

## ارزیابی تاثیر دمای اختلاط خمیر شیمیایی مکانیکی (CMP) و نانوفیبر سلولز بر ویژگی‌های کاغذ

صهبا علی‌نیا<sup>۱\*</sup>، الیاس افرا<sup>۱</sup>، حسین رسالتی<sup>۱</sup> و حسین یوسفی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

<sup>۲</sup> گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران

### چکیده

عامل‌های فرآیندی بسیاری بر چگونگی عملکرد نانوفیبر سلولز به عنوان یک تقویت‌کننده سلولزی دوست‌دار محیط زیست تاثیر گذارند. یکی از عامل‌های بالقوه تاثیرگذار، دمای اختلاط سوسپانسیون خمیر با نانوفیبر سلولز بوده که در این تحقیق به آن پرداخته شده است. به منظور بررسی تاثیر این مشخصه شتاب آگیری اختلاط به دست آمده و ویژگی‌های مقاومتی کاغذ نهایی تولیدشده مورد آزمون و بررسی قرار گرفت. بدین منظور سوسپانسیون‌های (غلظت ۰/۲٪) با ۵٪ وزنی نانوفیبر سلولز و خمیر شیمیایی مکانیکی با درجه روانی CSF, ۲۵۰ ml تهیه و پس از اختلاط بر روی همزن مغناطیسی به مدت ۱ ساعت و در دمای ۲۵، ۵۰ و ۷۰°C همزنی شدند. سوسپانسیون به دست آمده با پالایش (فیلتراسیون) خلاء آگیری شد. پس از آگیری، کاغذ تولیدی پرس و در آن به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۱۰۰°C خشک شد. نتایج آزمایش‌ها نشان دادند که افزایش دمای اختلاط موجب کاهش زمان آگیری، بهبود ویژگی‌های مقاومتی و کاهش میزان نفوذپذیری به هوای کاغذ نهایی شدند. میزان شاخص مقاومت کششی افزایش چشم‌گیری داشته و با افزایش دما تا ۷۰°C، مقاومت به پارگی کاغذ در حدود دو برابر افزایش یافت.

**واژه‌های کلیدی:** نانوفیبر سلولز، دمای اختلاط، خمیر شیمیایی مکانیکی و ویژگی‌های فیزیکی و مقاومتی کاغذ

## مقدمه

سلولز که از اعضای خانواده پلی ساکاریدهاست، فراوان ترین پلیمر زیستی و ماده تجدیدشونده طبیعی است که میلیون ها سال در طبیعت تولید شده و دارای دسته های رشته- رشته مانندی به نام ریز لیفچه (میکروفیبریل) است که قطر آن ها ۳ تا ۳۰ نانومتر می باشد. لذا این ریزلیفچه ها جزء نانوفیبرها دسته بندی می شوند. در واقع نانوالیاف سلولز یکی از نازک ترین و ظریف ترین فیبر در جهان طبیعت است که دارای ویژگی های جالبی هم چون تجدیدپذیری، قیمت کم، سطح ویژه زیاد، مقاومت ویژه زیاد (در حد کولار) و ... می باشند. مولکول های سلولز به طور کامل خطی هستند و گرایش شدیدی به تشکیل پیوندهای هیدروژنی بین مولکولی دارند. در نتیجه، دسته هایی از مولکول های سلولز با یکدیگر مجتمع می شوند و ریزلیفچه ها را تشکیل می دهند. از تجمع ریزلیفچه ها، لیفچه، و از تجمع لیفچه ها، لیف سلولزی تشکیل می شود. بر اثر همین ساختار لیفی و پیوندهای هیدروژنی محکم، سلولز از مقاومت کششی بالایی داشته و در بیشتر حلال ها نامحلول می باشد [۱۲]. بررسی های پرشماری برای به کارگیری نانو ساختارهای سلولزی انجام شده است. فویه<sup>۱</sup> و همکاران (۱۹۹۵) برای تقویت شیرابه (لاتکس) اکریلات از نانو کریستال های سلولز به دست آمده از تونیکات (نوعی جانور دریایی) استفاده کرده و نانو چندسازه سلولزی تولید نمودند. افزودن تنها ۶ درصد وزنی نانو کریستال سلولز به دست آمده از تونیکات سبب افزایش ویژگی های مکانیکی شیرابه تا ۵۰۰ برابر شد. اما در مورد کاربرد نانو ساختارهای سلولزی در بهبود ویژگی های کاغذ تحقیقات کمی صورت گرفته است [۷]. یکی از هدف های اصلی کاربرد نانوفیبر سلولز در کاغذ بهبود ویژگی های جلوگیری کنندگی آن می باشد. بدین منظور روش های مختلفی برای پیوستن آن به کاغذ وجود دارد که از جمله آن می توان به همگن سازی<sup>۲</sup> یا آسیاب کردن خمیر کاغذ رنگبری شده یا خمیر حل شونده<sup>۳</sup> برای تولید نانوفیبر سلولز و پاشش سوسپانسیون به دست آمده بر روی کاغذ مورد نظر اشاره نمود. به این منظور سیورود و استنیوس (۲۰۰۸)،

با همگن سازی خمیر سولفیت به کلی رنگبری شده صنوبر در دستگاه همگن ساز با فشار ۶۰۰ bar سلولز ریزلیفچه ای شده تهیه کرده و با درصدهای مختلف به خمیر کاغذ کرافت رنگبری شده افزودند. نتایج بیانگر آن است که میزان قابلیت نفوذپذیری به هوا با افزایش اندود و ضخامت سلولز ریزلیفچه ای شده کاهش یافته است. هم چنین شاخص مقاومت کششی کاغذ دارای تنها ۸ درصد نانوفیبر سلولز (۴۰ Nm/g) به میزان قابل توجهی افزایش و جلوگیری از هوا (۳۶۰ nm/Pas) در این کاغذ کاهش پیدا کرده است. از سویی، به منظور کاهش مصرف انرژی برای تبدیل مکانیکی لیاف به نانوالیاف با پیش تیمار آنزیمی و تیمار مکانیکی خمیر، نانو کاغذهایی با مقاومت کششی ۲۱۴ MPa تولید شد که از مقاومت کششی چدن بیشتر و در حد مقاومت کششی فولاد می باشد. در این رابطه هنریکسون<sup>۴</sup> و همکاران (۲۰۰۸)، برای تولید سلولز ریزلیفچه ای شده در هر بار ابتدا ۴۰ g از لیاف خمیر حل شونده سوزنی برگ ها را با غلظت های مختلف آنزیم نووزیم<sup>۵</sup> (یک آنزیم اندوگلوکوناز) و پس از آن با عملیات مکانیکی تیمار کردند. در اثر شتاب و فشار زیاد جریان، نیروهای برشی ای در دستگاه ایجاد شده که منجر به تولید سوسپانسیون نانوالیاف سلولزی با قطر میانگین ۱۰ nm تا ۴۰ شدند. در روش ساخت نانو کاغذ به دست آمده که از آنزیم استفاده شد، آسیب کمتری به لیاف سلولزی وارد آمده و مقاومت ذاتی آنها افت کمتری پیدا می کند. تایپال<sup>۶</sup> و همکاران (۲۰۱۰)، لیاف نرمه و NFC را به خمیر کرافت افزودند و اثر نانوفیبر سلولز (NFC) و نرمه را بر زمان آبگیری و ویژگی های کاغذ تولیدی بررسی نمودند. نتایج آزمایش ها بیانگر آن بود که همه نمونه های NFC و نرمه تولید شده به دلیل تفاوت در روش تولیدشان ویژگی ها و زمان آبگیری به کلی متفاوتی داشته اند. نتایج نشان داد افزودن NFC نرخ آبگیری را کاهش و موجب بهبود و افزایش مقاومت های کاغذ می شود. مدنی و همکاران (۲۰۱۱)، به بررسی جداسازی و حذف لیاف بلند ذرات NFC و تأثیر آن بر مقاومت کششی کاغذ تولیدی از خمیر شیمیایی رنگبری شده پهن برگ پرداختند. نتایج

<sup>4</sup> Henriksson

<sup>5</sup> Novozym 476

<sup>6</sup> Taipale

<sup>1</sup> Favior

<sup>2</sup> Homogenization

<sup>3</sup> Dissolving Pulp

PFI با ۱۴۰۰۰ دور در ساعت به ۲۵۰ ml, CSF رسانیده شد. در این تحقیق، کاغذهای دست‌ساز برابر روش بررسی های پیشین تهیه شدند [۲، ۹ و ۱۱]. بر این پایه سوسپانسیون‌های (غلظت ۰/۲٪) حاوی ۵٪ وزنی سلولز نانوفیبریل‌شده با خمیر شیمیایی مکانیکی (۲۵۰ ml, CSF) و گراماژ کل  $80 \pm 1 \text{ g/m}^2$  تهیه و پس از اختلاط بر روی همزن مغناطیسی (قابل تنظیم گرمایی) به مدت ۱ ساعت و در دمای اتاق (۲۵)، ۵۰ و  $70^\circ\text{C}$  همزنی شدند. سوسپانسیون به دست آمده با پالایش (فیلتراسیون) خلاء آگیری شد. زمان لازم برای آگیری سوسپانسیون مربوط به هر نمونه نیز ثبت شد. آنگاه کاغذ نهایی در دستگاه پرس سرد با فشار ۳ bar پرس شده و در نهایت به مدت ۲۴ ساعت در آون ( $100^\circ\text{C}$ ) خشک شدند. در این تحقیق نتایج به دست آمده از اندازه‌گیری‌های ویژگی‌های کششی از جمله مقاومت کششی<sup>۶</sup>، تغییر طول نسبی<sup>۷</sup> و جذب انرژی کششی<sup>۸</sup> ( $0.1-0.4 \text{ om-T494}$ )، مقاومت به پارگی<sup>۹</sup> ( $0.4-0.6 \text{ om-T460}$ ) نمونه‌ها با ۳ تکرار برای هر تیمار اندازه‌گیری شد. تجزیه و تحلیل داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار آماری SPSS در قالب طرح تحلیل واریانس یک‌سویه و در نهایت مقایسه و گروه‌بندی میانگین‌ها به کمک آزمون دانکن [در سطح ۵٪ ( $P < 0.05$ )] انجام شد.

آزمایش‌ها نشان داد که افزودن ذرات NFC بدون الیاف بلند در مقایسه با افزودن ذرات بدون تیمار NFC، مقاومت کششی کاغذ تولیدی را به میزان قابل توجهی افزایش می‌دهد. از آنجایی که استفاده از تقویت‌کننده‌های غیر طبیعی موجب بهبود ناچیز ویژگی‌های مقاومتی کاغذ در قبال افزایش هزینه و مسائل زیست‌محیطی می‌شوند، لذا بنا شد تا در این تحقیق از یک تقویت‌کننده سلولزی و طبیعی در ابعاد نانو با توجه به ویژگی انکارناپذیر مواد در ابعاد نانومتری برای بهبود ویژگی‌های کاغذ استفاده شود. در این بررسی از خمیر شیمیایی مکانیکی رنگبری‌نشده کارخانه چوب‌و‌کاغذ مازندران (با ۷۰٪ مخلوط کاتین و گرده‌بینه با کیفیت خوب، ۱۵-۵٪ الیاف بلند رنگبری‌نشده و ۱۵-۵٪ الیاف بازیافتی و مقوای آزمونی<sup>۱</sup>) که در تولید مقوای روکش استفاده می‌شود به عنوان کاغذ پایه و از نانوفیبر سلولز به عنوان تقویت‌کننده این خمیر استفاده شد. یکی از نارسایی‌های دیده شده در استفاده از این نانوذرات، چگونگی برهمکنش آن‌ها با سوسپانسیون خمیر و چگونگی استقرار مناسب آن‌ها در ساختار کاغذ تولیدشده می‌باشد که عامل‌های فرآیندی به یقین می‌تواند نقش مهمی را در این زمینه بازی کند. بدین منظور در این تحقیق اثر دمای اختلاط سوسپانسیون خمیر و نانوفیبر سلولز به عنوان یکی از مشخصه‌های مهم تأثیرگذار بر برهمکنش‌های اجزاء مخلوط که به یقین بر ویژگی‌های کاغذ نهایی تأثیرگذار خواهد بود، مورد ارزیابی قرار گرفت.

### مواد و روش‌ها

سلولز نانوفیبریل‌شده<sup>۲</sup> (NFC) از راه فرآیند آسیاب‌کردن<sup>۳</sup> خمیر الیاف بلند وارداتی کارخانه چوب و کاغذ مازندران در دانشگاه کوبه<sup>۴</sup> کشور ژاپن با میانگین قطری  $28 \pm 11 \text{ nm}$  تهیه شد (شکل ۱) و خمیر شیمیایی مکانیکی نیز از کارخانه یاد شده خریداری شد. درجهٔ روانی اولیهٔ خمیر تهیه‌شده بر پایه استاندارد شماره ۹۴-۲۲۷ om آیین‌نامهٔ تاپی<sup>۵</sup> اندازه‌گیری (CSF, ml, ۷۳۰) و به کمک دستگاه کوبنده

<sup>6</sup>Tensile Strength

<sup>7</sup>Elongation

<sup>8</sup>Tensile Energy Absorption

<sup>9</sup>Tear Strength

<sup>10</sup>Air Resistance

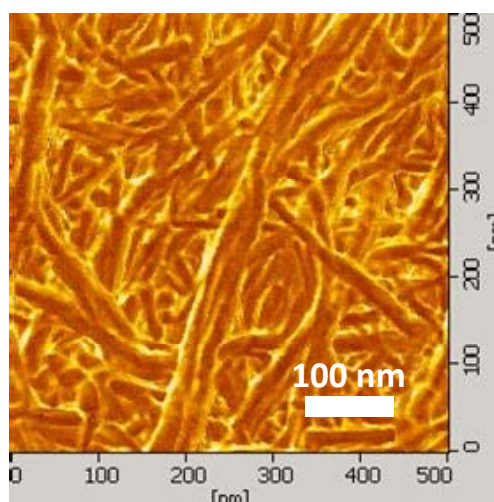
<sup>1</sup> Test Liner

<sup>2</sup> Nano fibrillated cellulose

<sup>3</sup> MKCA6-3; Masuko Sangyo Co., Ltd., Japan

<sup>4</sup> Kobe University

<sup>5</sup> TAPPI



شکل ۱- ریزنگاره میکروسکوپ نیروی اتمی نانوفیبرهای سلولزی مورد استفاده در این بررسی

جلوگیری از ایجاد دسته‌های نانوفیبری، قابلیت برهمکنش نانوفیبر با فیبر افزایش یافته و از این راه از ظرفیت تقویت‌کنندگی نانوفیبرهای سلولزی بهتر استفاده می‌شود. با افزایش دمای اختلاط هیدروکسیل‌های سطوح نانوفیبر و فیبر به طور فعال‌تری در تشکیل پیوند هیدروژنی شرکت می‌کنند. همه این دلایل یاد شده در نهایت منجر به افزایش ویژگی‌های کششی شده است. تحقیقات سیورود و استنیوس (۲۰۰۹) نیز ثابت کرده بود که با افزایش میزان NFC ویژگی‌های کششی کاغذ افزایش می‌یابد که با روند داده‌های این مشخصه در این بررسی یکسان است. افزایش مشخصه‌های ویژگی‌های کششی کاغذ CMP، به ویژه شاخص جذب انرژی کششی یک جنبه کاربردی مهم برای این فرآورده‌ها تلقی می‌شود.

## نتایج و بحث

### مقاومت کششی، تغییر طول نسبی و جذب انرژی کششی

شکل‌های ۲ تا ۴ نتایج به دست آمده از اندازه‌گیری‌های شاخص مقاومت کششی، تغییر طول نسبی و شاخص جذب انرژی کششی را نشان می‌دهند. بنابراین شکل‌ها، با افزایش دمای اختلاط سوسپانسیون خمیر و ذرات NFC، به مقادیر این مشخصه‌ها افزوده شده است. در ضمن محاسبه‌های آماری نشان داده در همه موارد اختلاف معناداری بین میانگین داده‌ها وجود دارد (جدول ۲، ۱ و ۳). افزایش دمای اختلاط موجب افزایش جنبش مولکول‌های آب می‌شود. به نظر می‌رسد با افزایش جنبش مولکول‌های آب، توزیع و پراکنش نانوفیبرها بیشتر شده و لذا از دلمه‌گی آن‌ها کاسته می‌شود. در نتیجه این پدیده موجب کاهش برهمکنش نانوفیبر با نانوفیبر شده و با

جدول ۱- آزمون تجزیه واریانس تأثیر سطوح مختلف دمای اختلاط بر مقاومت کششی

منابع تغییر	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	F محاسبه شده	سطح معنی داری
S.O.V	S.S	d.f	M.S		
تیمار	۷۲/۸۲۶	۲	۳۶/۸۲۶	۳۶/۴۱۳	۰/۰۰۰
خطا	۶/۰۰۰	۶	۱/۰۰۰		
کل	۷۸/۸۲۶	۸			

Tensile				
Duncan <sup>a</sup>				
Treatment	N	Subset for alpha = 0.05		
		1	2	3
1.00	3	59.4700		
2.00	3		63.7600	
3.00	3			66.3700
Sig.		1.000	1.000	1.000
Means for groups in homogeneous subsets are displayed.				
a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.				

جدول ۲- آزمون تجزیه واریانس تأثیر سطوح مختلف دمای اختلاط بر تغییر طول نسبی

منابع تغییر	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	F محاسبه شده	سطح معنی داری
S.O.V	S.S	d.f	M.S		
تیمار	۰/۰۷۳	۲	۰/۰۳۶	۵۴۴/۵۰۰	۰/۰۰۰
خطا	۰/۰۰۰	۶	۰/۰۰۰		
کل	۰/۰۷۳	۸			

Elongation				
Duncan <sup>a</sup>				
Treatment	N	Subset for alpha = 0.05		
		1	2	3
1.00	3	1.7800		
2.00	3		1.8900	
3.00	3			2.0000
Sig.		1.000	1.000	1.000
Means for groups in homogeneous subsets are displayed.				
a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.				

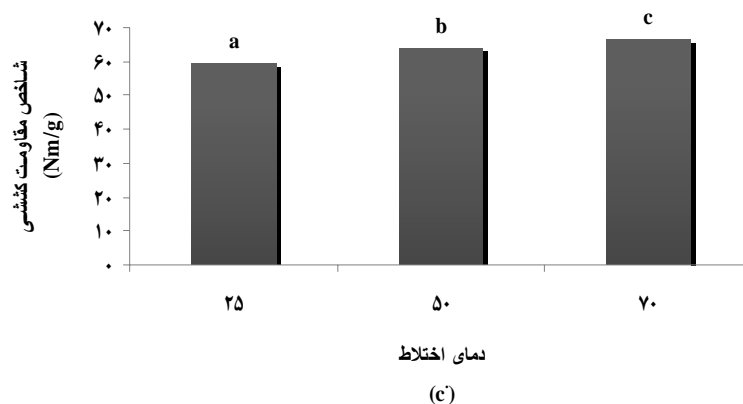
جدول ۳- آزمون تجزیه واریانس تأثیر سطوح مختلف دمای اختلاط بر جذب انرژی کششی

منابع تغییر	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	F محاسبه شده	سطح معنی داری
S.O.V	S.S	d.f	M.S		
تیمار	۰/۰۱۹	۲	۰/۰۱۰	۱۴۵/۵۰۰	۰/۰۰۰
خطا	۰/۰۰۰	۶	۰/۰۰۰		
کل	۰/۰۲۰	۸			

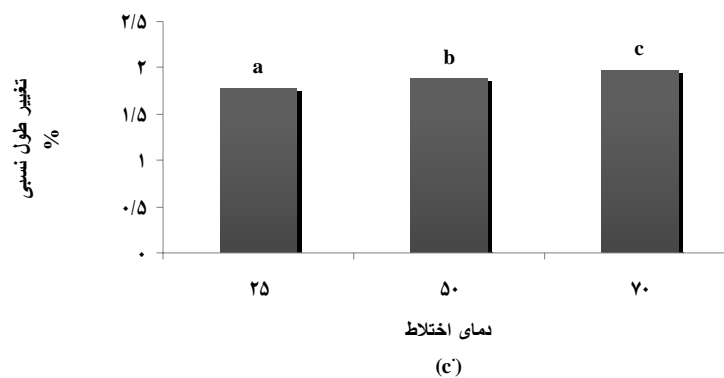
Tensile Energy Absorption				
Duncan <sup>a</sup>				
Treatment	N	Subset for alpha = 0.05		
		1	2	3
1.00	3	.4900		
2.00	3		.5700	
3.00	3			.6000
Sig.		1.000	1.000	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

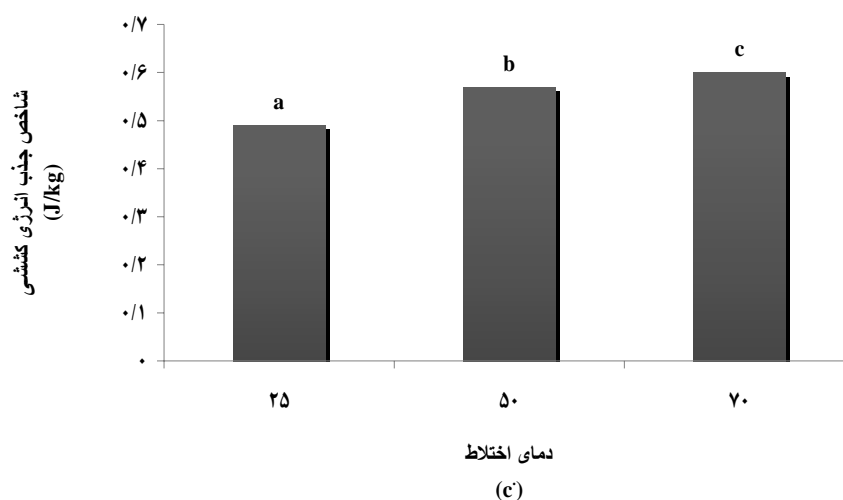
a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.



شکل ۲- تأثیر دمای اختلاط بر تغییر و نوسان مقاومت کششی کاغذهای دست‌ساز و گروه‌بندی میانگین‌ها به روش دانکن



شکل ۳- تأثیر دمای اختلاط بر تغییر و نوسان درازای نسبی کاغذهای دست‌ساز و گروه‌بندی میانگین‌ها به روش دانکن



شکل ۴- تاثیر دمای اختلاط بر تغییر جذب انرژی کششی کاغذهای دست‌ساز و گروه‌بندی میانگین‌ها به‌روش دانکن

سطح ویژه نانوفیبر بسیار بالاتر از آن فیبرهاست [۱۱ و ۱۲]، لذا توزیع<sup>۱</sup> و پراکنش<sup>۲</sup> یکنواخت‌تر آن‌ها در اثر افزایش دما، به معنی ایفای نقش شمار بیشتری از نانوفیبرهای منفرد در توزیع تنش و ویژگی‌های مقاومتی کاغذ می‌باشد.

### مقاومت به پارگی

محاسبه‌های انجام شده ثابت کرده که دمای اختلاط سبب اختلاف معناداری در شاخص مقاومت به پارگی شده است (جدول ۴). شکل ۵ نشان می‌دهد که با افزایش دمای اختلاط از ۲۵ °C به ۷۰ °C شاخص مقاومت به پارگی دو برابر افزایش می‌یابد. مقاومت به پارگی الیاف متأثر از دو مشخصه اصلی مقاومت شبکه پیوند بین لیفی و همچنین مقاومت ذاتی خود الیاف است. در این تحقیق با افزایش دما، توزیع نانوفیبرهای سلولزی در کاغذ بهتر شده به طوری که در حالت بهینه تک‌تک آن‌ها در انتقال تنش نقش خواهند داشت.

در اثر افزایش دمای اختلاط، سطوح لیفچه‌ای شده فیبرها قابلیت بیشتری برای به دام انداختن و درگیر شدن با نانوفیبرهای سلولز خواهند داشت. به عبارت دیگر، افزایش دما با بهبود توزیع یکنواخت نانوفیبر در بین ساختار لیفی کاغذ سبب بهبود پیوندیابی بین فیبر-فیبر، نانوفیبر-نانوفیبر و نانوفیبر-فیبر گشته و از این راه شبکه پیوندی گسترده و یکنواخت‌تری به وجود می‌آید که موجب افزایش چشم‌گیر ویژگی‌های مکانیکی کاغذهای دست‌ساز شامل مقاومت کششی و پارگی شده است.

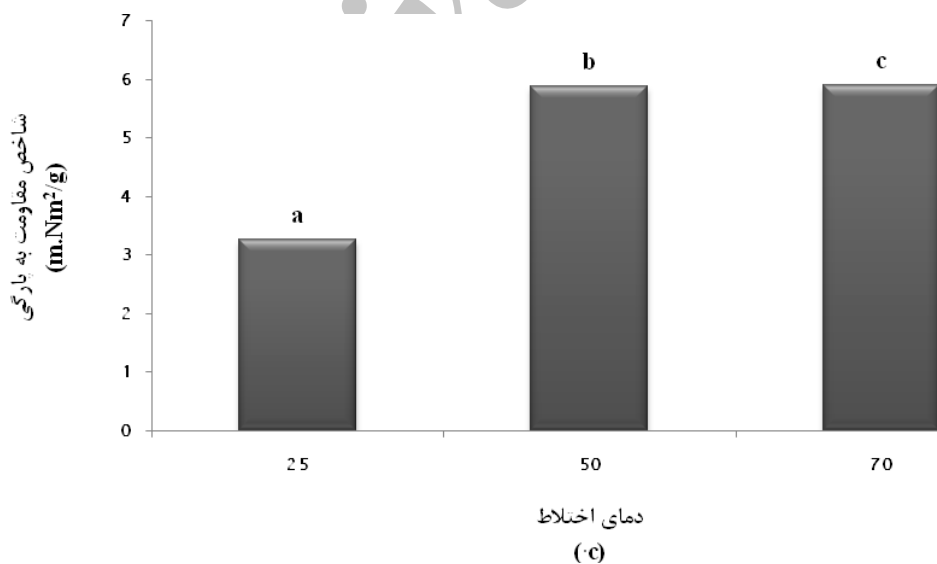
<sup>1</sup> Distribution

<sup>2</sup> Dispersion

جدول ۴- آزمون تجزیه واریانس تأثیر سطوح مختلف دمای اختلاط بر مقاومت به پارگی

منابع تغییر	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	F محاسبه شده	سطح معنی داری
S.O.V	S.S	d.f	M.S		
تیمار	۱۳/۸۳۴	۲	۶/۹۱۷	۶۹۱۷۲/۰۰۰	۰/۰۰۰
خطا	۰/۰۰۱	۶	۰/۰۰۰		
کل	۱۳/۸۳۵	۸			

Tear Strength				
Treatment	N	Subset for alpha = 0.05		
		1	2	3
1.00	3	3.2600		
3.00	3		5.8800	
2.00	3			5.9000
Sig.		1.000	1.000	1.000
Means for groups in homogeneous subsets are displayed.				
a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.				



شکل ۵- تأثیر دمای اختلاط بر تغییر مقاومت به پارگی کاغذهای دست‌ساز و گروه‌بندی میانگین‌ها به روش دانکن



## مقاومت به عبور هوا

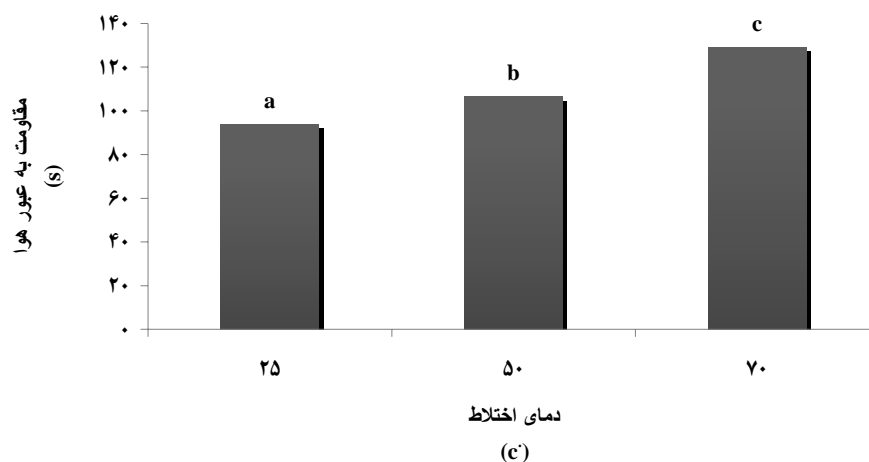
مشاهده های اندازه گیری مقاومت به عبور هوا برابر شکل ۶ نشان می دهد که با افزایش دمای اختلاط، نفوذپذیری به هوای نمونه ها کاسته شده و میانگین داده های تیمارها اختلاف معناداری داشتند (جدول ۵). در اثر پراکنش یکنواخت تر نانوفیبرهای سلولزی که متأثر از افزایش دمای اختلاط بوده و در نتیجه با افزایش شبکه پیوند بین لیفی از روزنه های موجود در ساختار کاغذ کاسته شده و همچنین درازای مسیر عبور مولکول های هوا از کاغذ به دلیل ایجاد مسیر زیگزاگی بیشتر می شود [۹]. لذا حجم

مشخصی از هوا به زمان بیشتری برای عبور از کاغذ نیاز دارد. نتایج این قسمت نیز به کلی با نتایج مقاومتی کاغذ تولیدی همخوانی دارد، چرا که با کاهش نفوذپذیری ساختار کاغذ که مؤید بهبود شبکه پیوند بین لیفی الیاف در ساختار کاغذ است، مقاومت های کاغذ نیز افزایش یافته است. بررسی های سیورود و استنیوس (۲۰۰۹) نیز ثابت کرده بود که با افزایش میزان NFC قابلیت نفوذپذیری به هوا کاهش می یابد که با روند داده های این مشخصه در این بررسی یکسان است.

جدول ۵- آزمون تجزیه واریانس تأثیر سطوح مختلف دمای اختلاط بر مقاومت به عبور هوا

منابع تغییر	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	F محاسبه شده	سطح معنی داری
S.O.V	S.S	d.f	M.S		
تیمار	۱۹۰۷/۲۵۲	۲	۹۵۳/۶۲۶	۱۳۵/۲۳۰	۰/۰۰۰
خطا	۴۲/۳۱۱	۶	۷/۰۵۲		
کل	۱۹۴۹/۵۶۳	۸			

Air Resistance				
Duncan <sup>a</sup>				
Treatment	N	Subset for alpha = 0.05		
		1	2	3
1.00	3	94.1100		
2.00	3		106.6600	
3.00	3			129.2900
Sig.		1.000	1.000	1.000
Means for groups in homogeneous subsets are displayed.				
a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.				



شکل ۶- اثر دمای اختلاط بر تغییر مقاومت به عبور هوای کاغذهای دست‌ساز و گروه‌بندی میانگین‌ها به‌روش دانکن

دست آمده از اندازه‌گیری زمان آگیری خمیر را نشان می‌دهند. بر پایه محاسبه‌های انجام شده با افزایش دمای اختلاط سوسپانسیون خمیر از این مقادیر کاسته شده و میانگین داده‌ها اختلاف معناداری داشته‌اند (جدول ۶). مشاهدات نشان می‌دهند که افزایش دما با تأثیر بر شتاب برهمکنش مولکول‌ها و الیاف و به احتمال با کاهش غلظت (ویسکوزیته) سوسپانسیون موجب کاهش چشم-گیر زمان آگیری می‌شود.

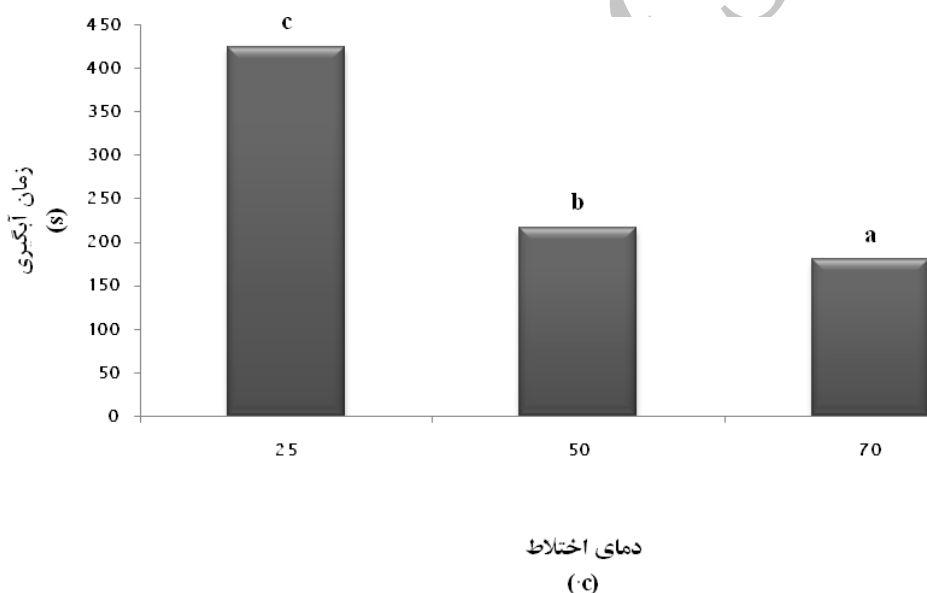
#### زمان آگیری

یکی از نارسایی‌های فرآیندی در استفاده از نانوفیبر سلولز به عنوان تقویت‌کننده در ساختار کاغذ، آگیری و زمان آگیری است. نانوفیبر سلولز و توده‌های آن با استقرار در بافت غشاء و توری در هنگام آگیری باعث افزایش زمان آگیری و کاهش شتاب تولید می‌شوند [۳]. پس با هر روشی که بتوان سرعت آگیری را افزایش داد کمک بزرگی به بازده تولید می‌شود. شکل ۷ نتایج به

جدول ۶- آزمون تجزیه واریانس تأثیر سطوح مختلف دمای اختلاط بر زمان آگیری

منابع تغییر	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	F محاسبه شده	سطح معنی داری
S.O.V	S.S	d.f	M.S		
تیمار	۱۰۴۶۵۸/۰۰۰	۲	۵۲۳۲۹/۰۰۰	۹۰۲/۲۲۴	۰/۰۰۰
خطا	۳۴۸/۰۰۰	۶	۵۸/۰۰۰		
کل	۱۰۵۰۰۶/۰۰۰	۸			

Drainage Time				
Duncan <sup>a</sup>				
Treatment	N	Subset for alpha = 0.05		
		1	2	3
3.00	3	180.0000		
2.00	3		217.0000	
1.00	3			425.0000
Sig.		1.000	1.000	1.000
Means for groups in homogeneous subsets are displayed.				
a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.				



شکل ۷- اثر دمای اختلاف بر تغییر زمان آگیری کاغذهای دست‌ساز و گروه‌بندی میانگین‌ها به روش دانکن

طوری که با افزایش دمای اختلاف و افزایش برهمکنش و برخورد الیاف و ذرات نانوفیبر با هم دسته‌های نانوفیبرها از هم باز شده و با توزیع یکنواخت بین شبکه لیفی سبب درگیری بیشتر فیبر-نانوفیبر شده و موقعیت بهتری برای گروه‌های عاملی آن‌ها برای ایجاد پیوند ایجاد می‌کند. در نهایت کاغذی با توزیع و پراکنش یکنواخت‌تر نانوفیبرها تشکیل می‌شود. با مقایسه نتایج این تحقیق و تحقیقات

### نتیجه‌گیری

افزایش دمای اختلاف سوسپانسیون خمیر و نانوفیبر سلولز تأثیر به کل روشن و مثبتی بر ویژگی‌های فیزیکی و مقاومتی کاغذ داشته و از سوی دیگر باعث بهبود چشم‌گیر زمان آگیری خمیر شده است. نتایج به دست آمده از ویژگی‌های فیزیکی، مقاومتی و بهبود زمان آگیری نیز به کلی با یک‌دیگر همخوانی داشته‌اند. به

است. تأثیر عامل دوم بیشتر از عامل اول بوده و به این دلیل زمان آبگیری کاهش نشان داد.

### قدردانی

از جناب آقای پرفسور تاکاشی نیشینو استاد گروه مهندسی شیمی دانشگاه کوبه ژاپن بابت همکاری صمیمانه در تهیه نانوفیبر سلولزی و همچنین از ستاد ویژه توسعه فناوری نانو نهاد ریاست جمهوری به دلیل حمایت مالی طرح سپاسگزاری می‌نماییم.

محققان دیگر تأثیر این مشخصه فرایندی در دستیابی به نتایج یاد شده به کلی مشهود است. در اصل هر چه توزیع نانوفیبرها یکنواخت‌تر باشد، زمان آبگیری باید بیشتر باشد چرا که سطح ویژه نانوفیبرها در توزیع یکنواخت‌تر به بیشینه خود رسیده و توانایی جذب و تماس نانوفیبر-آب افزایش می‌یابد. اما این همه ماجرا نیست. از سوی دیگر افزایش دما تا  $70^{\circ}\text{C}$  جنبش زیادی در مولکول‌های آب ایجاد کرده به طوری که خروج آن از شبکه فیبرها و نانوفیبرها تحت فشار خلأ با آسانی بیشتری فراهم کرده

### منابع

- 1- Favier, V., Chanzy, H. and Cavallé, J.Y., **1995**. Polymer Nanocomposites Reinforced By Cellulose Whiskers. *Macromolecule* (28), 6365-6367.
- 2- Henriksson, M., Berglund, L.A., Laksson, P., Lindstrom, T. and Nishino, T., **2008**. Cellulose nanopaper structures of high toughness, *Biomacromolecules* 9(6):1579-1585.
- 3- Hubbe, M.A., Rojas, O.J., Lucia, L.A. and Sain, M., **2008**. Cellulosic nanocomposites: A Review, *BioResources* 3(3), 929-980.
- 4- Madani, A. Kiiskinen, H. Olson, J. A and Martinez, D. M. **2011**. Fractionation of microfibrillated cellulose and its effects on tensile index and elongation of paper. *PaperCon*. P:745-772.
- 5- Siro, I. and Plackett, D., **2010**. Microfibrillated cellulose and new nanocomposite materials: A review, *Cellulose* 17:459-494.
- 6- Lagaron, J.M., Catalá, R. and Gavaña, R., **2004**. Structural characteristics defining high barrier properties in polymeric materials, *Material Science Technology* (20):1-7.
- 7- Syverud, K. and Stenius, P., **2009**. Strength and barrier properties of MFC films, *Cellulose* (16):75-85.
- 8- Taipale, T. Osterberg, M. Nykanen, 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.
- 9- Yousefi, H., Ebrahimi, G., Mashkour, M. and Nishino, T., **2010**. Cellulose nanofiber (CNF) for nanocomposites production: Opportunities and challenges. In: *The Sixth International Workshop on Green Composites*. Sep. 8-10, Gumi, Korea.
- 10- Yousefi, H., Nishino, T., Faezipour, M., Ebrahimi, G., Shakeri, A. and Morimone, S., **2010**. All-cellulose nanocomposite made from nanofibrillated cellulose fibers, *Adv. Compos. Let.* 19, 6 (2010).
- 11- Yousefi, H., Faezipour, M., Nishino, T., Shakeri, A. and Ebrahimi, G., **2011**. All-cellulose composite and nanocomposite made from partially dissolved micro and nano fibers of canola straw. *Polym. J.* 43, 6 (2011).
- 12- Yousefi, H. and Mashkour, M., **2008**. Cellulose nano crystal: a renewable and cheap material for nano composites. *J. Nanotechnology*. (131): 345-350, (In Persian).

## Effect of Mixing Temperature of CMP (Chemi-mechanical) Pulp and Cellulose Nanofiber on Paper Properties

A. Alinia<sup>\*1</sup>, A. Afra<sup>1</sup>, H. Resalati<sup>1</sup> and H. Yousefi<sup>2</sup>

### Abstract

Several processing parameters affect the function of cellulose nanofiber as an environmentally friendly cellulosic reinforcer. One of the potential parameters can be the mixing temperature of pulp and cellulose nanofiber that has been investigated in this study. In order to study the influence of this parameter, mixing drainage velocity and the air permeability and strength properties of resulting paper were measured. A mixture of chemi-mechanical pulp suspensions (with concentration of 0.2 wt% and freeness of 250 ml, CSF) containing 5 wt% cellulose nanofiber were prepared. This mixture was then stirred at 25, 50, and 70 °C using a magnetic stirrer for 1 hour followed by draining using vacuum filtration to make wet handsheet. The wet handsheet was first pressed, and then dried in oven at 100 °C for 24 hours. The test results showed that the increase of mixing temperature led to decreasing drainage time and air permeability. The strength properties of paper reinforced by nanofibers were positively affected by mixing temperature (i.e. the more mixing temperature, the higher strength). The data of tensile strength index was considerably increased. The tear strength of paper increased approximately by 200% over rising mixing temperature.

**Keywords:** Cellulose nanofiber, Mixing temperature, Chemi-mechanical pulp and Physical and strength properties of paper

---

\* Corresponding author: Email: aliniasahba@yahoo.com