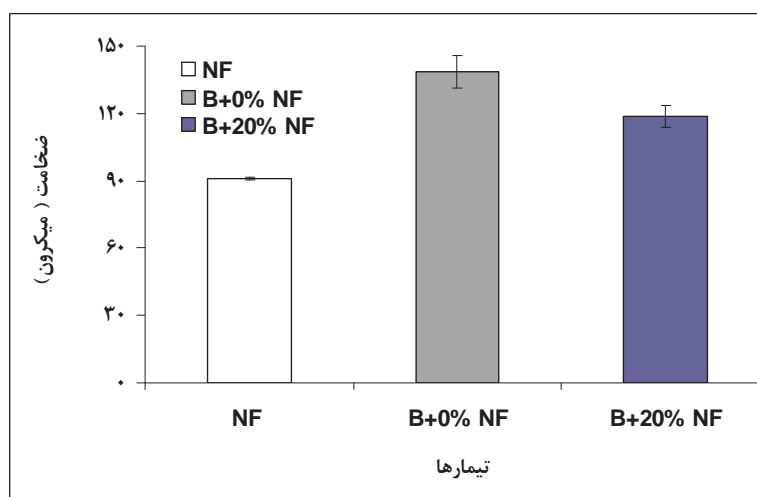
منبع تغییرات	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	F	معنی داری
	SS	df	MS		Sig.
تیمار افزودن نانوفیبر	۶/۱۸۶	۲	۳/۰۹۳	۹۷۷/۲۹۲	۰/۰۰۰
خطا	۰/۰۱۹	۶	۰/۰۰۳		
مجموع	۲۹۰/۷۷۰	۹			

و کاغذ خالص باگاس بوده است. به دلیل کاهش ابعادی شدید (تقریباً هزار برابر) فیبرهای سلولزی از مقیاس میکرومتری به نانومتری، تراکم پذیری آنها بیشتر، منافذ کوچک تر، و ساختار نهایی شبکه فیبری چگال تر به دست آمده که در نهایت با افزودن نانوفیبر به واسطه توسعه چشمگیر پیوندهای هیدروژنی در کاغذ نهایی

شکل ۴ ضخامت، و شکل ۵ دانسیته کاغذ، نانوکاغذ، و کاغذ حاوی نانوفیبر سلولز، و جدول های ۳ و ۴ نتایج آزمون آماری مربوط را نشان می دهند. بیشترین و کمترین ضخامت به ترتیب مربوط به کاغذ (الیاف باگاس خالص) و نانوکاغذ حاصل از نانوالیاف بوده است. بیشترین و کمترین دانسیته به ترتیب مربوط به نانوکاغذ

ضخامت و افزایش دانسیته کاغذهای ترکیبی می‌شود. نتایج اندازه‌گیری‌های ضخامت با دانسیته هم‌خوانی دارد، زیرا به شرط آنکه وزن پایه (بر حسب گراماژ) ثابت فرض شود با کاهش ضخامت، دانسیته افزایش می‌یابد [۱۳].

و عدم برگشت‌پذیری این تراکم، ضخامت کاغذهای ترکیبی کاهش و دانسیته این قبیل کاغذها افزایش یافته است. وجود ۲۰ درصد نانوفیبر با تراکم‌پذیری زیاد باعث می‌شود بسیاری از خلل و فرج و فاصله بین فیبرهای میکرومتری پر شود و در نتیجه، سبب کاهش



\*NF: نانوفیبر سلولزی، و BF: باگاس است.

شکل ۴. مقایسه ضخامت کاغذها

جدول ۳. جدول تجزیه واریانس مقادیر ضخامت

منبع تغییرات	مجموع مربعات SS	درجه آزادی df	میانگین مربعات MS	F	معنی‌داری Sig.
تیمار افزودن نانوفیبر	۳۴۳۴/۸۹۳	۲	۱۷۱۷/۴۴۶	۲۲/۸۶۰	۰/۰۰۰
خطا	۶۵۰/۷۶۷	۶	۷۵/۱۲۸		
مجموع	۱۲۵۰۹۷/۹۵۸	۹			

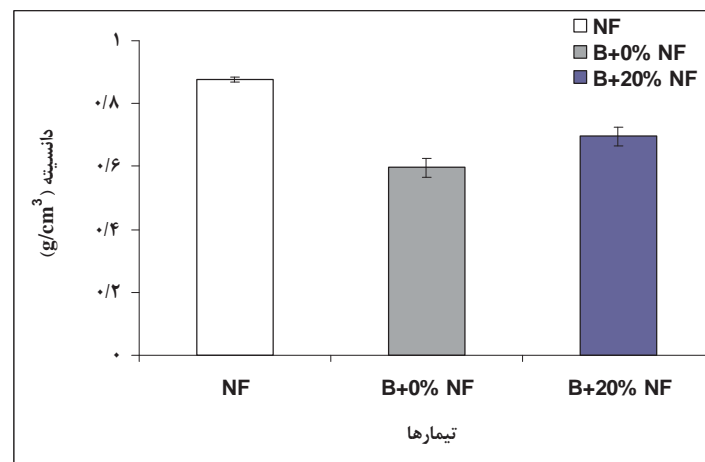
می‌شوند مشترک‌اند. این محققان نیز افزایش فوق‌العاده سطح ویژه الیاف طی فرایند سوپر آسیاب را، که منجر به دسترس‌پذیری بیشتر گروه‌های هیدروکسیل، افزایش پیوندیابی، انعطاف‌پذیری الیاف، و در نتیجه عدم برگشت موقعت الیاف به حالت اولیه (پس از عملیات پرس) می‌شود، از دلایل مربوط به این تغییرات دانسته‌اند [۱۹]. نتایج پژوهش سابرامانیان

محققان نیز با افزودن سلولز نانوفیبریله شده به خمیر کاغذ CMP با افزایش معنی‌دار در دانسیته و کاهش در ضخامت مواجه شدند. آن‌ها وجود ذرات سلولزی با ابعاد نانو را - که قادر به پر کردن خلل و فرج متداول در بین الیاف‌اند - دلیل این امر دانسته‌اند. به‌طور کلی، دلایل پدیده افزایش دانسیته و کاهش ضخامت که بر اثر وجود نانوفیبرهای سلولزی ایجاد



سطح ویژه بالا در این نانوالیاف مربوط دانسته‌اند. این میزان سطح ویژه بالا، به کمک برهم‌کنش بین فیبریل‌ها (نانوالیاف) و آب و مطالعات ته‌نشینی بررسی و درک می‌شود [۲۰].

و همکاری‌های نیز در تهیه سلولز نانوفیبریل‌شده به روش سوپراسیاب بیانگر دانسیته بالای کاغذهای ساخته‌شده از نانوالیاف (تهیه‌شده از خمیرکاغذ الیاف بلند سوزنی‌برگان) است. آن‌ها این شاخص را به



\*NF: نانوفیبر سلولز، و BF: باگاس است.

شکل ۵. مقایسه میانگین نتایج دانسیته

جدول ۴. جدول تجزیه واریانس مقادیر دانسیته

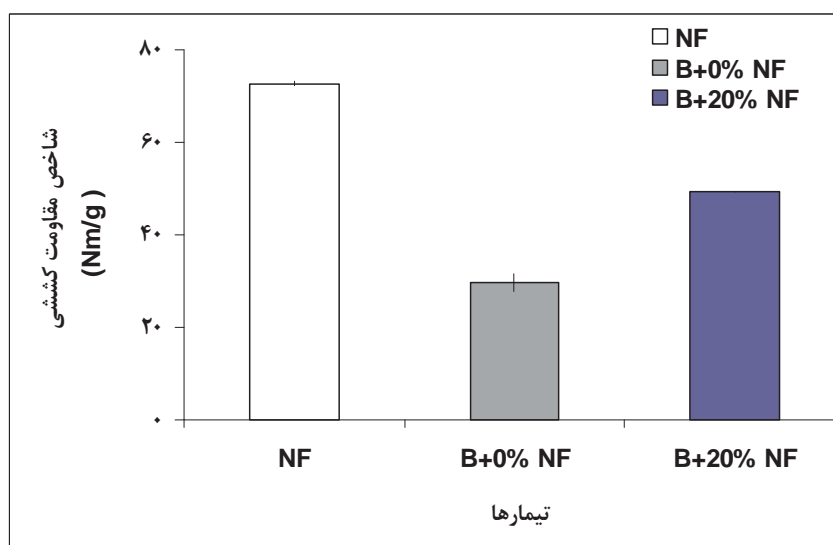
منبع تغییرات	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	F	معنی‌داری
	SS	df	MS		Sig.
تیمار افزودن نانوفیبر	۰/۱۲۱	۲	۰/۰۶۰	۳۴/۳۳۲	۰/۰۰۱
خطا	۰/۰۱۰	۶	۰/۰۰۲		
مجموع	۴/۸۳۷	۹			

بر اثر کوچک‌تر شدن ابعاد تا مقیاس نانومتری، سطح ویژه فیبرهای سلولزی افزایش می‌یابد. این به معنی قرار گرفتن تعداد بیشتر گروه‌های در دسترس هیدروکسیل در سطح نانوفیبرهاست که توانایی تشکیل پیوند هیدروژنی را با نانوفیبرهای مجاور دارند و نهایتاً سبب تشکیل شبکه‌ای از نانوفیبرها می‌شوند. درهم‌رفتگی نانوفیبرها در واحد حجم بیشتر از درهم‌رفتگی میکروفیبرها در واحد حجم است. درهم‌رفتگی فیبرها بر خواص کاغذ به‌ویژه خواص مکانیکی اثر معنی‌داری دارد [۱۱]. علاوه بر این

در شکل ۶ مقاومت کششی کاغذ، نانوکاغذ، و کاغذ حاوی نانوفیبر بر اساس شاخص مقاومت کششی و در جدول ۵ نتایج آزمون آماری آن ارائه شده است. آن‌گونه که از نتایج برمی‌آید، نانوکاغذ بیشترین مقادیر شاخص مقاومت کششی را دارا بوده است. همچنین افزودن نانوفیبر سلولز به خمیرکاغذ باگاس باعث بهبود مقاومت کششی کاغذهای حاصل شد. بدین ترتیب، با استفاده از یک ماده تقویت‌کننده زیست‌پایه، که ماهیت ساختار پایه آن با ساختار کاغذ یکسان است (سلولز)، مقاومت کششی کاغذهای ترکیبی بهبود می‌یابد.

تمرکز تنش و عدم توزیع یکسان آن می‌شود. با کوچک‌تر شدن ابعاد فیبرهای سلولزی به مقیاس نانو، ضعف‌ها و عیوب ساختاری فیبرها کاهش می‌یابد. در واقع، با کوچک‌تر شدن ابعاد، خواص فیبرها به سمت خواص نانوکریستال‌های بی‌عیب سوق پیدا می‌کند [۱۵] و در نتیجه نانو کاغذ ساخته شده از نانوفیبرهای سلولزی ضعف ساختاری-مکانیکی به مراتب کمتر، و خواص مکانیکی بهتری در مقایسه با کاغذ باگاس خواهد داشت.

عوامل، می‌توان به دلایل دیگر تأثیرگذار بر افزایش مقاومت کششی در این مورد اشاره کرد. برای مثال، کاغذ باگاس در واقع مخلوطی از فیبرها و آوندهای ساقه باگاس با ابعاد و ریخت‌شناسی متفاوت است. به‌علاوه، فیبرهای میکرومتری ویژگی‌های ذاتی مانند حفره، روزنه‌ها، و ناهمگنی و گسستگی در دیواره سلولی دارند. ناهمگنی در اجزای تشکیل‌دهنده شبکه کاغذ و نیز ناهمگنی در ساختار درونی فیبرها در زمینه خواص مکانیکی ضعف تلقی می‌شود و باعث



\*NF: نانوفیبر سلولزی، و BF: باگاس است.

شکل ۶. مقایسه میانگین نتایج شاخص مقاومت کششی کاغذها

جدول ۵. جدول تجزیه واریانس مقادیر شاخص مقاومت کششی

منبع تغییرات	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	F	معنی‌داری
	SS	df	MS		Sig.
تیمار افزودن نانوفیبر	۲۷۸۱/۵۰۷	۲	۱۳۹۰/۷۵۴	۳۸۳/۹۳۱	۰/۰۰۰
خطا	۲۱/۷۳۴	۶	۳/۶۲۲		
مجموع	۲۵۸۵۶/۴۸۴	۹			

سلولزی می‌توان پیش‌بینی کرد که این کاغذها در مقایسه با کاغذهای معمول استفاده شده در ماشین‌هایی چون

به‌واسطه مقادیر زیاد شاخص مقاومت کششی نانوکاغذ و کاغذهای ترکیبی تقویت شده با نانوفیبر

خمیر کاغذ الیاف بلند پالایش شده تا درجه روانی CSF ۳۵۰ به همراه ۲۰ درصد نانوفیبر سلولز تا آن مقدار افزایش یافت که حتی از لحاظ آماری بر اساس شاخص مقاومت کششی تفاوت معنی داری با کاغذ نانوفیبر خالص تهیه شده به روش سوپراسیاب نداشت [۳].

در نهایت، مقایسه مقادیر مقاومت به پارگی کاغذ معمولی، نانوکاغذ، و کاغذ حاوی نانوفیبر بر اساس شاخص این مقاومت در شکل ۷ آورده شده و جدول ۶ بیانگر نتایج آزمون آماری مربوط به این پارامتر است. این آزمون در کل نشان دهنده طبیعت عمومی فیبرهای موجود در کاغذ و میزان خمیر کوبی (پالایش) آنهاست. این آزمون معیار خوبی از مقاومت فیبرها در درون ورقه کاغذ است و همچنین در ارزیابی استحکام کاغذ و مقوایی، که در مراحل تبدیلی و حین مصرف در معرض تنش های پارگی قرار می گیرند، اهمیت ویژه ای دارد. هرچه طول فیبرها و پیوند بین آنها بیشتر باشد، مقاومت به پارگی آنها بیشتر خواهد بود [۱۳]. بیشترین و کمترین مقاومت به پارگی به ترتیب مربوط به کاغذ و نانوکاغذ بوده است. همچنین افزودن نانوفیبر در ظاهر باعث کاهش این مقاومت در کاغذهای ترکیبی شده است، اما از لحاظ آماری و گروه بندی دانکن کاهش مقاومت به پارگی کاغذهای ترکیبی باگاس در این سطح افزودن نانوفیبر و این سطح پالایش خمیر معنی دار نیست.

طول و مقاومت ذاتی فیبرها تأثیر معنی داری بر مقاومت به پارگی دارد [۱۳]. طی فرایند سوپراسیاب فیبرها به نانوفیبرها تبدیل شده اند. این نانوفیبرها در واقع نانوفیبریل یا دسته جات نانوفیبریل گیاهی اند که بر اثر نیروهای شدید فشاری و برشی آسیاب دیسکی به وجود آمده اند و زبری و مقاومت ذاتی نانوالیاف حاصل خیلی کمتر از میکروفیبرهای اولیه است. از طرف دیگر، در یک تخمین کلی طول این نانوفیبرها با استفاده از ریزنگاره های الکترونی روبشی و نیروی اتمی بین ۵ تا ۲۰ میکرومتر اندازه گیری شد. حال آنکه طول

ماشین های چاپ و بسته بندی که تحت نیروهای کششی قرار می گیرند مقاومت و کارایی بیشتری داشته باشند.

افزودن NFC به خمیر کاغذ CMP نیز موجب افزایش مقاومت کششی کاغذهای ترکیبی شده است. درگیری فیزیکی زیاد بین نانوالیاف سلولز با میکروالیاف معمول و ویژه زیاد NFC، که سبب افزایش تعداد پیوند هیدروژنی و افزایش سطح پیوند بین الیاف می شود، از دلایل افزایش مقاومت اعلام شده است. از طرف دیگر، پژوهشگران مذکور این مقاومت بیشتر را به توزیع یکنواخت تر تنش به دلیل سطح ویژه زیاد NFC، گسترش شبکه بین لیفی، و افزایش سطح تماس فیبر فیبر نسبت داده اند [۱۹]. حسن و همکارانش نیز گزارش کردند که افزودن نانوفیبر سلولز به خمیر کاغذ باگاس باعث بهبود مقاومت کششی ترا و خشک شده است. دلایل ذکر شده آنها کاملاً با توضیحات ذکر شده مطابقت دارد [۲]. افزودن نانوفیبر سلولزی به خمیر کاغذ سوزنی برگ کرافت رنگبری شده نیز به واسطه افزایش پیوندیابی متأثر از مساحت سطح زیاد نانوالیاف، باعث بهبود خواص مقاومت کششی کاغذ شده و از سوی پژوهشگران مختلف گزارش شده است [۳، ۱۸]. نتایج دیگر محققان نیز با نتایج این تحقیق و نمونه تحقیقات اشاره شده هم راستاست. به عبارت دیگر، افزودن نانوفیبر سلولز به ساختار خمیر کاغذ (و حتی کاغذ پایه با روش هایی چون پوشش دهی و...) باعث افزایش مقاومت کششی کاغذها شده است. در بین نمونه های کاغذی مقایسه شده در بسیاری از تحقیقات صورت گرفته کاغذ ساخته شده از نانوفیبر سلولز خالص بیشترین میزان مقاومت را در مقایسه با دیگر نمونه ها داشته است. با این حال، نتایج بررسی های دیگر نیز حاکی از این واقعیت است که با تغییر پارامترهای دیگر مانند پارامترهای فرایندی مثل پالایش امکان افزایش مقاومت کششی کاغذهای ترکیبی و رساندن آن تا مرز مقاومت نانوکاغذها بدون هیچ تیمار خاص دیگری نیز وجود دارد؛ چنانکه مقاومت کاغذ ترکیبی حاصل از

## 1. Wet Tensile Strength

متوسط فیبر باگاس حدود ۱۲۰۰ میکرومتر محاسبه شد. در نتیجه، بر اساس نتایج به دست آمده استنباط می شود که با افزایش و توسعه سطح پیوند هیدروژنی در شبکه لیفی کاغذ دارای نانوفیبر سلولز، تنش پارگی اعمال شده قادر به پارگی این شبکه پیوندی نبوده و به سراغ خود الیاف کاغذ (با میانگین طول کمتر و ضعف ذاتی بیشتر در مقایسه با کاغذ باگاس خالص) رفته و در نهایت با سهولت قادر به پارگی نانوکاغذها و کاغذهای ترکیبی خواهد بود.

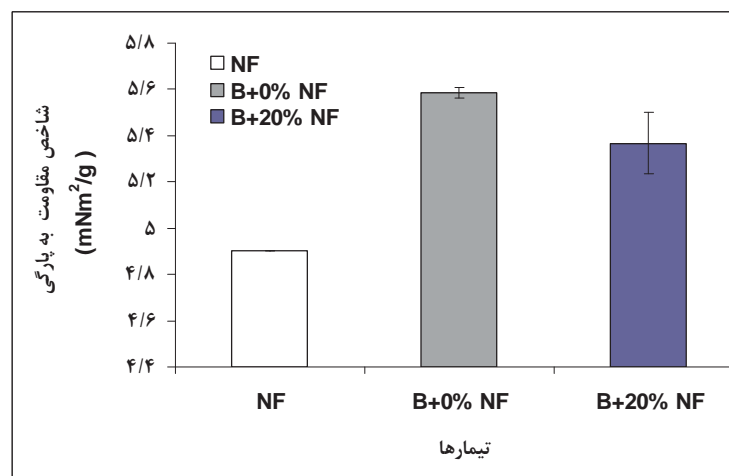
منابع علمی و گزارش‌های کمی در مورد بررسی مقاومت به پارگی در نانوکاغذ و کاغذهای ترکیبی و مقایسه آن‌ها به خصوص بر اساس شاخص مقاومت به پارگی وجود دارد، اما کلیت و مبانی کلی نتایج گزارش شده با یافته‌های این پژوهش هماهنگی و مطابقت دارد. کاهش مقاومت به پارگی پس از افزودن نانوفیبر سلولز به خمیر کاغذ باگاس را حسن و همکارانش گزارش کرده‌اند. ماده اولیه نانوفیبرهای سلولزی آن تحقیق از جنس خمیر کاغذ باگاس بود. آن‌ها علاوه بر گزارش روند کلی کاهش مقاومت به پارگی در کاغذهای خالص تهیه شده از نانوفیبرهای سلولزی و کاغذهای ترکیبی، همچنین با بررسی درصد‌های گوناگون افزودن نانوفیبر به کاغذ ترکیبی، به این نتیجه رسیدند که افزودن تا مقدار ۳۰ درصد نانوفیبر از لحاظ آماری باعث کاهش مقاومت به پارگی نشده است. آن‌ها نیز مقاومت به پارگی را به تعداد کل الیاف شرکت کننده در پارگی (گسیختگی)، طول الیاف، تعداد (میزان) و قدرت اتصال لیف به لیف مربوط می دانند. بر اساس گزارش آن‌ها، طی عمل پارگی دو اتفاق رخ می دهد؛ یا عمل پارگی شامل ۲ بخش است: ۱. بیرون کشیدن الیاف از ورق کاغذ؛ و ۲. گسیختگی الیاف. در کل، دومین عامل کمتر از اولین عامل رخ می دهد. آن‌ها اختلاف مقاومت به پارگی بین کاغذ نانوفیبر و باگاس را به چسبندگی بیشتر الیاف به هم (سطح اتصال و پیوند بالا) و پیوستگی بالاتر کاغذهای نانوفیبر مربوط می دانند که در نتیجه سبب می شود انرژی بیشتری در گسیختگی

فیبریل‌ها در مقایسه با بیرون کشیدن آن‌ها از ساختار کاغذ مصرف شود. گسیختگی فیبریل‌های نانوفیبر خیلی ساده تر از الیاف است، زیرا قطر فیبریل‌ها کمتر است. چسبندگی و پیوستگی بالای نانوکاغذ منجر به تمرکز نیروی پارگی روی سطح کوچک تری می شود [۲]، و بدین ترتیب این دسته از کاغذها راحت تر پاره می شوند که با تحلیل نتایج این تحقیق نیز هماهنگ است. اگرچه مقادیر عددی در بررسی نمونه‌های کاغذهای ترکیبی این تحقیق کاهش را نشان می دهد، پس از بررسی و گروه بندی داده‌ها مقدار شاخص مقاومت به پارگی کاغذ ترکیبی با شاخص مقاومت کاغذ میکروالیاف خالص در این سطح پالایش و این سطح افزودن نانوفیبر سلولز تفاوت معنی داری نداشت. بر اساس نتایج این گونه می توان استدلال کرد که وجود پیوندیابی بین نانوفیبرها با میکروالیاف و همچنین مقاومت ذاتی میکروالیاف باگاس (به واسطه طول و قطر بیشتر در مقایسه با نانوالیاف) مقاومت به پارگی کم نانوفیبرهای سلولزی را جبران کرده است و این کاغذهای ترکیبی به سهولت نانوکاغذها طی تنش پارگی پاره نمی شوند. در اکثر نتایج تحقیقات، نانوکاغذ کمترین مقاومت به پارگی را داشته است. چنانچه تفاوت‌های دیگری بین نتایج تحقیق حاضر و دیگر تحقیقات مشاهده شود، می توان آن را به نوع جنس نانوفیبرهای استخراج شده و نوع منبع لیگنوسلولزی مورد نظر (برای مثال، در تحقیقات حسن و همکاران نانوفیبر حاصل از خمیر کاغذ باگاس تیمار شده با زیلاناز بوده است) و روش تولید نانوفیبر و تغییر میزان اختلاط نانوفیبر مربوط دانست. مشخص است با افزایش نسبت نانوفیبر به میکروفیبرها کاهش مقاومت به پارگی مشخص تر و ملموس تر و معنی دارتر می شود، زیرا با افزایش میزان بیشتر نانوفیبر با ضعف در مقاومت پارگی به سمت کاغذ حاصل از نانوفیبر خالص پیش می رویم.

نتایج بررسی انجام گرفته دیگری بیانگر آن است که در سطح پالایش تا درجه روانی CSF ۳۵۰ کاهش مقاومت به پارگی در کاغذهای ترکیبی باگاس با

و شدت این تغییرات در مقاومت به پارگی معرفی شده‌اند. در توجیه رفتار مقاومت به پارگی کاغذهای ترکیبی این‌طور استدلال می‌شود که کوتاه‌شدن الیاف طی عملیات آسیاب موجب افت مقاومت به پارگی، و از طرفی افزایش سطح پیوند آن‌ها موجب افزایش مقاومت می‌شود؛ اما در کاغذهای ترکیبی عامل افت مقاومت بر اثر فرایند سوپراسیاب بر عامل بعدی افزایش مقاومت پیشی می‌گیرد. از سوی دیگر، افزودن NFC و استقرار آن در بین الیاف و ایجاد ممانعت در پیوند مستقیم الیاف با هم موجب کاهش مقاومت شبکه الیاف نسبت به تنش پارگی می‌شود [۱۹].

اختلاف ۲۰ درصد معنی‌دار بوده است [۳]. نوع منشأ خمیرکاغذ پایه در مقایسه با خمیرکاغذ باگاس نیز بر میزان تأثیر نانوفیبر بر ویژگی کاغذهای ترکیبی در شرایط یکسان (برای مثال سطح پالایش) تأثیرگذار است؛ چنان‌که در بررسی مقاومت به پارگی در کاغذهای ترکیبی ساخته‌شده از نانوفیبر و خمیرکاغذ الیاف بلند صنعتی، تفاوت کاهش در مقاومت معنی‌دار بود [۳]. روند مشابهی نیز بر کاهش مقاومت کششی در کاغذهای ترکیبی CMP و نانوفیبر سلولز گزارش شده است. در آن گزارش نیز تغییرات در دو عامل مقاومت ذاتی الیاف و سطح پیوند هیدروژنی دلیل تغییرات



\*NF: نانوفیبر سلولز، و BF: باگاس است.

شکل ۷. مقایسه میانگین نتایج شاخص مقاومت به پارگی

جدول ۶. جدول تجزیه واریانس مقادیر شاخص مقاومت به پارگی

منبع تغییرات	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	F	معنی‌داری
	SS	df	MS		Sig.
تیما افزودن نانوفیبر	۰/۰۲۷	۲	۰/۰۱۳۴	۲۱/۸۹۴	۰/۰۰۲
خطا	۰/۰۰۴	۶	۰/۰۰۰۶		
مجموع	۲۴/۹۱۲	۹			

## نتیجه‌گیری

از روش سوپراسیاب نتایج خوبی را نشان داده است.

تولید نانوفیبر سلولز از فیبرهای میکرومتری با استفاده

ضخامت آن کاهش یافته است. از طرفی، با افزودن این ماده به کاغذ مقاومت کششی افزایش و مقاومت به پارگی کاهش یافته که متناسب با کاربری می‌توان به‌کارگیری نانوفیبر سلولز در تولید کاغذ را تجویز کرد.

استفاده از نانوفیبر سلولز در تولید نانو کاغذها و کاغذهای تقویت‌شده نتایج فیزیکی و مکانیکی متفاوتی از خود نشان داده است. به‌طوری‌که با افزودن نانوفیبر سلولز به خمیر کاغذ شفافیت و دانسیته کاغذ افزایش و در مقابل

## References

- [1]. Samariha, A., and Hemmasi, A.H. (2005). Study of chemical and anatomical properties of bagasse used in pars paper factory. *Journal of Agricultural Science Islamic Azad University*, 13(3): 465-478.
- [2]. 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.
- [3]. 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.
- [4]. Hamzeh, Y., Abyaz, A., Mirfatahi Niaraki M.O.S., and Abdulkhani, A. (2009). Application of surfactants as pulping additives in soda pulping of Bagasse. *BioResources*, 4(4): 1267-1275.
- [5]. Ramsden, J. (2004). *Nanotechnology in Coatings, Inks and Adhesives*. Pira International Ltd. Leatherhead. UK.
- [6]. Garland, A. (2004). *Nanotechnology in Paper and Board Packaging*. Pira International Ltd. Leatherhead. UK.
- [7]. Syverud, K., and Stenius, P. (2009). Strength and barrier properties of MFC films, *Cellulose*, 16: 75-85.
- [8]. Aulin, C., Gällstedt, M., and Lindström, T. (2010). Oxygen and oil barrier properties of microfibrillated cellulose films and coatings. *Cellulose*, 17: 559-574.
- [9]. Henriksson, M., Berglund, L.A., Isaksson, P., Lindström, T., and Nishino, T. (2008). Cellulose Nanopaper Structures of High Toughness. *Biomacromolecules*, 9: 1579-1585.
- [10]. Hadilam, M., Afra, E., Ghasemian, A., and Yousefi, H. (2012). Preparation and properties of ground cellulose nanofibers. *Journal of Wood and Forest Science and Technoogy*, Accepted.
- [11]. Yousefi, H., Faezipour, M., Nishino, T., Ebrahimi, G., and Shakeri, A. (2011). All-cellulose composite and nanocomposite made from partially dissolved micro and nanofibers of canola straw. *Polymer Journal*, 43: 559-564.
- [12]. Taniguchi, T., and Okamura, K. (1998). New films produced from microfibrillated natural fibres. *Polymer International*. 47:291-294.
- [13]. Scot, W. (2005). *The fundamentals of paper properties*. Translated in Persian by Afra, A., Aeej Publication, Tehran, Iran.
- [14]. Nogi, M., Iwamoto, S., Nakagaito, N. A., and Yano, H. (2009). Optically transparent nanofiber paper. *Advanced Materials*, 21: 1595-1598.
- [15]. Yousefi, H., Nishino, T., Faezipour, M., Ebrahimi, G., and Shakeri, A. (2011). Direct fabrication of all-cellulose nanocomposite from cellulose microfibrils using ionic liquid-based nanowelding. *Biomacromolecules*, 12 (11): 4080-4085.
- [16]. Chang, F., Lee, S.H., Toba, K., Nagatani, A., and Endo T. (2011). Bamboo nanofiber preparation

- by HCW and grinding treatment and its application for nanocomposite. *Wood Science and Technology*. 46: 393-403.
- [17]. Corson, S.R. (1989). Aspects of mechanical pulp fibre separation and development in a disc refiner. *Paperi Ja Puu - Paper & Timber*, 71(7): 801-814.
- [18]. Taipale, T., österberg, M., Nykänen, A., Ruokolainen, J., and Laine, J. (2010). Effect of microfibrillated cellulose and fines on the drainage of kraft pulp suspension and paper strength, *Cellulose*, 17: 1005-1020.
- [19]. Alinia, S. (2011). Comparative study on the properties of paper produced from chemi-mechanical pulp (CMP) reinforced with Nanofibrillated Cellulose (NFC) and Microcrystalline Cellulose (MCC). M.Sc. thesis. Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources.
- [20]. Subramanian, R., Kononov, A., Kang, T., Paltakari, J., and Paulapuro H. (2008). Structure and properties of some natural cellulose fibrils. *BioResources*, 3(1): 192-203.