

## کاربرد الیاف معدنی پشم سنگ بر ویژگی‌های مقاومتی و ماندگاری خمیر کاغذ NSSC

- ❖ حسین جلالی ترشیزی\*؛ استادیار، گروه فناوری سلولز و کاغذ، دانشکده مهندسی فناوری‌های نوین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران
- ❖ فریبا خلیلی نفت‌چالی؛ کارشناس ارشد، گروه فناوری سلولز و کاغذ، دانشکده مهندسی فناوری‌های نوین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران
- ❖ حسین کرمانیان؛ استادیار، گروه فناوری سلولز و کاغذ، دانشکده مهندسی فناوری‌های نوین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

### چکیده

رشد مصرف کاغذ و کمبود منابع لیفی، راهکارهای متنوعی را برای تأمین ملزومات ضرورت بخشیده است؛ و کاربرد الیاف معدنی در این زمینه، روشی نوین و رو به رشد است. بنابراین در این پژوهش و با هدف کاهش نیاز به الیاف گیاهی، کاربرد آن در سامانه کاغذسازی بررسی گردید. کاربرد الیاف معدنی پشم سنگ در سطوح صفر، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد به همراه ۱ درصد نشاسته کاتیونی در خمیر کاغذ NSSC بر مقاومت‌های کاغذ دست‌ساز آزمایشگاهی (۶۰ گرم بر متر مربع)، ماندگاری الیاف معدنی و ماندگاری کل دوغاب نشان داد که جایگزینی و افزایش سهم الیاف پشم سنگ به‌علت قابلیت ایجاد اتصالات ضعیف‌تر در مقایسه با پیوندهای بین لیفی الیاف لیگنوسولولزی، موجب کاهش شاخص‌های مقاومتی وابسته به پیوند، نظیر کشش و ترکیدن می‌شود؛ در بالاترین سطح افزودن، بیشترین کاهش مقاومتی مشاهده شد. الیاف پشم سنگ به‌علت طول و مقاومت ذاتی بیشتر، تا حدی سبب افزایش شاخص مقاومت به پارگی شد، اما در سطح جایگزینی ۳۰ درصد و به‌سبب برتری کاهش مقاومت پیوندی بر افزایش ناشی از مقاومت ذاتی الیاف معدنی، کاهش شاخص پارگی کاغذ را در پی داشت. ایجاد شبکه درهم‌رفته الیاف آلی-معدنی در حین شکل‌گیری کاغذ، ماندگاری الیاف پشم سنگ و ماندگاری کل را افزایش داد، اما تفاوت آماری معنی‌داری بین سطوح ۲۰ و ۳۰ درصد الیاف پشم‌سنگ مشاهده نشد. بنابراین و با توجه به افت شدید مقاومت‌ها، سطح بهینه جایگزینی ۲۰ درصد الیاف پشم سنگ در خمیر کاغذ NSSC، شایان گزارش است. افزایش ماندگاری علاوه بر مزایای فنی و اقتصادی، به‌طور غیرمستقیم از جنبه‌های زیست‌محیطی همچون کاهش مواد جامد آلی معلق در آب‌های فرایندی، سهولت فرایندهای تصفیه و کاربرد کمتر منابع الیاف گیاهی و جنگل‌ها، نیز حائز اهمیت است.

واژگان کلیدی: الیاف معدنی، خمیر کاغذ NSSC، ماندگاری، ویژگی‌های مقاومتی کاغذ.

## مقدمه

کاغذ، فرآورده‌ای چندسازه‌ای است و ویژگی کاغذهای متداول تحت تأثیر سه فاکتور ماده خام لیگنوسلولوزی، نحوه فرآوری و کاربرد افزودنی‌ها قرار دارد. به منظور بهبود کیفیت کاغذ و فرایند تولید، اجزای کاغذسازی نیازمند تیمارهای مکانیکی و شیمیایی در پایانه تر کاغذسازی‌اند تا برای ارسال به ماشین کاغذ آماده شوند. اگر در ساخت کاغذ فقط از الیاف گیاهی استفاده شود، تنها دامنه محدودی از خواص کیفی به دست می‌آید. بنابراین تولیدکنندگان کاغذ بنا به نیاز و در هنگام آماده‌سازی، الیاف گیاهی را با انواع مختلفی از افزودنی‌ها ترکیب می‌کنند. کاربرد پرکننده‌های معدنی در کاغذهای مختلف متداول است که از لحاظ ریخت‌شناسی، اغلب پودری‌اند و ابعادی بسیار ریزتر از الیاف دارند و در مقایسه با الیاف در حین کاغذسازی، ماندگاری کمتری در فرآورده در حال شکل‌گیری دارند، قابلیت تشکیل پیوند با یکدیگر و با الیاف را ندارند و در نتیجه سبب کاهش مقاومت کاغذ می‌شوند. بی‌تردید اگر مواد غیرفیبری به جای ساختار دانه‌ای، دارای ساختاری لیفی باشند، قابلیت درهم‌رفتگی با الیاف کاغذ را خواهند داشت و افت مقاومت‌ها کمتر خواهد بود. نتایج پژوهش‌ها و کاربردهای متعدد صنعتی بر برتری الیاف معدنی در مقایسه با پرکننده‌های معدنی اذعان دارد. مثلاً کاربرد الیاف معدنی به‌عنوان جایگزین الیاف گیاهی در چندین واحد کاغذسازی نشان داد که الیاف معدنی قابلیت جایگزینی همراه با ویژگی مناسب در کاغذ، آلودگی زیست‌محیطی کمتر و هزینه کمتر مواد اولیه را دارند [۱]. کاربرد الیاف ویسکر گچ در تولید کاغذهای بسته‌بندی صنعتی فاقد پرکننده نشان داد ویسکرهای گچ

حتی می‌توانند موجب بهبود مقاومت‌ها به میزان مشابه کاربرد CPAM<sup>۱</sup> شوند. افزایش کاربرد الیاف مزبور تا ۵۰ درصد، علاوه بر تأمین ویژگی‌های مطلوب، در مقایسه با کربنات کلسیم و تالک، سبب مقاومت و نیز آهارپذیری بیشتر، و البته ماندگاری کمتر ویسکرها در مقایسه با پرکننده‌های شد [۲]. نتایج آزمایشگاهی و صنعتی کاربرد الیاف معدنی در کاغذهای بسته‌بندی و تست لاینر کرافت، حکایت از تأثیرپذیری چشمگیر مقاومت‌ها، صافی سطح، رنگ و ماتی کاغذ دارد؛ حتی با کاهش بیش از ۱۰ درصد گرماژ، پشت‌نمایی نیز ایجاد نشد [۳]. افزودن الیاف آلومینوسیلیکات با قطر ۵-۲ میکرومتر به خمیر کاغذ و تأثیر آن بر مقاومت، ماتی و براقی کاغذ [۴، ۵] و نیز تولید کاغذ عایق حرارتی در کاغذسازی متداول نیز بررسی شد [۶]. همچنین معرفی و مقایسه کاربرد الیاف ولاستونایت، گچ، بروسیت و اسپولایت در کاغذسازی به منظور جلوگیری از تخریب جنگل‌ها و کاهش هزینه‌های تولید بررسی شده است [۷]. نتایج بررسی تأثیر الیاف ویسکرهای سولفات کلسیم همراه با کربنات کلسیم رسوبی بر ویژگی‌های کاغذ نشان داد که مقدار خاکستر، ویژگی‌های نوری و مقاومت‌هایی نظیر کشش، پارگی و ترکیدن بهبود می‌یابد [۸]. تأثیر میزان پالایش، درصد الیاف سیلیکات آلومینیوم و عامل پراکنده‌ساز در خمیر کاغذ سوزنی‌برگان بر ویژگی‌های پراکنده‌سازی و مقاومت‌های کاغذ نیز بررسی شده است [۹]. کاربرد ولاستونایت اصلاح‌شده در خمیر کاغذ جوهرزدایی‌شده برای تولید کاغذ روزنامه، سبب کاهش COD<sup>۲</sup> و BOD<sup>۳</sup> آب سفید، کاهش کاربرد و اتلاف الیاف و نیز صرفه‌جویی در

1. Cationic Poly Acrylamide  
2. Chemical Oxygen Demand  
3. Biological Oxygen Demand

## مواد و روش‌ها

### آماده‌سازی ماده اولیه

خمیر کاغذ سولفیت خنثی نیمه‌شیمیایی ( $NSSC^1$ ) تهیه شده از کارخانه چوب و کاغذ مازندران (بازده ۷۸ درصد و  $pH$  تقریبی ۶/۵)، تا رسیدن به درجه روانی  $CSF^{2}$   $300 \pm 25$  ml با استفاده از کوبنده Valley Beater پالایش و با الک مش ۴۰۰ آگیری شد. الیاف معدنی تولیدی شرکت پشم سنگ ایران (شکل ۱)، دارای رنگ قهوه‌ای و از نظر شیمیایی خنثی است و تعلیق آبی حاصل از شست‌وشوی الیاف آن نیز خنثی تا کمی اسیدی است. الیاف مذکور دارای میانگین طول و قطر الیاف به ترتیب ۳۰۰۰ و ۸ میکرون بوده و دانسیته آن نیز در محدوده  $(Kg/m^3)$  ۱۰۰ گزارش گردیده است. آنالیز شیمیایی و مواد تشکیل دهنده پشم سنگ مزبور عبارتند از:  $(SiO_2)$  ۴۶ درصد،  $(Al_2O_3)$  ۱۴ درصد،  $(TiO_2)$  ۱/۵ درصد،  $CaO$  ۱۸ درصد و  $Fe_2O_3+FeO$  ۷/۵ تا ۸ درصد،  $MgO$  ۱۰ درصد. الیاف پشم سنگ تمیز و عاری از ناخالصی به مدت ۲۴ ساعت در آب خیسانده شد و سپس در همزن (۱۵۰۰ دور در دقیقه) در طی ۵ دقیقه پراکنده و در چهار سطح ۰، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد به خمیر کاغذ اضافه شد. کنترل ابعاد الیاف پس از هم‌زدن نیز صورت گرفت که حاکی از نبود تغییر بود. سپس آلوم (کاهنده بار آنیونی) به مقدار ۰/۴ درصد و در نهایت ماده مقاومت خشک نشاسته کاتیونی، پخته شده در دمای ۹۰-۸۵ درجه سلسیوس که به صورت روزانه آماده می‌شد، به میزان ۱ درصد و با فاصله زمانی ۱ دقیقه به دوغاب در حال تلاطم افزوده

هزینه‌ها و در عین حال کاهش مقاومت‌های کاغذ شد [۱۰]. پژوهش‌های کاربردی در زمینه استفاده از الیاف معدنی به حدی گسترش یافته که از الیاف مضر و خطر سازی نظیر پشم شیشه استفاده و راهکارهایی برای رفع ویژگی‌های نامطلوب آن گزارش شده که تیمار حرارتی الیاف شیشه، پالایش الیاف گیاهی و کاربرد مواد مقاومت خشک برای بهبود چشمگیر مقاومت‌ها از آن جمله است [۱۱]. در این میان، الیاف معدنی پشم سنگ پس از ذوب سنگ بازالت (دمای ۱۴۰۰ درجه سانتی‌گراد) و سپس تبدیل به الیافی با قطر ۸ میکرون، به دست می‌آیند. نقطه ذوب این الیاف ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد است و در نتیجه کاربرد عایق حرارتی دارند. مقایسه عایق‌های تولیدی از مواد مختلف از منظر محیط زیستی و سلامت انسان نشان داد که به لحاظ امکان ایجاد خطر برای سلامت، پشم سنگ کمترین مخاطرات را دارد [۱۲]. استفاده از الیاف معدنی در کاغذ، علاوه بر صرفه‌جویی در مصرف منابع الیاف گیاهی، به علت ساختار لیفی و مشابه الیاف گیاهی، افزون‌بر کاهش مقاومتی کمتر، به علت طول زیاد، سبب بهبود مقاومت به پارگی می‌شود [۱، ۲] و از طرفی نیز کاغذ عایق حرارتی با قابلیت استفاده در بسته‌بندی مواد غذایی (به ویژه غذاهای گرم) و نیز صنعت ساختمان به عنوان کاغذ دکوراتیو را به دست می‌دهد. همچنین الیاف معدنی با محیط زیست سازگارند و از نظر ممانعت حرارتی، صوتی و بیولوژیک نیز بسیار مناسب‌اند. بنابراین در این پژوهش جایگزینی بخشی از الیاف گیاهی با الیاف معدنی، که به وفور و با قیمت مناسب در ایران وجود دارد و راهی جدید در برابر صنایع کاغذسازی کشور خواهد گشود، بر ماندگاری و آگیری و ویژگی‌های کاغذ بررسی شد.

1. Neutral Sulfite Semi Chemical  
2. Canadian Standard Freeness

و براساس استاندارد *TAPPI T205 SP-02* کاغذهای دست‌ساز با وزن پایه ۶۰ گرم بر متر مربع در ۱۰ تکرار تهیه شد (شکل ۲). شایان ذکرست که تیمار شاهد فاقد هر گونه افزودنی بود و تیمار سطح صفر درصد نیز فقط آلوم و نشاسته کاتیونی (فاقد الیاف معدنی) داشت.

**اندازه‌گیری ویژگی‌ها:** اندازه‌گیری و محاسبه ویژگی‌ها مطابق با جدول ۱ و روابط ۱ و ۲ صورت گرفته و در محاسبه درصد ماندگاری الیاف معدنی، میزان خاکستر اولیه الیاف خمیر کاغذ NSSC نیز لحاظ شده است.



شکل ۲. کاغذ دست‌ساز حاوی الیاف معدنی



شکل ۱. الیاف پشم سنگ تهیه‌شده پیش از تمیزسازی

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

پالایش خمیر کاغذ	T۲۰۰ sp-۰۱	درجه روانی	T۲۲۷ om-۹۹	گرمای کاغذ	T۴۱۰ om-۰۲
شاخص ترکیب	T۴۰۳ om-۹۷	شاخص کشش	T۴۹۴ om-۰۱	شاخص پارگی	T۴۱۴ om-۹۸

$$(۱) \quad \text{جرم خاکستریقیمانده پس از سوختن کامل کاغذ} \times ۱۰۰ = \frac{\text{جرم الیاف معدنی به کاررفته}}{\text{جرم کاغذ ساخته شده}} \times ۱۰۰$$

$$(۲) \quad \text{درصد ماندگاری کل} = \frac{\text{جرم خشک کاغذ ساخته شده}}{\text{جرم کل مواد یکاررفته}} \times ۱۰۰$$

خمیر کاغذ NSSC با جایگزینی الیاف معدنی پشم سنگ و به دلیل کاهش قابلیت پیوندیابی بین لیفی، مقاومت کششی کاهش می‌یابد و با افزایش سهم الیاف معدنی، کاهش معنی‌دار پیوسته‌ای را در مقاومت کششی کاغذ دست‌ساز پدید می‌آورد. جایگزینی ۱۰ درصد الیاف گیاهی با الیاف معدنی در حضور نشاسته کاتیونی و آلوم نسبت به تیمار شاهد، سبب بهبود غیرمعنی‌دار مقاومت کششی شده، اما مقادیر بیشتر کاربرد الیاف

برای تحلیل آماری از نرم‌افزار SPSS و برای مقایسه میانگین‌ها و گروه‌بندی آنها از آزمون دانکن استفاده شد.

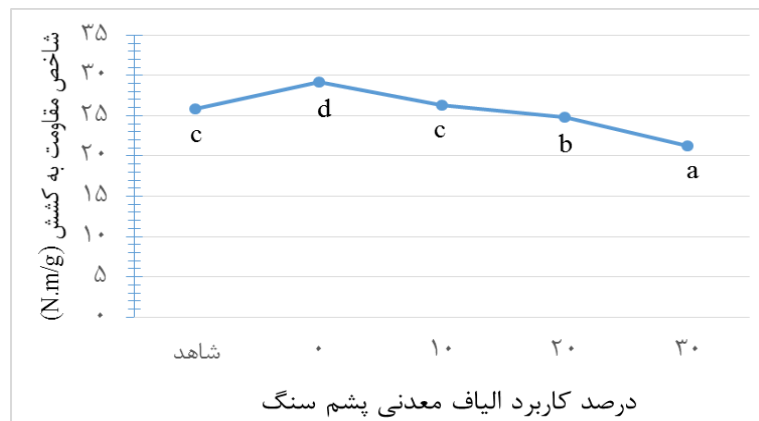
## نتایج و بحث

### شاخص مقاومت کششی

مقاومت کششی به مساحت سطح پیوند و مقاومت پیوندی بین اجزای دوغاب خمیر کاغذ بستگی دارد. در

مقایسه با کربنات کلسیم، سبب کاهش روشنایی، افزایش ماندگاری و افزایش چشمگیر شاخص‌های کششی، پارگی و ترکیدن کاغذ می‌شود [۱۳]. بنابراین الیاف معدنی برای کاربردهای نیازمند روشنی، مناسب گزارش نشد. همچنین کاغذ تولیدی از مخلوط الیاف پهن‌برگ و الیاف معدنی ولاستونایت یا اسپولایت نسبت به کاغذ واجد درصد مشابهی از پرکننده‌های کربنات کلسیم و تالک، دارای ویژگی‌های بهتری است، تا جایی که در نسبت ۱:۱ الیاف پهن‌برگ: اسپولایت در بهبود مقاومت پارگی و ولاستونایت در بهبود مقاومت کششی مؤثر بوده است [۱۴].

معدنی کاهش شاخص کشش را به سطوحی پایین‌تر از نمونه شاهد در بر داشته است (شکل ۳). شایان ذکر است که جایگزینی ۳۰ درصد الیاف خمیر کاغذ NSSC با الیاف معدنی، به کاهش کمتر از ۲۰ درصدی شاخص کشش در حضور نشاسته و آلوم منجر شده است. مرور دیگر پژوهش‌ها و مقایسه ویژگی‌های کاغذهای ساخته شده از ولاستونایت و کربنات کلسیم، نشان داده که با عنایت به ماهیت لیفی و طول بیشتر الیاف ولاستونایت در برابر کربنات کلسیم آسیابی، الیاف مزبور راحت‌تر با الیاف کاغذ درگیر می‌شود و ساختاری مرکب از الیاف گیاهی و معدنی را پدید می‌آورد که در

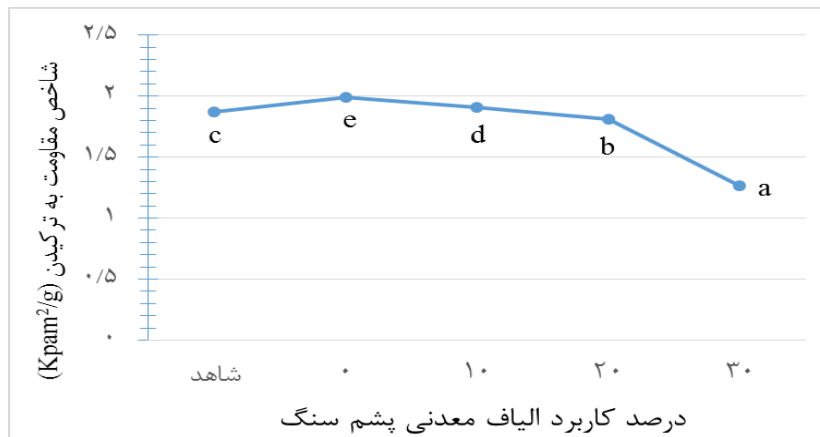


شکل ۳. تأثیر الیاف پشم سنگ بر شاخص مقاومت کششی کاغذ NSSC

درصد، در حدود ۳۰ درصد کاهش شاخص کشش دیده شد. کسب بیشترین میزان شاخص ترکیدن همانند شاخص کشش در سطح کاربرد صفر درصد الیاف معدنی، مرهون تأثیر آلوم و نشاسته کاتیونی در بهبود پیوندیابی و در نتیجه، مقاومت‌های مزبور است که کاربرد ۱۰ درصد الیاف معدنی، از شدت بهبود پدیدآمده نسبت به نمونه شاهد می‌کاهد. اما همچنان برتری معنی‌دار آماری را در شاخص ترکیدن نسبت به تیمار شاهد نشان می‌دهد.

### شاخص مقاومت به ترکیدن

این مقاومت نیز مانند مقاومت کششی متأثر از مقاومت پیوندی بین الیاف است و با افزایش جایگزینی الیاف پشم سنگ، کاهش می‌یابد. جایگزینی ۱۰ درصد الیاف معدنی در حضور نشاسته و آلوم، سبب افزایش معنی‌دار شاخص ترکیدن شد، اما سطوح بالاتر جایگزینی آن افت مقاومتی را نسبت به تیمار شاهد در پی داشت (شکل ۴)؛ به طوری که در سطح جایگزینی ۲۰ درصد، در حدود ۳ درصد کاهش شاخص کشش و در سطح جایگزینی ۳۰

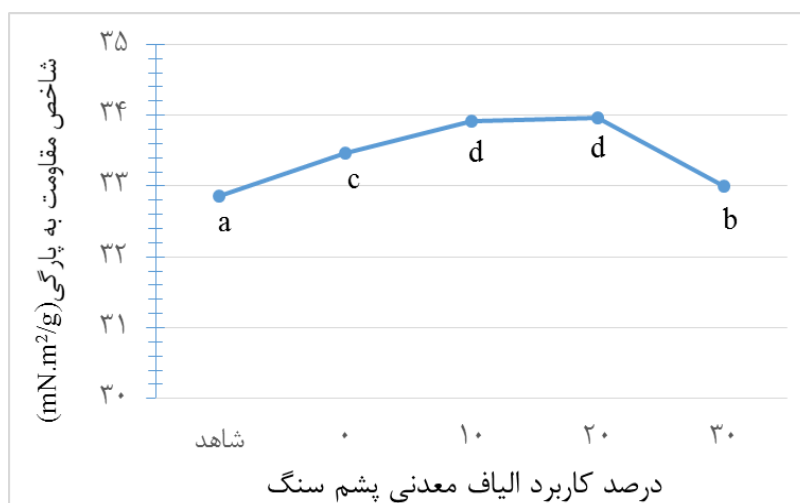


شکل ۴. تأثیر الیاف پشم سنگ بر شاخص مقاومت به ترکیب کاغذ NSSC

در مقایسه با تیمار شاهد فاقد هر گونه افزودنی، به طور متمایزی از برتری مقاومتی برخوردار است. همان گونه که پیشتر نیز اشاره شد، الیاف معدنی به دلیل طول بیشتر و ماهیت لیفی ذاتاً مقاوم‌تر، افزایش مقاومت به پارگی را سبب می‌شوند که این تغییر تا سطح جایگزینی ۲۰ درصد الیاف معدنی مشاهده شد. کاهش شاخص پارگی در سطح جایگزینی ۳۰ درصد در مقایسه با ۲۰ درصد، به دلیل غالب شدن اثر کاهشی پیوند بین لیفی است.

### شاخص مقاومت به پارگی

مقاومت پارگی متأثر از طول الیاف، مقاومت ذاتی الیاف همراه با پیوند بین الیاف است. شاخص پارگی کاغذهای آزمایشگاهی در سطح جایگزینی ۱۰ درصد الیاف معدنی، به طور معنی‌داری افزایش یافت و دوبرابر کردن جایگزینی الیاف نیز تأثیر معنی‌داری بر شاخص پارگی نداشت (شکل ۵). با این حال افزایش جایگزینی به سطح ۳۰ درصد، سبب کاهش مقاومت به پارگی و کاهش معنی‌دار در مقایسه با سطوح جایگزینی پایین‌تر الیاف معدنی شد؛ با وجود این و

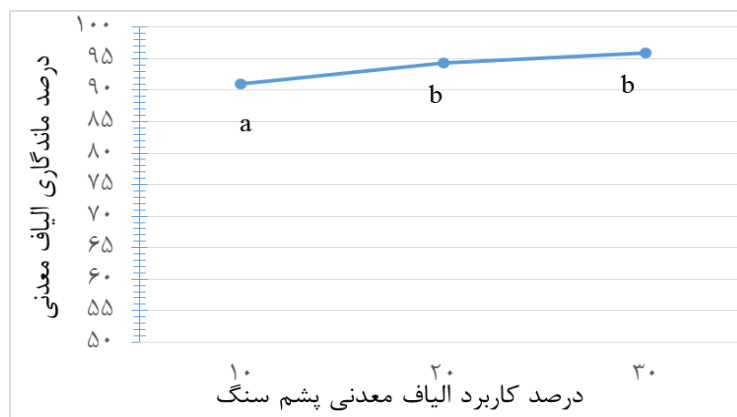


شکل ۵. تأثیر الیاف پشم سنگ بر شاخص مقاومت به پارگی کاغذ NSSC

### ماندگاری پشم سنگ

به‌طور کلی ماندگاری اجزای تشکیل‌دهنده کاغذ روی توری شکل‌گیری، بر ویژگی‌های کاغذ، کارایی و هزینه‌های عملیات کاغذسازی و جنبه‌های زیست‌محیطی اثر بحرانی و مهمی دارد. کاربرد الیاف معدنی در خمیر کاغذ NSSC از ماندگاری بسیار زیادی (بیش از ۹۰ درصد) برخوردار بود (شکل ۶) و با افزایش سهم الیاف پشم سنگ در کاغذ نهایی، برخلاف پرکننده‌های معدنی متداول کاغذسازی، نه تنها ماندگاری این افزودنی معدنی کاهش نیافت، بلکه پیوسته سبب افزایش ماندگاری الیاف معدنی نیز شد؛ تا جایی که ماندگاری الیاف پشم سنگ در حدود ۵

درصد افزایش یافت. این ویژگی برجسته الیاف معدنی در مقایسه با پرکننده‌های دانه‌ای متداول معدنی، افزایش نگهداشت آنها روی توری کاغذسازی همراه با افزایش درصد کاربرد آنهاست؛ که گاهی گروه‌بندی آماری معنی‌داری را نیز به وجود آورده است. به‌نظر می‌رسد ماهیت لیفی، طول به‌نسبت زیاد و قابلیت درهم‌تنیدگی الیاف معدنی با الیاف کاغذسازی، ماندگاری بیشتری را سبب شده است. نگهداشت حداکثری مواد معدنی لیفی در کاغذ در حال شکل‌گیری، از جنبه‌های مختلف فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی حایز اهمیت است و موجب ارتقای چشمگیر بهره‌وری تولید و مصرف بهینه مواد اولیه در فرایند کاغذسازی می‌شود.



شکل ۶. تأثیر الیاف پشم سنگ بر ماندگاری آن در کاغذ NSSC

### ماندگاری کل

جایگزینی و افزایش سهم جایگزینی الیاف معدنی در دوغاب نهایی کاغذسازی، سبب افزایش پیوسته نگهداشت مواد بر روی توری ماشین کاغذساز آزمایشگاهی شد و ماندگاری کل را ارتقا بخشید، تا جایی که به‌کمک الیاف به‌نسبت بلند پشم سنگ و در حضور آلوم و نشاسته کاتیونی، ماندگاری کل بیش از ۶ درصد افزایش یافت و از حدود ۹۴ درصد تیمار شاهد و ۹۶ درصد تیمار حاوی فقط آلوم و نشاسته کاتیونی، به

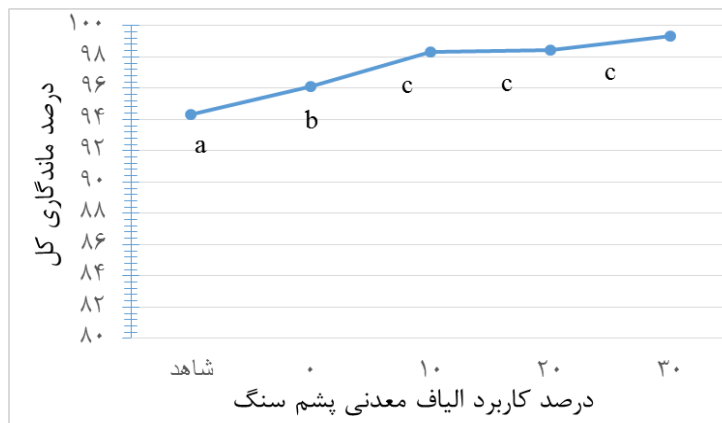
بیش از ۹۹ درصد در تیمار حاوی ۳۰ درصد الیاف معدنی رسید که مصداق افزایش بهره‌وری تولید است. نتایج شکل‌های ۶ و ۷ نشان می‌دهد که الیاف پشم سنگ علاوه بر ماندگاری زیاد در نمود لیفی در حال تشکیل کاغذ، سبب افزایش ماندگاری کل اجزای دوغاب کاغذسازی نیز می‌شود. چنین استدلال می‌شود که الیاف معدنی به‌دلیل طول زیاد و قابلیت درهم‌رفتگی، دست‌کم به‌صورت مکانیکی با خود و الیاف کاغذسازی، شبکه درهم‌تنیده‌ای از الیاف گیاهی و معدنی را به‌وجود

ماندگاری الیاف کاغذسازی، استفاده کمتر از منابع الیاف گیاهی و جنگل‌ها به‌عنوان منابع ماده اولیه لیفی کاغذسازی را موجب می‌شود. از طرفی نیز علاوه بر اینکه قیمت تمام‌شده الیاف معدنی کمتر از الیاف گیاهی است [۱، ۱۴]، مزایای زیست‌محیطی مورد اشاره دربردارنده مزیت‌های اقتصادی نیز خواهد بود.

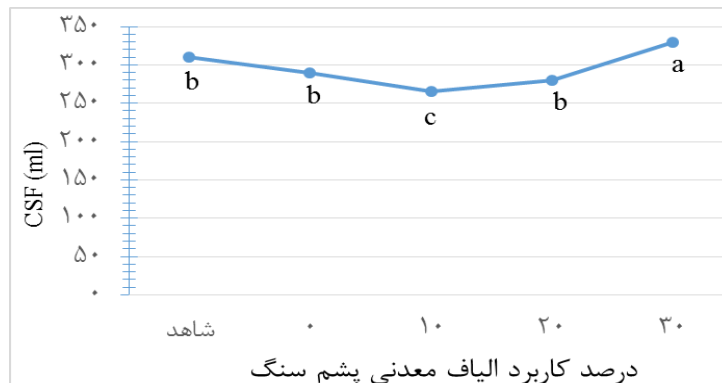
### درجه روانی

اندازه‌گیری درجه روانی خمیر کاغذ حاوی الیاف معدنی نشان‌داد که برخلاف انتظار، با جایگزینی الیاف معدنی خروج آب کندتر می‌شود، اما با افزایش سهم جایگزینی الیاف معدنی، به تدریج بر درجه روانی افزوده شده و خروج آب به‌طور معنی‌داری آسان‌تر می‌شود.

می‌آورد که موجب افزایش ماندگاری کل اجزای خمیرکاغذ می‌شود. بنابراین با جایگزینی الیاف پشم سنگ، به دلیل ایجاد ساختار درهم‌تنیده عمدتاً ناشی از الیاف بلند پشم‌سنگ، ماندگاری کل افزایش می‌یابد. یافته‌های محققان نیز این پدیده را تأیید می‌کند [۱۰]. از آنجا که الیاف معدنی پشم سنگ سبب افزایش ماندگاری و تبدیل مواد اولیه در سیستم شد، به‌طور غیرمستقیم علاوه بر جنبه‌های فنی و اقتصادی از چند جنبه زیست‌محیطی نیز اهمیت و برتری دارد: نخست اینکه موجب کاهش مقدار مواد جامد آلی معلق در آب‌های فرایندی در گردش و در نتیجه سهولت تصفیه آب‌های فرایندی می‌شود. همچنین استفاده از الیاف معدنی به‌عنوان جایگزین الیاف سلولزی و نیز افزایش



شکل ۷. تأثیر الیاف پشم سنگ بر ماندگاری کل کاغذ NSSC



شکل ۸. تأثیر الیاف پشم سنگ بر درجه روانی خمیر کاغذ NSSC



کاغذ پیوند برقرار می‌کند. از طرفی در پژوهش حاضر، الیاف پشم سنگ به علت طول زیاد و مقاومت ذاتی بیشتر، شاخص مقاومت به پارگی را در کاغذ افزایش داد، اما در سطح جایگزینی ۳۰ درصد و به سبب غلبه کاهش مقاومت پیوندی کاغذ بر تأثیر تقویتی ذاتی الیاف معدنی، شاخص پارگی کاغذ کاهش یافت. ویژگی‌های الیاف معدنی نظیر طول زیاد و قابلیت ایجاد اتصال با الیاف کاغذ، شبکه درهم‌رفته‌ای از الیاف آلی-معدنی را ایجاد می‌کند که در حین شکل‌گیری کاغذ، به سبب ماندگاری بسیار زیاد این افزودنی معدنی در کاغذ، هم ماندگاری الیاف پشم سنگ و هم ماندگاری کل را افزایش می‌دهد. با توجه به اینکه در این پژوهش شاخص همه مقاومت‌های مورد پژوهش در سطح جایگزینی ۳۰ درصد الیاف معدنی، شیب کاهش بسیار تندی را نسبت به دو سطح کاربرد کمتر، نشان داد و از طرفی نیز با وجود برتری، تفاوت آماری معنی‌داری در ماندگاری کل و ماندگاری مواد معدنی از سطح جایگزینی ۲۰ درصد به ۳۰ درصد الیاف پشم‌سنگ مشاهده نشد، سطح بهینه جایگزینی ۲۰ درصد الیاف پشم سنگ در دوغاب خمیر کاغذ NSSC را برای کاربردهای کاغذ بسته‌بندی می‌توان گزارش کرد. شایان توجه است که با وجود رایج نبودن کاربرد مواد غیرلیفی معدنی در تولید کاغذهای بسته‌بندی، الیاف معدنی را می‌توان به عنوان ماده اولیه بومی در دسترس و ارزان‌تر، جایگزین مناسبی برای بخشی از منابع لیفی گیاهی صنعت بسته‌بندی دانست. بنابراین و با عنایت به نتایج به دست آمده و شباهت ظاهری، جایگزینی بخشی از الیاف گیاهی توسط الیاف پشم سنگ، به عنوان گزینه فراروی صنایع کاغذ، در آینده امکان‌پذیر است. با توجه به اینکه این پژوهش، اولین گام در کشور در زمینه

مشکل‌تر شدن خروج آب در بدو جایگزینی الیاف معدنی را شاید بتوان به تشکیل شبکه درهم‌تنیده الیاف معدنی-الیاف گیاهی نسبت داد که مستند به شکل ۵، درصد ماندگاری کل نیز در این شرایط با شیب تندی افزایش یافت که حکایت از ماندگاری بیشتر اجزای دوغاب و در نتیجه کندتر شدن خروج آب دارد. اما پس از آن و در عین افزایش روانی، ماندگاری به‌طور معنی‌داری افزایش نیافت که نبود تغییر معنی‌دار ماندگاری، احتمالاً ناشی از کمتر شدن ظرفیت کلی دوغاب کاغذسازی در نگهداشت آب و در نتیجه سهل‌تر شدن جدایی و خروج آب از نمد تشکیل شده است؛ تا جایی که در بالاترین سطح جایگزینی الیاف معدنی، روانی به‌طور معنی‌داری افزایش می‌یابد و به سطحی بالاتر از تیمار شاهد فاقد هر گونه افزودنی می‌رسد.

### نتیجه‌گیری

در کاغذهای NSSC و در حضور مقادیر ثابت نشاسته کاتیونی (۱ درصد) و سولفات آلومینیوم (۰/۴ درصد)، جایگزینی الیاف پشم سنگ به علت قابلیت ایجاد اتصالات ضعیف‌تر در مقایسه با پیوندهای بین لیفی کاغذ، موجب کاهش شاخص مقاومت‌های وابسته به پیوند کششی و ترکیدن می‌شود که افزایش سطح جایگزینی الیاف معدنی نیز، به‌طور پیوسته و معنی‌داری نقصان مقاومتی را دنبال می‌کند؛ به‌طوری که در هر دو شاخص کششی و ترکیدن، در بالاترین سطح جایگزینی مطالعه‌شده (۳۰ درصد)، بیشترین کاهش مقاومتی مشاهده شد. البته این کاهش در مقایسه با پرکننده‌های رایج مورد استفاده در صنایع کاغذسازی کمتر است و نشان می‌دهد که الیاف پشم سنگ تا حدودی با الیاف

معدنی در زمینه حفظ و بهبود ویژگی‌های کاغذهای حاوی این الیاف، اصلاح الیاف معدنی یا دیگر روش‌های جبران نقیصه‌های حاصل از جایگزینی این الیاف ضروری است و مطالعات نویسنده مسئول در این زمینه در جریان است.

کاربرد الیاف معدنی در کاغذسازی است و منابع سرشار بومی برای تولید الیاف معدنی نیز در ایران در دسترس است، تمرکز بر کاربرد مقادیر بیشتر مواد مقاومت خشک به منظور جبران نقصان مقاومتی ناشی از کاربرد انواع الیاف معدنی، بررسی پیش‌تیمارهایی روی الیاف

## References

- [1]. Zhang Y. H., Liang Y. J. (2004). A study of the applications of mineral fiber in place of plant fiber. *China Pulp & Paper Industry Journal*, 12: 56-58.
- [2]. Yan L., Gang Y. (2010). A study on improving the quality of industrial wrapping paper with gypsum whiskers. *China Pulp & Paper Industry Journal*, 16: 27-32.
- [3]. Fei, Y. Z. (2005). An experiment of the application of mineral complex fiber in bag paper and paper board. *China Pulp & Paper Industry Journal*, 7: 65-68.
- [4]. Jinjiang P., Shan., Zh. C. (2008). Alumino-silicate fiber paper encountered a few problems and their solutions in the process of papermaking. *Shanghai Paper Making Journal*, 6: 41-45.
- [5]. Fei, J. Y., Shan., Zh. C., Dongmei, Y., Jinjiang, P. (2008). Alumino-silicate fiber replace parts of plant fiber in the application of papermaking. *Hunan Papermaking Journal*, 3: 42-48.
- [6]. Fei, J. Y., Shan., Zh. C., Dongmei, Y., Jinjiang, P. (2008). A research on manufacturing process of alumino-silicate fiber paper. *China Pulp & Paper Industry Journal*, 3: 25-28.
- [7]. Ye, ZH., Xin, X. X. (2010). Application of fibrous non-metallic minerals in papermaking industry. *China Non-Metallic Minerals Industry Journal*, 4: 5-7.
- [8]. Lin, W. S., Ying, J. X., Shan, C. F., Xi, C. X. (2010). Application of inorganic mineral fiber and filler in papermaking. *Journal of Qingdao University of Science and Technology*, 4: 376-379.
- [9]. Shan., Zh. C., Jin j. P., Jie, B. T., Jing, W. J., Fu1, C. K. (2009). An investigation on heat insulation paper from aluminium silicate fiber. *China Pulp & Paper Industry Journal*, 2: 24-27.
- [10]. Fe, Zh. (2006). Study and application of mineral fiber additives in newsprint production. *Paper Science & Technology Journal*, 5: 50-53.
- [11]. He, L., Yangui, H., Shou-yao, W., Xian-nan, H. (2007). A study on the strengthening of glass fiber paper. *China Pulp & Paper Industry Journal*, 4: 44-46.
- [12]. Schmidt, A. C., Jensen, A. A., Clausen, A. U., Kamstrup, O., Postlethwaite D. (2004). A comparative Life Cycle assessment of building insulation products made of stone wool, paper wool and flax. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 9 (1): 122-129.
- [13]. Lijin, S., Jijiao, H., Juanjuan, L., Qifeng, Y. (2009). Comparative analysis of papermaking properties between mineral composition fiber and calcium carbonate with plant fiber. *Paper Science & Technology Journal*, 5: 57-61.
- [14]. Yun Yan, L., Liu, Q., Yuan, S. (2010). Papermaking of mineral fiber composites. *Journal of Scientific and Industrial Research*, 69 (3): 215-220.