



# Comparison of the Effect of Nanocellulose and Nanosilica on the Properties of Packaging Cardboard Made from Waste White Pulp

Jafar Ebrahimpour-Kasmani\* , Ahmad Samariha , Abdoloh Alizadeh

\*Associate Professor, Department of Wood and Paper Science & Technology, Savadkooh Branch, Islamic Azad University, Savadkooh, Iran

(Received: 26/04/2024, Revised: 15/05/2024, Accepted: 21/08/2024, Published: 15/09/2024)

DOR: 20.1001.1.22286675.1403.15.58.4.5

## ABSTRACT

The aim of this study was to compare the effect of nanocellulose and nanosilica on the properties of packaging cardboard made from waste white pulp. In this study, waste pulp was transferred to the laboratory. Handsheet cardboard was made of  $60 \text{ g.m}^{-2}$  with 4 and 8% nano-silica condition, and nanocellulose and cationic starch at 1.5% level. Finally, the physical, mechanical and morphological properties of the prepared cardboard were tested according to the TAPPI standards and compared with each other. The results showed that 4% cellulose nanofibers and 1.5% cationic starch had 2.5, 14.1, 46.9, 35.9, 9.5, 8.9, 20.5 and 5.1%, respectively, water absorption, surface smoothness, tensile strength index, burst resistance index, tensile strength index, brightness, whiteness and opacity more than 4% cellulosic nanofibers and have 30.9%, 19.3% of air resistance, and fewer yellowness than 4% cellulose nanofibers. 8% cellulose nanofibers and 1.5% cationic starch have 16.1%, 43.7%, 7.6%, 21.3%, 10.7%, 6.1%, 1.1%, 6.6% of water absorption, air resistance, tensile strength index, burst strength index, tear strength index, brightness, whiteness and opacity are higher than 8% cellulose nanofibers and have 36.2 and 23.1% surface fines, respectively, and fewer yellowness than 4% of cellulosic nanofibers. 4% nano-silica and 1.5% cationic starch have 8.1%, 18.3%, 34.1% and 6.9% surface smoothness, whiteness and opacity, more than 4% nano-silica, respectively, with 10.1% 13.1, 10.8, 1.5, 9.9 and 75.2% water absorption, tensile strength index, burst strength index, tear strength index, brightness and fewer yellowness than 4% nano-silica. 8% nanosilica and 1.5% cationic starch have 1, 14.7, 40.2 and 6.7% water absorption, air resistance, whiteness and opacity are more than 8% nano-silica, respectively, and have 5.2, 36.3, 69.3, 74.5, 5.1, and 14.8 percent surface smoothness, tensile strength index, burst strength index, tear strength index, brightness and fewer yellowness than 8% nano-silica. The results showed that the use of cellulose nanofibers is more preferable, and it can be important because it leads to a decrease in imports.

**Keywords:** White Cardboard, Cellulose Nanofibers, Nano-Silica, Cationic Starch

This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license.

**Publisher:** Imam Hussein University

 Authors



\* Corresponding Author Email: jafar\_kasmani@yahoo.com

علمی - پژوهشی

## مقایسه تاثیر نانوسلولز و نانوسیلیکا روی ویژگی‌های مقوای بسته‌بندی ساخته شده از خمیر سفید ضایعاتی

جعفر ابراهیم پور کاسمانی<sup>۱\*</sup>، احمد ثمریها<sup>۲</sup>، عبدالله علیزاده<sup>۳</sup>

۱- دانشیار، گروه مهندسی چوب و کاغذ، واحد سوادکوه، دانشگاه آزاد اسلامی، سوادکوه، ایران ۲- استادیار، گروه صنایع چوب، دانشگاه ملی

مهارت، تهران، ایران ۳- استادیار، گروه کشاورزی، واحد سوادکوه، دانشگاه آزاد اسلامی، سوادکوه، ایران

DOR: 20.1001.1.22286675.1403.15.58.4.5

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۵/۳۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۰۷

تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۰۶/۲۵

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۲/۲۶

### چکیده

این بررسی با هدف مقایسه تاثیر نانوسلولز و نانوسیلیکا روی ویژگی‌های مقوای ساخته شده از خمیرسفید ضایعاتی انجام شد. برای این منظور خمیر کاغذ سفید، از کارخانه کاغذسازی اترک تهیه و با افزودن ۴ و ۸ درصد نانوالیاف سلولز و نانو سیلیکا بصورت خالص، و این ترکیبات با ۱/۵ درصد نشاسته کاتیونی کاغذ دست ساز تهیه و مورد آزمون‌های فیزیکی، مکانیکی و بررسی ریخت‌شناسی قرار گرفتند. نتایج نشان داد ۴ درصد نانوالیاف سلولزی و ۱/۵ درصد نشاسته کاتیونی به ترتیب دارای ۲/۵، ۱۴/۱، ۴۶/۹، ۳۵/۹، ۹/۵، ۸/۹، ۲۰/۵ و ۵/۱ درصد جذب آب، صافی سطح، شاخص مقاومت به کشش، شاخص مقاومت به ترکیدن، شاخص مقاومت به پاره شدن، روشنی، سفیدی و ماتی بیشتر نسبت به ۴ درصد نانوالیاف سلولزی است و به ترتیب دارای ۳۰/۹، ۱۹/۳ درصد مقاومت به عبور هوا، و زردی کمتر نسبت به آن است. ۸ درصد نانوالیاف سلولزی و ۱/۵ درصد نشاسته کاتیونی به ترتیب دارای ۱۶/۱، ۴۳/۷، ۷/۶، ۲۱/۳، ۱۰/۷، ۶/۱، ۱/۱، ۶/۶ درصد جذب آب، مقاومت به عبور هوا، شاخص مقاومت به کشش، شاخص مقاومت به ترکیدن، شاخص مقاومت به پاره شدن، روشنی، سفیدی و ماتی بیشتر نسبت به ۸ درصد نانوالیاف سلولزی است و به ترتیب دارای ۳۶/۲ و ۲۳/۱ درصد صافی سطح، و زردی کمتر نسبت به ۴ درصد نانوالیاف سلولزی است. ۴ درصد نانوسیلیکا و ۱/۵ درصد نشاسته کاتیونی به ترتیب دارای ۸/۱، ۱۸/۳، ۳۴/۱ و ۶/۹ درصد صافی سطح، سفیدی و ماتی بیشتر نسبت به ۴ درصد نانوسیلیکا است و به ترتیب دارای ۱۰/۱، ۱۳/۱، ۱۰/۸، ۱/۵، ۹/۹، ۷۵/۲ درصد جذب آب، شاخص مقاومت به کشش، شاخص مقاومت به ترکیدن، شاخص مقاومت به پاره شدن، روشنی و زردی کمتر نسبت به ۴ درصد نانوسیلیکا است. ۸ درصد نانوسیلیکا و ۱/۵ درصد نشاسته کاتیونی به ترتیب دارای ۱، ۱۴/۷، ۴۰/۲ و ۶/۷ درصد جذب آب، مقاومت به عبور هوا، سفیدی و ماتی بیشتر نسبت به ۸ درصد نانوسیلیکا است و به ترتیب دارای ۵/۲، ۳۶/۳، ۶۹/۳، ۷۴/۵، ۵/۱ و ۱۴/۸ درصد صافی سطح، شاخص مقاومت به کشش، شاخص مقاومت به ترکیدن، شاخص مقاومت به پاره شدن، روشنی و زردی کمتر نسبت به ۸ درصد نانوسیلیکا است. نتایج نشان داد استفاده از نانو الیاف سلولزی ارجحیت بالاتری دارد، و به جهت اینکه منجر به کاهش واردات می‌گردد می‌تواند حائز اهمیت باشد.

### کلیدواژه‌ها: مقوای سفید، نانوالیاف سلولز، نانوسیلیکا، نشاسته کاتیونی

#### ۱- مقدمه

کمتر آن‌ها نسبت به خمیر کاغذ دست اول نسبت داده شده است [۱]، خمیر کاغذهای بازیافتی از قابلیت زهکشی و سرعت آب‌گیری ضعیف و همچنین مقاومت کم در مقایسه با خمیر کاغذ دست اول برخوردار می‌باشند. بنابراین استفاده از آن‌ها در کاغذسازی موجب افت ویژگی‌های کیفی کاغذ نهایی می‌شود. ویژگی‌های ضعیف الیاف بازیافتی عمدتاً به دلیل تغییرات ساختاری الیاف در طی خشک کردن است. با توجه به تغییرات ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی الیاف در کاغذسازی و بازیافت به دلیل شرایط عملیات خمیرسازی و خشک کردن در کاغذسازی، ویژگی‌های مرفولوژیک الیاف مثل قابلیت واکنش‌پذیری، ضعیف شده و این در نهایت منجر به کاهش مقاومت کلی الیاف بازیافتی می‌شود [۱]. همچنین

امروزه در بسیاری از کشورهای جهان به دلیل محدودیت منابع خام سلولزی و مصرف روزافزون کاغذ، بازیافت کاغذ شدیداً مورد توجه قرار گرفته است. استفاده از الیاف بازیافتی به لحاظ اقتصادی و زیست‌محیطی به‌عنوان یک منبع سلولزی برای تولید کاغذ و مقوا بسیار مطلوب است اما محدودیت عمده این منابع به مقاومت

\* رایانامه نویسنده مسئول: jafar\_kasmani@yahoo.com

به دست آمد [۱۰]. مهمترین ویژگی‌های این ماده که باعث مورد توجه قرار گرفتن آن شده است، شامل وزن سبک، ساختار شبکه-ای، تجدیدپذیری، زیست تخریب پذیری، سختی و مقاومت زیاد، شفافیت، ظرفیت جذب آب بالا، اصلاح کننده خواص رئولوژیکی، سطح ویژه و نسبت منظر زیاد، واکنش پذیری زیاد و ویژگی‌های ممانعتی می‌باشد [۱۱]. برای تولید سلولز نانوفیبریل از منابع سلولزی مختلف استفاده می‌شود. مهم‌ترین منبع صنعتی الیاف سلولزی و منبع اصلی استفاده شده برای تولید NFC، چوب می‌باشد.

در سال‌های اخیر مطالعات زیادی بر استفاده از نانوالیاف سلولزی<sup>۴</sup> (CNF) به عنوان مقاومت دهنده جهت بهبود خواص فیزیکی و مکانیکی انجام شده است. CNF قابلیت ایجاد شبکه‌ای از پیوندهای عرضی را در سوسپانسیون‌های بسیار رقیق آبی داراست [۸]. گزارش شده است که حضور CNF در دوغاب الیاف باعث افزایش مقاومت کششی و همچنین باعث کاهش تداخل در کاغذ نهایی می‌گردد [۱۱]. در همین ارتباط، Fukuzumi و همکاران (۲۰۰۸)، نشان داده‌اند که CNF می‌تواند بصورت شبکه فیبری کامل با تداخل بسیار ریز شکل بگیرد که در آن قابلیت عبور هوا در آن به شدت کاهش می‌یابد [۱۲]. همچنین در تحقیقی دیگر، نانوالیاف سلولزی به سوسپانسیون خمیر کاغذ پالایش نشده و خمیر کاغذ با پالایش جزئی اضافه کردند و نتیجه گرفتند که افزودن نانوالیاف سلولزی به خمیر کاغذ با پالایش جزئی اثر بیشتری نسبت به افزودن نانوالیاف به خمیر کاغذ پالایش نشده داشت به نحوی که خواص مشابه به خواص کاغذ چاپ و تحریر مشاهده گردید. به عبارت دیگر، این نتایج نشان داد که اضافه کردن CNF تا حدودی توانست جایگزین پالایش الیاف گردد [۱۱].

استفاده از الیاف ضایعاتی اثرات مخرب برداشت بیش از اندازه چوب را از جنگل‌ها کاهش می‌دهد، ولی ویژگی‌های فیزیکی و مقاومتی مناسب، با ساخت کاغذ از آن حاصل نمی‌شود. دفعات زیاد بازیافت معمولاً بر روی ویژگی‌های الیاف ضایعاتی کاغذ سفید تاثیر منفی گذاشته و در نهایت مقاومت کاغذ افت پیدا می‌کند. برای جبران این کاستی‌ها برای تولید این مقوا در کنار الیاف ضایعاتی از الیاف بلند و یا الیاف دست اول پهن برگان وارداتی نیز استفاده می‌گردد. اما تهیه این الیاف علاوه بر اینکه از لحاظ اقتصادی برای کارخانه مشکلاتی ایجاد می‌کند، تهیه آن برخی مواقع به دلایل سیاسی به سختی امکان پذیر است. بنابراین هدف اصلی این پژوهش بررسی امکان‌سنجی استفاده از نانوسیلیکا و نانوالیاف سلولزی است.

آلودگی‌ها و تخریب ناشی از سن کاغذ نیز می‌تواند در مقاومت کم الیاف بازیافتی مؤثر باشد [۲]. قابلیت گذر<sup>۱</sup> کاغذ در ماشین کاغذ نیز می‌تواند با توجه به قابلیت زهکش ضعیف<sup>۲</sup> خمیر کاغذ بازیافتی به طور منفی تحت تأثیر قرار گیرد. لذا تقویت ویژگی‌های کیفی خمیر کاغذهای بازیافتی باید بیشتر مورد توجه قرار گیرد [۳].

افزودن نشاسته کاتیونی به خمیر کاغذ بازیافتی موجب بهبود اتصال بین الیاف شده در نتیجه به احیای نقاط از دست‌رفته سطح الیاف و بهبود ویژگی‌های مقاومت کاغذ حتی تا حد خمیر کاغذ دست اول کمک می‌کند. نتایج آزمایش‌های به عمل آمده نشان داده است که نشاسته کاتیونی به دلیل دارا بودن پلیمرهای کاتیونی، مؤثرتر و قوی‌تر از سایر افزودنی‌ها بوده و علاوه بر نقش تکمیلی در نگهداری مواد دوغاب، موجب بهبود آبیگری خمیر کاغذ می‌شود [۴].

از ذرات نانو سیلیس به عنوان رویه، به منظور افزایش پیوند الیاف به زمینه استفاده می‌شود [۵]. رویه طوری انتخاب می‌شود که با تقویت‌کننده و زمینه، سازگاری داشته باشد. غالباً مولکول‌های دارای دو گروه عاملی متفاوت در دو انتها، این منظور را برآورده می‌سازند. رویه مناسب برای الیاف شیشه و اپوکسی ممکن است در یک انتها، ترکیبی از گروه‌های آلی سیلیسیم سازگار با شیشه و در انتها انتهایی دیگر ترکیبی از یک آمین سازگار با اپوکسی داشته باشد و در نتیجه، بهبود لازم در خواص مکانیکی چندسازه‌ها را فراهم آورند [۶].

تحقیقات فراوانی تاکنون در زمینه کاربرد نانو الیاف سلولزی برای تولید فرآورده‌های کاغذی گزارش شده است. نانو الیاف سلولزی در کاغذسازی در هر دو بخش تر و خشک می‌تواند به کار گرفته شود. به دلیل سطح ویژه وسیع و نسبت طول به قطر زیاد نانو الیاف سلولزی به عنوان تقویت کننده در بخش مرطوب باعث افزایش مقاومت تر [۷] و کاهش قابلیت آبیگری و جذب آب از خمیر کاغذ می‌شود و این تغییرات با افزایش اسیدیته سوسپانسیون تشدید می‌شود [۸]. سلولز به عنوان فراوان‌ترین پلیمر زیستی روی کره زمین و به دلیل دارا بودن خواص جالبی نظیر اثر تقویت کنندگی، ارزانی، فراوانی، ایمنی، در دسترس بودن، زیست سازگاری و زیست تخریب پذیری مورد توجه محققان واقع شده است [۹].

سلولز نانوفیبریل شده<sup>۳</sup> (NFC) به الیاف سلولزی فیبریل شده تا حد دسترسی به دستجات میکروفیبریل سلولزی گفته می‌شود که قطرشان در حد نانومتری (کمتر از ۱۰۰ نانومتر) و طولشان چند میکرومتر است. سلولز نانوفیبریل شده، نخستین بار در سال ۱۹۸۳ توسط Turbak و همکارانش با روش همگن‌سازی

<sup>1</sup> Paper machine runnability

<sup>2</sup> Bad drainability

<sup>3</sup> Nanofibrillated Cellulose

<sup>4</sup> Cellulose nanofibers

## ۲- روش تحقیق

### ۲-۱- مواد

به منظور تامین خمیر کاغذ سفید، از کارخانه کاغذسازی اترک مقدار ۱۰ کیلوگرم خمیر کاغذ تهیه گردید. خمیرهای حاصله تا غلظت ۱۵-۱۰٪ آب‌گیری شد و سپس درون کیسه‌های پلاستیکی در بسته قرار گرفته و تا موقع مصرف در داخل یخچال نگهداری شد.

نانو الیاف سلولزی از شرکت نانو نوین پلیمر تهیه شد. نانوسولوز این شرکت با استفاده از نیروهای مکانیکی (مکانیسم بالا به پایین) از طیف وسیعی از مواد اولیه تولید گردید. متوسط قطری نانو مواد کمتر از ۵۰ نانومتر است.

در این تحقیق، پودر نانو سیلیس (NanoSiO<sub>2</sub>) تولید شده توسط شرکت Degussa کشور آلمان مورد استفاده قرار گرفت.

نشاسته کاتیونی مورد استفاده در این پژوهش دارای pH حدود ۶، درجه استخلاف (D.S) حدود 0/035 mol/mol، 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 g/c درصد (یعنی ۰/۵ گرم نشاسته خالص در ۱۰۰ سی سی 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 سانتی گراد 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.

### ۲-۲- تهیه کاغذهای دست‌ساز

بعد از آماده‌سازی اولیه خمیر کاغذ الیاف بلند و اضافه نمودن نانو سیلیکا، و نشاسته، مطابق جدول ۱، در ۸ تیمار جداگانه و به شرح زیر مورد بررسی قرار گرفت:

(۱) تیمار ۴ درصد نانو الیاف سلولزی، و ۸ درصد نانو الیاف سلولزی که با کد اختصاری 4NC و 8NC نمایش داده شد.

(۲) تیمار ۴ درصد نانو سیلیکا، و ۸ درصد نانو سیلیکا که با کد اختصاری 4NS و 8NS نمایش داده شد.

(۳) تیمار ۴ درصد نانو الیاف سلولزی، و ۱/۵ درصد نشاسته و ۸ درصد نانو الیاف سلولزی و ۱/۵ درصد نشاسته که با کد اختصاری 4NC+1.5CS و 8NC+1.5CS نمایش داده شد.

(۴) تیمار ۴ درصد نانوسیلیکا و ۱/۵ درصد نشاسته و ۸ درصد نانوسیلیکا و ۱/۵ درصد نشاسته که با کد اختصاری 4NS+1.5CS و 8NS+1.5CS نمایش داده شد.

لذا ۸ تیمار با فرمول‌بندی متفاوت هر کدام با ۱۰ تکرار نمونه ساخته خواهند شد.

جدول (۱): ترکیب تیمارهای مورد بررسی و نیز مقادیر مصرف

نانوسولوز، نانوسیلیکا و نشاسته کاتیونی

شماره تیمار	کد تیمار	خمیر سفید ضایعاتی	نانو الیاف سلولزی	نانو سیلیکا	نشاسته کاتیونی
۱	4NC	۹۶	۴	-	۰
۲	8NC	۹۲	۸	-	۰
۳	4NS	۹۶	-	۴	۰
۴	8NS	۹۲	-	۸	۰
۵	4NC+1.5CS	۹۴/۵	۴	-	۱/۵
۶	8NC+1.5CS	۹۰/۵	۸	-	۱/۵
۷	4NS+1.5CS	۹۴/۵	-	۴	۱/۵
۸	8NS+1.5CS	۹۰/۵	-	۸	۱/۵

### ۲-۳- اندازه‌گیری خواص کاغذ

خواص فیزیکی (گراماژ، ضخامت، دانسیته، جذب آب، صافی سطح و مقاومت به عبور هوا)، خواص مکانیکی (شاخص مقاومت به کشش، شاخص مقاومت به ترکیدن، شاخص مقاومت به پاره‌شدن) و خواص نوری (روشنی، سفیدی، ماتی و زردی) کاغذها ساخته شده مطابق با استانداردهای TAPPI، مطابق جدول (۲) اندازه‌گیری شدند.

خواص فیزیکی، مکانیکی و نوری کاغذها که در جدول (۲) خلاصه شده مطابق با استانداردهای ملی و بین‌المللی، اندازه‌گیری شد.

جدول (۲): خواص فیزیکی و مکانیکی مورد آزمون

ردیف	خواص مورد آزمون	شماره استاندارد
۱	گراماژ	TAPPI T410-Om88
۲	ضخامت	TAPPI T411-Om89
۳	دانسیته	TAPPI T257 om-98
۴	جذب آب	TAPPI T441 om-96
۵	صافی سطح	TAPPI T 555 om-04
۶	مقاومت به عبور هوا	INSO 1425
۷	شاخص مقاومت به کشش	TAPPI T494om-96
۸	شاخص مقاومت به ترکیدن	TAPPI T403om-98
۹	شاخص مقاومت به پاره‌شدن	TAPPI T414om-98
۱۰	خواص نوری (روشنی، سفیدی، ماتی و زردی)	TAPPI T452-OM-98

### ۴-۲- مطالعات میکروسکوپی

تصاویر میکروسکوپی در پژوهشگاه متالورژی رازی از سطح نمونه‌های پوشش داده شده به وسیله دستگاه میکروسکوپ الکترونی گسیل میدانی مدل Mira 3-XTMU تهیه گردید. تصاویر با بزرگنمایی ۵۰ μm گرفته شده است.

### ۵-۲- محاسبات آماری

طرح آزمایشی مورد استفاده در این تحقیق، از نوع کاملاً تصادفی بوده و جهت پردازش نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌ها از نرم‌افزار SPSS (نسخه ۲۳) استفاده شد. به منظور تجزیه و تحلیل داده‌ها از تجزیه واریانس یک طرفه و جهت مقایسه میانگین‌ها از آزمون دانکن استفاده شد.

### ۳- نتایج

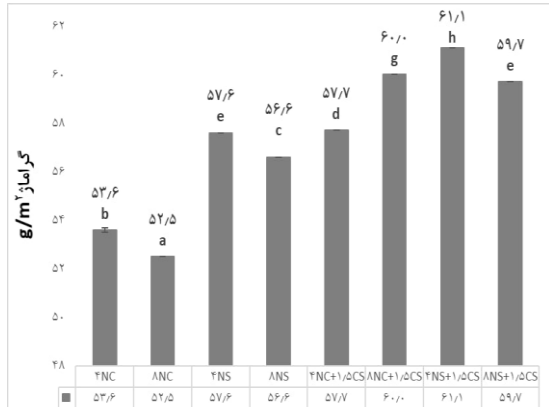
#### ۳-۱- تأثیر متغیرهای ساخت بر خواص فیزیکی و مکانیکی

نتایج آزمون تجزیه واریانس نشان داد که بین مقادیر گراماژ، ضخامت، دانسیته، جذب آب، مقاومت به عبور هوا، شاخص مقاومت کششی، شاخص مقاومت به ترک‌شدن، شاخص مقاومت به پارگی، روشنی، سفیدی، ماتی و زردی در سطح احتمال ۵٪ از نظر آماری اختلاف معنی‌دار وجود دارد. در حالیکه صافی سطح در سطح احتمال ۵٪ از نظر آماری اختلاف معنی‌دار وجود ندارد (جدول ۳).

جدول (۳): تجزیه واریانس (مقدار F و سطح معنی‌داری) اثر متغیرهای ساخت بر مقاومت‌ها

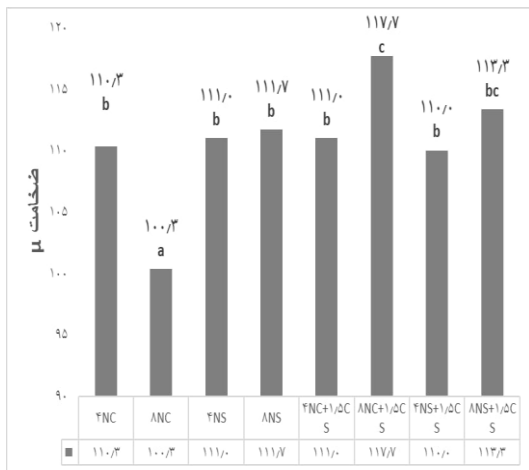
مقدار F و سطح معنی‌داری	متغیرهای ساخت
*۲۲۲۶۵/۱۴۳	گراماژ (g/m <sup>2</sup> )
*۸/۲۲۲	ضخامت (μ)
*۴۷۹۵/۴۲۹	دانسیته (گرم بر متر مربع)
*۹۴۴/۵۷۱	جذب آب (g/m <sup>2</sup> )
*۵/۹۲۵	صافی سطح (s)
*۱۲۵/۰۵۳	عبور هوا (میلی لیتر بر دقیقه)
*۱۷/۴۹۴	شاخص مقاومت به کشش (نیوتن متر بر گرم)
*۱۷/۸۳۸	شاخص مقاومت به ترک‌شدن (کیلو پاسکال مترمربع بر گرم)
*۱۹/۲۷۳	شاخص مقاومت به پاره شدن (میلی نیوتن مترمربع بر گرم)
*۱۴/۳۰۰	روشنی (درصد)
*۱۱۶۷/۶۱۸	سفیدی
*۱۴/۶۱۹	ماتی (درصد)
*۴۶۶۵۲۲/۹۱۹	زردی (درصد)
سطح معنی‌داری: *۹۵٪، NS: عدم معنی‌داری	

آزمون دانکن، سطوح مختلف مقادیر میانگین گراماژ خمیر کاغذ را در ۸ گروه مختلف قرار داد. همان‌طوری که در شکل (۱) مشاهده می‌شود بیش‌ترین گراماژ مربوط به ۴ درصد نانوسیلیکا و ۱/۵ درصد نشاسته کاتیونی برابر ۶۱/۱ گرم بر متر مربع و کمترین مقدار آن مربوط به ۸ درصد نانو سلولز برابر ۵۲/۵ گرم بر متر مربع می‌باشد.



شکل (۱): مقایسه میانگین گراماژ کاغذ

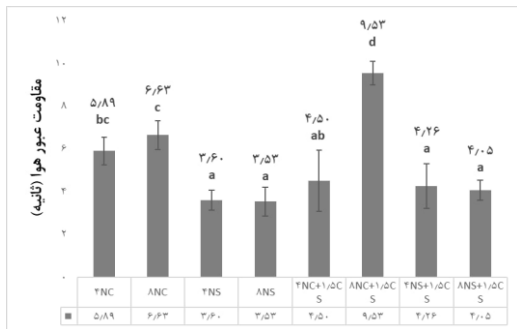
آزمون دانکن، سطوح مختلف مقادیر میانگین ضخامت خمیر کاغذ را در ۳ گروه مختلف قرار داد. همان‌طوری که در شکل (۲) مشاهده می‌شود بیش‌ترین ضخامت مربوط به ۸ درصد نانوسلولز و ۱/۵ درصد نشاسته کاتیونی برابر ۱۱۷/۷ میکرون و کمترین مقدار آن مربوط به ۸ درصد نانوسلولز برابر ۱۰۰/۳ میکرون می‌باشد.



شکل (۲): مقایسه میانگین ضخامت کاغذ

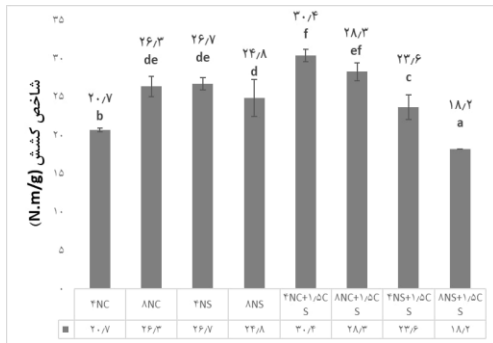
آزمون دانکن، سطوح مختلف مقادیر میانگین دانسیته خمیر کاغذ را در ۵ گروه مختلف قرار داد. همان‌طوری که در شکل ۳ مشاهده می‌شود بیش‌ترین دانسیته سطح مربوط به ۴ درصد نانوسیلیکا و ۱/۵ درصد نشاسته کاتیونی برابر ۱/۳۰ گرم بر متر مربع و کمترین مقدار آن مربوط به ۸ درصد نانو سلولز برابر ۱/۳۹ گرم بر متر مربع می‌باشد.

۸ درصد نانوسولوز و ۱/۵ نشاسته کاتیونی برابر ۹/۵۳ ثانیه می باشد.



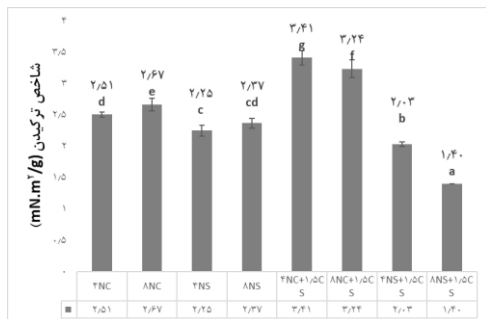
شکل (۶): مقایسه میانگین مقاومت عبور هوا کاغذ

شکل (۷) میانگین تغییرات شاخص مقاومت کششی را برای ۸ نوع خمیر کاغذ را نشان می دهد. گروه بندی دانکن میانگین های شاخص مقاومت کششی را در ۶ گروه مجزا قرار داد (شکل ۷). بیشترین شاخص مقاومت به کششی مربوط به ۴ درصد نانوسولوز و ۱/۵ درصد نشاسته کاتیونی به مقدار ۳۰/۴ Nm/g بود که در گروه f قرار گرفت.



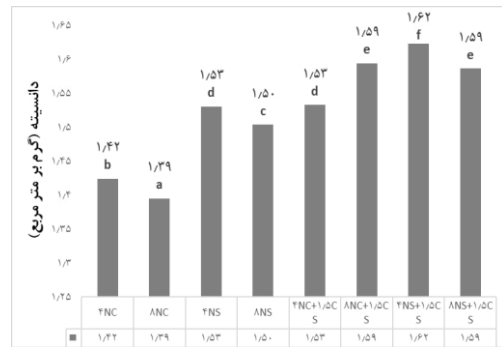
شکل (۷): مقایسه میانگین شاخص مقاومت کششی کاغذ

شکل (۸) میانگین تغییرات شاخص مقاومت به ترکیدن را برای ۸ نوع خمیر کاغذ را نشان می دهد. گروه بندی دانکن میانگین های داده های شاخص مقاومت به ترکیدن تیمارهای فوق را در ۷ گروه قرار داد.



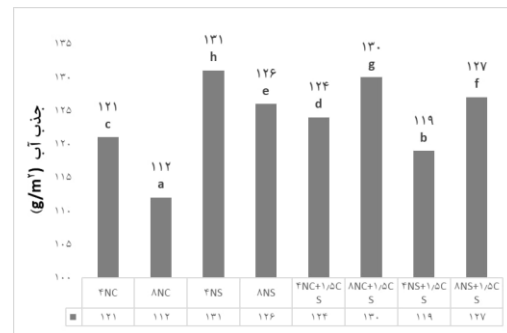
شکل (۸): مقایسه میانگین شاخص مقاومت به ترکیدن کاغذ

شکل (۹) میانگین تغییرات شاخص مقاومت به پارگی را برای ۸ نوع خمیر کاغذ را نشان می دهد. گروه بندی دانکن میانگین های شاخص مقاومت به پارگی تیمارهای مختلف، را به تفکیک در ۴



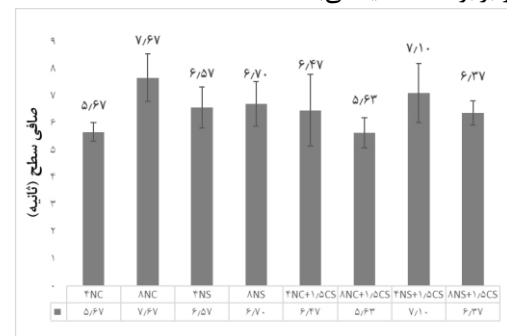
شکل (۳): مقایسه میانگین دانسیته کاغذ

آزمون دانکن، سطوح مختلف مقادیر میانگین جذب آب خمیر کاغذ را در ۸ گروه مختلف قرار داد. همان طوری که در شکل ۴ مشاهده می شود کمترین جذب آب مربوط به ۸ درصد نانوسولوز برابر ۱۱۲ گرم بر متر مربع و بیشترین مقدار آن مربوط به ۴ درصد نانوسیلیکا برابر ۱۳۱ گرم بر متر مربع می باشد.



شکل (۴): مقایسه میانگین جذب آب کاغذ

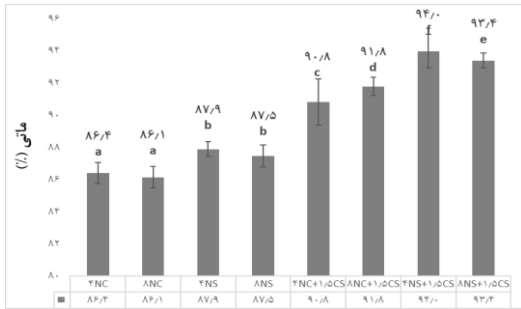
همان طوری که در شکل (۵) مشاهده می شود کمترین صافی سطح مربوط به ۸ درصد نانوسولوز و ۱/۵ درصد نشاسته کاتیونی برابر ۵/۶۳ ثانیه و بیشترین مقدار آن مربوط به ۸ درصد نانوسولوز برابر ۷/۶۷ ثانیه می باشد.



شکل (۵): مقایسه میانگین صافی سطح کاغذ

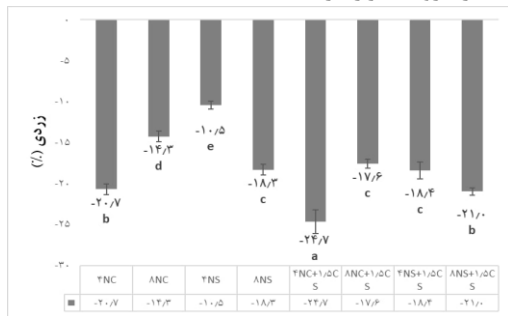
آزمون دانکن، سطوح مختلف مقادیر میانگین مقاومت به عبور هوا خمیر کاغذ را در ۴ گروه مختلف قرار داد. همان طوری که در شکل ۶ مشاهده می شود کمترین مقاومت به عبور هوا مربوط به ۸ درصد نانوسیلیکا برابر ۳/۵۳ ثانیه و بیشترین مقدار آن مربوط به

نانوسیلیکا و ۴ درصد نانو سیلیکا و ۱/۵ درصد نشاسته کاتیونی به مقدار ۹۴/۰ درصد بود که در گروه f قرار گرفت.



شکل (۱۲): مقایسه میانگین ماتی کاغذ

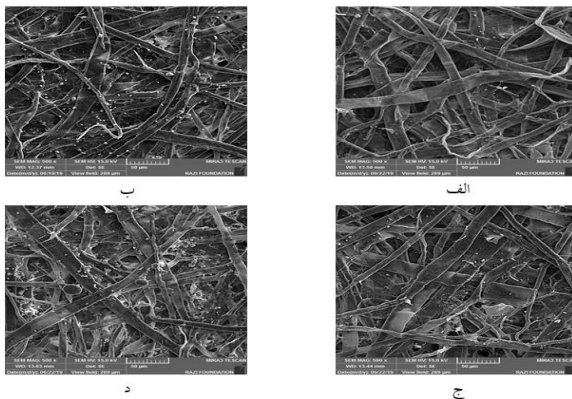
شکل (۱۳) میانگین تغییرات زردی را برای ۸ نوع خمیر کاغذ را نشان می‌دهد. گروه بندی دانکن میانگین‌های زردی را در ۵ گروه مجزا قرار داد (شکل ۱۳). بیشترین زردی مربوط به ۴ درصد نانوسولوز و ۱/۵ درصد نشاسته کاتیونی به مقدار ۲۴/۷- درصد بود که در گروه a قرار گرفت.



شکل (۱۳): مقایسه میانگین زردی کاغذ

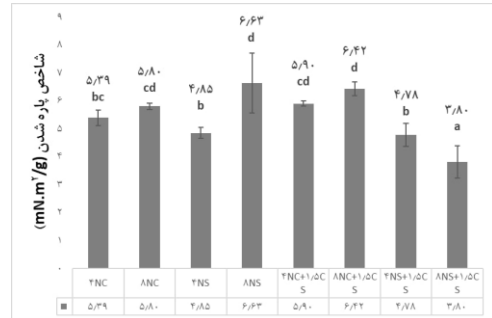
۲-۳- مطالعات میکروسکوپی ساختار کاغذ (FE-SEM)

شکل (۱۴) ریزنگار میکروسکوپ نشر میدانی FE-SEM را برای خمیر سفید ضایعاتی (الف)، ۸ درصد نانوسولوز (ب)، ۸ درصد نانوسیلیکا (ج)، ۸ درصد نانوسولوز و ۱/۵ درصد نشاسته کاتیونی (د) ۸ درصد نانوسیلیکا و ۱/۵ درصد نشاسته کاتیونی نشان می‌دهد.



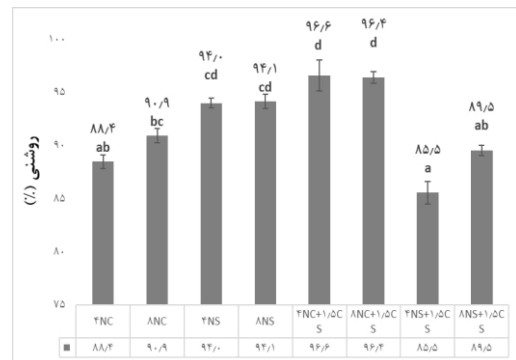
شکل (۱۴): سطح کاغذ حاصل از خمیر کاغذ، (الف)، ۸ درصد نانوسولوز (ب)، ۸ درصد نانوسیلیکا (ج)، ۸ درصد نانوسولوز و ۱/۵ درصد نشاسته کاتیونی (د) ۸ درصد نانوسیلیکا و ۱/۵ درصد نشاسته کاتیونی

گروه مجزا قرار داد (شکل ۹). بیشترین مقاومت به پارگی که در گروه d قرار دارد مربوط به ۸ درصد نانو سیلیکا است، همچنین ۸ درصد نانوسیلیکا و ۱/۵ درصد نشاسته کاتیونی کمترین مقاومت به پارگی را ایجاد کرده است.



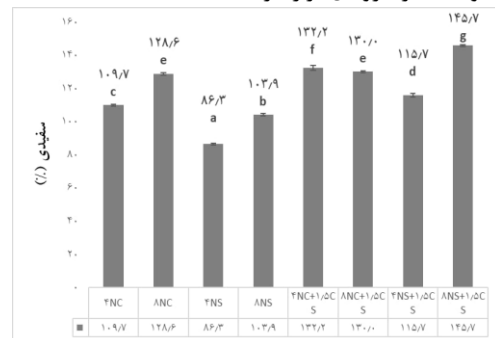
شکل (۹): مقایسه میانگین شاخص مقاومت به پاره شدن کاغذ

شکل (۱۰) میانگین تغییرات روشنی را برای ۸ نوع خمیر کاغذ را نشان می‌دهد. بیشترین روشنی مربوط ۴ درصد نانوسولوز و ۱/۵ درصد نشاسته کاتیونی به مقدار ۹۶/۶ درصد بود.



شکل (۱۰): مقایسه میانگین روشنی کاغذ

شکل (۱۱) میانگین تغییرات سفیدی را برای ۸ نوع خمیر کاغذ را نشان می‌دهد. گروه بندی دانکن میانگین‌های سفیدی را در ۷ گروه مجزا قرار داد (شکل ۱۱). بیشترین سفیدی مربوط به ۸ درصد نانوسیلیکا و ۱/۵ درصد نشاسته کاتیونی به مقدار ۱۴۵/۷ درصد بود که در گروه g قرار گرفت.



شکل (۱۱): مقایسه میانگین سفیدی کاغذ

شکل (۱۲) میانگین تغییرات ماتی را برای ۸ نوع خمیر کاغذ را نشان می‌دهد. گروه بندی دانکن میانگین‌های ماتی را در ۶ گروه مجزا قرار داد (شکل ۱۲). بیشترین ماتی مربوط به ۶ درصد

#### ۴- بحث و نتیجه گیری

دانسیتته یکی از مهمترین خواص کاغذ است که تقریباً روی تمام خواص مکانیکی، فیزیکی و الکتریکی کاغذ تاثیر می‌گذارد [۱۳]. متغیرهای فرایند تولید کاغذ بر تغییرات دانسیته ظاهری اثر می‌گذارند. در مورد کاغذهای بسته بندی دانسیته بالا نامناسب تلقی میشود، چرا که منجر به کاهش سفتی خمشی شده و در فرایندهای تبدیلی کنگره سازی نیز منجر به پارگی در هنگام خیس شدن می‌شود [۱۴]. لازم به ذکر است که افزایش دانسیته در ورقه در حال شکل گیری کاغذ، به انتقال مطلوب تر و بهینه در خشک کن نیز کمک می‌کند [۱۴]. به طور کلی، با افزایش آبدوستی، تورم و انعطاف پذیری الیاف که در اثر پلاایش یا جذب پلی الکترولیت‌های آبدوست روی میدهد، دانسیته آن در گراماژ ثابت افزایش می‌یابد [۱۵]. با تیمار خمیر کاغذ با نانوسیلیکا و نشاسته کاتیونی، دانسیته افزایش یافت که علت اصلی آن جذب نشاسته و توسعه پیوندهای بین فیبری و نیز جایگزینی پیوندها با انرژی قویتر همانند پیوندهای الکترواستاتیک با پیوندهای هیدروژنی است [۱۶]. در نتیجه کاغذ متراکم تر شده است، اما نانوسلولز نتوانسته مانند نانوسیلیکا پیوند بین فیبری الیاف را به دلیل داشتن بار سطحی منفی افزایش دهد.

کاربرد نانو الیاف نیز ارتقای دانسیته را به همراه داشته، لیکن افزایش مصرف آن از میزان دانسیته کاسته و کاغذی حجیم تر را ارائه نموده است. کاربرد همزمان نانو الیاف سلولزی و نشاسته کاتیونی، غالباً افزایش تراکم و دانسیته کاغذ را به همراه داشته که حکایت از افزایش ماندگاری اجرا در شبکه شکل یافته است.

یکی از ویژگیهای مهم کاغذ توانایی آن در کنترل نفوذ مایع می‌باشد [۱۷]. نتایج حاصل از اندازه‌گیری انجام شده در این تحقیق نشان می‌دهد که هنگام استفاده از ۸ درصد نانوالیاف سلولزی جذب آب کاغذ کاهش یافته است، به دلیل اینکه نانوالیاف سلولزی دارای جرم مولکولی بالاتر و گرانیوی بیشتر است، بنابراین سرعت نفوذ آب به درون کاغذ را کاهش می‌دهد، به طوری که کاهش جذب آب کاغذ می‌تواند ویژگی چاپ‌پذیری را بهبود می‌بخشد [۱۸].

تخلخل غیرمستقیم نشان دهنده ساختمان داخلی ساختار کاغذ بوده که تحت تاثیر کیفیت شکل گیری کاغذ و چگونگی توزیع الیاف، نرمه های الیاف و مواد پرکننده قرار می‌گیرد و به نوعی عملکرد مواد کمک نگه دارنده در ایجاد لخته ها و چگونگی پراکنش آنان را نشان می‌دهد. عموماً با بهبود کیفیت شکل گیری کاغذ، مقدار تخلخل کاغذ کاهش می‌یابد [۱۹].

قابلیت نفوذ هوا در کاغذ میتواند از بسیاری جهات دارای اهمیت باشد از جمله: ارتباط با خواص مقاومتی و خواص ظاهری و نیازمندیهای مصرف نهایی شامل انواع کاغذهای بسته بندی. به

دلیل جذب موثر نشاسته کاتیونی در شبکه الیاف مقاومت به عبور هوا افزایش یافته است و میتوان منشأ آن را به بار مثبت نشاسته کاتیونی و تمایل شدید آن به جذب شدن بر روی سطح منفی الیاف و بهبود اتصال بین الیاف نسبت داد. علاوه بر این بر اثر کوچک تر شدن ابعاد نانوالیاف سلولزی سطح ویژه فیبرهای سلولزی افزایش می‌یابد. این به معنی قرار گرفتن تعداد بیشتر گروه‌های در دسترس هیدروکسیل در سطح نانو فیبرهاست که توانایی تشکیل پیوند هیدروژنی را با نانوفیبرهای مجاور دارند و نهایتاً سبب تشکیل شبکه ای از نانو فیبرها می‌شوند [۲۰]، که موجب افزایش این مقاومت به عبور هوا می‌گردد. Hii و همکاران (۲۰۱۲) در تصاویر میکروسکوپ الکترونی نشان داده اند که نانو الیاف سلولزی به اتصال بین پرکننده و 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 [۲۱].

صافی سطح کاغذ از ویژگی‌های مهم ساختاری آن است که در بسیاری از کاربردها بخصوص برای چاپ پذیری بهتر و کیفیت بیشتر چاپ از اهمیت قابل ملاحظه ای برخوردار است [۲۲]. این ویژگی بسیار متاثر از میانگین طول الیاف سلولزی و وجود نرمه های سلولزی و تثبیت آنها در شبکه کاغذ و کیفیت شکل گیری آن است، از این رو در یک ترکیب مشخص به نوعی عملکرد مواد افزودنی را در سوسپانسیون خمیر کاغذ مشخص میکند. برای مثال، دلمه شدن ذرات ریز الیاف سلولزی میتواند باعث بهبود صافی سطح کاغذ شود [۲۳].

مقاومت مکانیکی کاغذ ویژگی مهمی است زیرا کاغذ اغلب تحت شرایط تنشی استفاده می‌شود. آزمون‌های مقاومتی زیادی برای کاغذهای ساخته شده وجود دارد که مهمترین آنها مقاومت به کشش، ترکیدن، پاره شدن، مقاومت به خرد شدن در حالت کنگره‌ای و مقاومت به له‌شدگی حلقه‌ای است هیچ کدام از این خاصیت ها بنیادی نیستند اما ترکیبی از آنها شامل انعطاف-پذیری، مقاومت پیوندهای بین الیاف و مقاومت ذاتی الیاف، خاصیت بنیادی هستند. کلیه مقاومت‌های کاغذ به نوع الیاف، طول الیاف، ضخامت الیاف، انعطاف‌پذیری الیاف، شبکه الیاف، تعداد اتصالات، وزن کاغذ، دانسیته و ... بستگی دارد [۲۳].

مقاومت به کشش شاخص مناسبی برای تمام پیوندهای بین الیاف است که در واقع ترکیبی از سایر مقاومت‌ها است. مقاومت به کشش شاخصی از دوام پتانسیل کشش کاغذی می‌باشد که در اثر نوع مصرف تحت تنش کششی قرار می‌گیرد مهمترین فاکتور موثر بر مقاومت به کشش کاغذ، تعداد و کیفیت اتصال الیاف به یکدیگر می‌باشد. افزایش اتصال الیاف به یکدیگر در اثر افزایش پلاایش یا پرس مرطوب و... مقاومت به کشش کاغذ را افزایش خواهد داد. با این حال مقاومت به کشش کاغذ همیشه کمتر از



خوب و بالایی با سطح الیاف سلولزی دارد، در نتیجه برقراری اتصالات کوالانسی آمیدی یونی و هیدروژنی تسهیل می‌گردد [۲۶]. Ashori (۲۰۰۶) نیز گزارش نمود که پلیمر کاتیونی به واسطه چگالی بار مثبت به راحتی میتواند با الیاف سلولزی پیوند ایجاد کرده و سبب بهبود ویژگیهای مقاومت شود [۱۶].

مقاومت به پارگی از جمله پارامترهای مورد ارزیابی کیفی کاغذ و مقوا، به ویژه در کاربردهای بسته بندی است. عوامل اصلی تاثیرگذار در این مقاومت شامل میانگین طول و قطر الیاف و نیز مقاومت ذاتی الیاف بکار رفته در تولید کاغذ است که البته میزان پیوندیابی اجزا و نیز جهت یافتگی آنها در ساختار کاغذ نیز تاثیرگذار است. در خمیر کاغذهای با میزان پیوندیابی زیاد، ویژگیهای ذاتی الیاف عامل تعیین کننده بوده و بنابراین میانگین بلندتر طول و ضخامت بیشتر الیاف، مقاومت به پاره شدن مناسب تری را ارائه میدهد.

مقاومت به پارگی تحت عوامل بسیاری قرار دارد که نتایج محققان حاکی از آن است که مقاومت به پارگی بیشتر تحت تاثیر میانگین طول الیاف، سطح پیوند هیدروژنی و مقاومت ذاتی الیاف قرار دارد. با افزایش نانو الیاف لیگنوسلولزی میانگین طول الیاف کاهش و سطح پیوند هیدروژنی افزایش می‌یابد که مقاومت به پارگی دچار نوساناتی می‌شود. به طور کلی با افزایش مقادیر بیشتر نانو سلولز به دلیل افزایش سطح پیوند هیدروژنی مقاومت به پارگی افزایش می‌یابد [۷] و [۲۴]. در گزارشی کاهش مقاومت به پاره شدن در کاغذهای ترکیبی CMP و نانو فیبر سلولز گزارش شده است. در آن گزارش تغییرات در دو عامل مقاومت ذاتی الیاف و سطح پیوند هیدروژنی دلیل تغییرات و شدت این تغییرات در مقاومت به پارگی معرفی شده‌اند. در توجیه رفتار مقاومت به پاره شدن کاغذهای ترکیبی این-طور استدلال می‌شود که نانو الیاف لیگنوسلولزی با افزایش سطح پیوند بین کاغذها موجب افزایش مقاومت می‌شود. از سوی دیگر افزودن نانو الیاف لیگنوسلولزی و استقرار آن در بین الیاف و ایجاد ممانعت در پیوند مستقیم الیاف با هم موجب افزایش مقاومت شبکه الیاف نسبت به تنش پارگی می‌شود [۲۷]. افزودن نشاسته کاتیونی به دلیل نکه داشتن نرمه ها و افزایش پیوندها شاخص مقاومت به پارگی کاغذ را بهبود می دهد. هادیلام و همکاران گزارش داده اند که با افزودن نانو الیاف سلولزی، مقاومت به پارگی کاغذها کاهش می یابد؛ به طوری که کمترین مقاومت به پارگی در نانو کاغذ مشاهده شد.

افزایش مقاومت در برخی کاغذها بدلیل حضور نشاسته کاتیونی به این دلیل است که حضور عوامل کاتیونی سبب توزیع یکنواخت تر نانوالیاف لیگنوسلولزی در شبکه کاغذ و پراکنش یکنواخت تنش در اثر اعمال نیرو می‌شود [۲۸].

درجه روشنی و ماتی کاغذ تابع ویژگی‌های نوری خمیرهای سازنده کاغذ و مقدار و نحوه پراکنش مواد پرکننده در کاغذ است.

مقاومت به کشش یک فیبر خواهد بود [۲۳]. مقاومت به کشش در جهت ماشین همیشه بیشتر از جهت عرضی است، زیرا الیاف در جهت طولی بیشتر از جهت عرضی هم راستا می‌شوند. در راستای MD<sup>۱</sup> در واقع دو دسته اتصالات مورد کشش قرار می‌گیرند: پیوندهای کووالانسی (C-C, O-C) درون و بین گلوکزهای موجود در زنجیره‌های سلولز و پیوندهای هیدروژنی بین الیاف. به طور کلی در جهت MD تعداد بیشتری پیوندهای کووالانسی و در جهت CD<sup>۲</sup> تعداد کمتری پیوند های کووالانسی وجود دارد [۲۴]. در کاغذهای دست ساز به دلیل اینکه الیاف به طور تصادفی و در راستاهای مختلف قرار می‌گیرند جهت طولی و عرضی مفهومی ندارد.

بر اثر کوچک تر شدن ابعاد نانوالیاف سلولزی سطح ویژه فیبرهای سلولزی افزایش می‌یابد. این به معنی قرار گرفتن تعداد بیشتر گروه‌های در دسترس هیدروکسیل در سطح نانو فیبرهاست که توانایی تشکیل پیوند هیدروژنی را با نانوفیبرهای مجاور دارند و نهایتاً سبب تشکیل شبکه ای از نانو فیبرها می‌شوند [۲۰]. که موجب افزایش این مقاومت میگردد. 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 [۲۵].

کاهش مقاومت به کشش با افزایش نانوسیلیکا را میتوان چنین استدلال نمود که حضور نانوسیلیکا امکان پیوندیابی بیشتر را فراهم نمی‌کند، و باعث کاهش مقاومت می‌شود.

به طور کلی نتایج حاکی از این است که نانوالیاف سلولز با استفاده از نشاسته کاتیونی و بواسطه ضریب لاغری بسیار بالا و درگیری فیزیکی بین نانو الیاف با یکدیگر و نانو الیاف با الیاف در ساختار کاغذ باقی مانده و موجب افزایش مقاومت به ترکیدن می‌شود. نانو الیاف به دلیل سطح ویژه بالا و ایجاد درگیری فیزیکی بین نانوالیاف و الیاف باگاس سبب افزایش تعداد پیوند هیدروژنی و افزایش سطح پیوند بین الیاف و کاهش فضای خالی بین الیاف می‌شود که افزایش پیوند بین الیاف می‌توان قدرت شبکه‌ای الیاف را افزایش دهد و با افزایش پیوند مانع از لغزش الیاف شود و به استحکام شبکه لیفی منجر شود [۷] و [۲۴].

نشاسته کاتیونی با دارای بودن گروه‌های آمینی و نیز فراوانی گروه های هیدروکسیلی، از توانایی ایجاد اتصال هیدروژنی، یونی و کوالانسی با سطوح الیاف سلولزی برخوردار است. از آنجاییکه نشاسته کاتیونی ساختاری شبیه سلولز دارد، سازگاری و تمایل

<sup>1</sup> Machine Direction

<sup>2</sup> Croos Direction

۶. درصد نانوسیلیکا و ۱/۵ درصد نشاسته کاتیونی به ترتیب دارای ۱۰/۱، ۱۳/۱، ۱۰/۸، ۱/۵، ۹/۹ و ۷۵/۲ درصد جذب آب، شاخص مقاومت به کشش، شاخص مقاومت به ترکیدن، شاخص مقاومت به پاره شدن، روشنی و زردی کمتر نسبت به ۴ درصد نانوسیلیکا است.

۷. درصد نانوسیلیکا و ۱/۵ درصد نشاسته کاتیونی به ترتیب دارای ۱، ۱۴/۷، ۴۰/۲ و ۶/۷ درصد جذب آب، مقاومت به عبور هوا، سفیدی و ماتی بیشتر نسبت به ۸ درصد نانوسیلیکا است.

۸. درصد نانوسیلیکا و ۱/۵ درصد نشاسته کاتیونی به ترتیب دارای ۵/۲، ۳۶/۳، ۶۹/۳، ۷۴/۵، ۵/۱ و ۱۴/۸ درصد صافی سطح، شاخص مقاومت به کشش، شاخص مقاومت به ترکیدن، شاخص مقاومت به پاره شدن، روشنی و زردی کمتر نسبت به ۸ درصد نانوسیلیکا است.

استفاده از نشاسته کاتیونی برای بهبود خواص مختلف کاغذهای بازیافتی تهیه شده از آخال سفید می‌تواند ضمن ایجاد ارزش افزوده، مزایای مختلفی را به همراه داشته باشد. باتوجه به این که آخال مصرفی در کارخانه ترک به دلیل عدم وجود سامانه جوهرزدایی، همواره دارای مقادیری از ذرات ریز جوهر است، شاید برخی کاهش خواص کاغذهای دست‌ساز را بتوان به این علت دانست. استفاده از نانوسلولز و نانوسیلیکا برای بهبود خواص کاغذهای بازیافتی می‌تواند ضمن ایجاد ارزش افزوده، مزایای مختلف فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی را نیز به همراه داشته باشد. با ارتقای ویژگی‌های کاغذهای بسته‌بندی از طریق این افزودنی‌ها طبق نتایج این تحقیق، ارزش افزوده محصول بهبود می‌یابد و می‌توان از آن در تهیه کارتن‌های صادراتی استفاده نمود.

## ۵- مراجع

- [1] M. A. Hubbe, R. A. Venditti and O. J. Rojas, "What happens to cellulosic fibers during Papermaking and recycling? A review," *BioResources*, vol. 2(4), pp 739-788, 2007.
- [2] Y. Miao, S. Xiang, Y. Wei, X. Long, J. Qiu, J. and Y. Miao, "Physical Properties of Pulp and Paper: A Comparison of Forming Procedures," *Forest Products Journal*, vol. 73(2), pp 175-185, 2023. DOI: <https://doi.org/10.13073/FPJ-D-23-00007>
- [3] P. K. Bajpai, "Solving the problems of recycled fiber processing with enzymes," *BioResources*, vol. 5(2), pp. 1311-1325, 2010.
- [4] M. A. Hubbe, and R. A. Gill, "Fillers for papermaking: a review of their properties, usage practices, and their mechanistic role," *BioResources*, vol. 11(1), pp 2886-2963, 2016. DOI: 10.15376/biores.11.1.2886-2963
- [5] V. D. Ramos, H. M. Da Costa, V. L. Soares, and R. S. Nascimento, "Modification of epoxy resin: a comparison of different types of elastomer," *Polymer Testing*, vol. 24(3), pp 387-394, 2005. DOI: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0142941804001436>
- [6] R. Albala, D. Olmos, A. J. Aznar, J. Baselga, and J. Gonzalez-Benito, "Fluorescent labels to study thermal transitions in epoxy/silica composites," *Journal of colloid and interface science*, vol. 277(1), pp 71-78. 2004. DOI: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/15276040/>

با افزودن نانوالیاف سلولزی و نشاسته کاتیونی و دچار تغییراتی شد. روند تغییرات در روشنی، سفیدی، ماتی و زردی نامشخص است، بطوریکه گاهی افزایش و گاهی کاهش یافت. در اثر کاربرد نانو الیاف سلولزی درجه روشنی و سفیدی کاهش و افزایش و در اثر کاربرد نانو الیاف سلولز - نشاسته کاتیونی درجه روشنی و سفیدی افزایش یافت. نانوالیاف سلولز به دلیل افزایش پیوندپذیری سبب پر شدن فضای خالی بین الیاف میشود. مقدار زردی به طور کلی با افزایش درصد نانو الیاف کاهش پیدا کرد. گروه های کاتیونی سبب تثبیت عوامل رنگی در کاغذ میشوند که این امر به افزایش روشنی، و ماتی در کاغذ می انجامد. اضافه نمودن نانو سلولز به خمیرها باعث کاهش درجه روشنی شد.

تصویر میکروسکوپ الکترونی نشان داد افزودن نانو الیاف سلولز و نانوسیلیکا و ترکیب این مواد با نشاسته کاتیونی سبب افزایش پیوندپذیری، تراکم بیشتر الیاف، پر شدن فضای خالی بین الیاف و ماندگاری بیشتر نرمة ها شده است.

نتایج این تحقیق حاکی از موفقیت در به کارگیری نانو الیاف سلولزی است [۲۹]. هر چند افزودن نانو الیاف سلولزی و الیاف بلند وارداتی اختلاف معنی داری نداشته ولی از آنجاییکه منجر به کاهش واردات می‌گردد می‌تواند حائز اهمیت باشد.

به طور کلی این نتایج در این تحقیق حاصل گردید:

۱. درصد نانوالیاف سلولزی و ۱/۵ درصد نشاسته کاتیونی به ترتیب دارای ۲/۵، ۱۴/۱، ۴۶/۹، ۳۵/۹، ۹/۵، ۸/۹، ۲۰/۵ و ۵/۱ درصد جذب آب، صافی سطح، شاخص مقاومت به کشش، شاخص مقاومت به ترکیدن، شاخص مقاومت به پاره شدن، روشنی، سفیدی و ماتی بیشتر نسبت به ۴ درصد نانوالیاف سلولزی است.

۲. درصد نانوالیاف سلولزی و ۱/۵ درصد نشاسته کاتیونی به ترتیب دارای ۳۰/۹، ۱۹/۳ درصد مقاومت به عبور هوا، و زردی کمتر نسبت به ۴ درصد نانوالیاف سلولزی است.

۳. درصد نانوالیاف سلولزی و ۱/۵ درصد نشاسته کاتیونی به ترتیب دارای ۱۶/۱، ۴۳/۷، ۷/۶، ۲۱/۳، ۱۰/۷، ۶/۱، ۱/۱، ۶/۶ درصد جذب آب، مقاومت به عبور هوا، شاخص مقاومت به کشش، شاخص مقاومت به ترکیدن، شاخص مقاومت به پاره شدن، روشنی، سفیدی و ماتی بیشتر نسبت به ۸ درصد نانوالیاف سلولزی است.

۴. درصد نانوالیاف سلولزی و ۱/۵ درصد نشاسته کاتیونی به ترتیب دارای ۳۶/۲ و ۲۳/۱ درصد صافی سطح، و زردی کمتر نسبت به ۴ درصد نانوالیاف سلولزی است.

۵. درصد نانوسیلیکا و ۱/۵ درصد نشاسته کاتیونی به ترتیب دارای ۸/۱، ۱۸/۳، ۳۴/۱ و ۶/۹ درصد صافی سطح، سفیدی و ماتی بیشتر نسبت به ۴ درصد نانوسیلیکا است.

- [19] G., Asadpour, H., Resalati, M. R., Dehghani, A. Ghasemian, and M., Mohammad Nazhad, "Comparison of using single and dual retention aid system on newspaper pulp properties," *Wood and Forest Science and Technology*, vol. 22(2), pp 75-93, 2015. (In Persian).
- [20] H., Yousefi, M., Faezipour, T., Nishino, A., Shakeri, and G. Ebrahimi, "All-cellulose composite and nanocomposite made from partially dissolved micro-and nanofibers of canola straw," *Polymer Journal*, vol. 43(6), pp 559-564, 2011. DOI: <https://www.nature.com/articles/pj201131>
- [21] C., Hii, Ø. W., Gregersen, G., Chinga-Carrasco, and Ø. Eriksen, "The effect of MFC on the pressability and paper properties of TMP and GCC based sheets," *Nordic Pulp & Paper Research Journal*, vol. 27(2), pp 388-396, 2012. DOI: <https://www.degruyter.com/document/doi/10.3183/npprj-2012-27-02-p388-396/pdf>
- [22] Y. Hamzeh, and A., Rostampour-Haftkhani, "Principales of Papermaking Chemistry," University of Tehran Press, Tehran, Iran, 2008. (In Persian).
- [23] S. Elyasi, H. Jalali-Torshizi, and H. Resalati, "Investigation on the effect of different levels of alum consumption in alun-rosin sizing on the properties of plyboard," *Journal of forest and wood products*, vol. 69(2), pp 375-385, 2015. (In Persian).
- [24] M. Tajik, H. Resalati, Y. Hamzeh, H. J. Torshizi, H. Kermanian, and B. Kord, "Improving the properties of soda bagasse pulp by using cellulose nanofibers in the presence of cationic polyacrylamide," *BioResources*, vol. 11(4), pp 9126-9141, 2016. DOI: [10.15376/biores.11.4.9126-9141](https://doi.org/10.15376/biores.11.4.9126-9141)
- [25] P. Rezayati Charani, M. Dehghani-Firouzabadi, E. Afra, Å. Blademo, A. Naderi, and T. Lindström, "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*, vol. 20, pp. 2559-2567, 2013. DOI: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10570-013-9998-z>
- [26] A. M. A. Nada, M. El-Sakhawy, S. Kamel, M. A. M. Eid, and A. M. Adel, "Effect of chitosan and its derivatives on the mechanical and electrical properties of paper sheets," *Egyptian journal of solids*, vol. 28(2), pp 359-377, 2005. DOI: [https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/abs/2023/08/e3sconf\\_afe2023\\_01045/e3sconf\\_afe2023\\_01045.html](https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/abs/2023/08/e3sconf_afe2023_01045/e3sconf_afe2023_01045.html)
- [27] S. Alinia, "Comparative study on the properties of paper produced from chemimechanical pulp (CMP) reinforced with Nanofibrillated Cellulose (NFC) and Microcrystalline Cellulose (MCC) (M.Sc. thesis. Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources). 2011. (In Persian).
- [28] M. Delgado-Aguilar, I. González, M. A. Pèlach, De La E. Fuente, C. Negro, and P. Mutjé, "Improvement of deinked old newspaper/old magazine pulp suspensions by means of nanofibrillated cellulose addition," *Cellulose*, vol. 22, pp 789-802, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10570-014-0473-2>
- [29] M. H. Moradian, P. Rezayati Charani, and M. Saadat Niya, "Improving paper breaking length using cellulosic nanofibers in bagasse pulp," *Forest and Wood Products*, vol. 69(3), pp 603-614, 2016. (In Persian).
- [7] E. A. Hassan, M. L. Hassan, and K. Oksman, "Improvement of paper sheets properties of bagasse pulp with microfibrillated cellulose isolated from xylanase treated bagasse," *Wood and Fiber Science*, vol. 43(1), pp 1-7, 2011.
- [8] T. Taipale, M. Österberg, A. Nykänen, J. Ruokolainen, and J. Laine, "Effect of microfibrillated cellulose and fines on the drainage of kraft pulp suspension and paper strength," *Cellulose*, vol. 17, pp 1005-1020, 2010. DOI: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10570-010-9431-9>
- [9] N. Motie, M. Jonoobi, M. Fazei Pour, M. M. Mahboobian, and S. Borzacchiello, "Nanocellulose based biohydrogel: Preparation and characterization of some properties," *Iranian Journal of Wood and Paper Industries*, vol. 9(4), pp 497-509, 2019. (In Persian).
- [10] L. Brinchi, F. Cotana, E. Fortunati, and J. M. Kenny, "Production of nanocrystalline cellulose from lignocellulosic biomass: technology and applications," *Carbohydrate polymers*, vol. 94(1), pp 154-169, 2013. DOI: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0144861713000490>
- [11] I. Siró, and D. Plackett, "Microfibrillated cellulose and new nanocomposite materials: a review," *Cellulose*, vol. 17, pp. 459-494, 2010. DOI: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10570-010-9405-y>
- [12] H. Fukuzumi, T. Saito, T. Iwata, Y. Kumamoto, and A. Isogai, "Transparent and high gas barrier films of cellulose nanofibers prepared by TEMPO-mediated oxidation," *Biomacromolecules*, vol. 10(1), pp 162-165, 2009. DOI: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/bm801065u>
- [13] M. Goli, M. Zabihzadeh, S. Mahdavi, and H. Sadeghifar, "The effect of TCF bleaching before and after refining on the CMP pulp properties," *Iranian Journal of Wood and Paper Science Research*, vol. 31(3), pp 510-521, 2016. (In Persian).
- [14] J. Gullichsen, H. Paulapuro, and L. Neimo, *Book 4 Papermaking Chemistry*.
- [15] H. Davodian, G. Asadpour, and S. M. Zabihzadeh, "Effect of using dual composition of cationic starch-nano silica and nano cellulose-poly acrylamide on physical and strength properties of cotton papers," *Iranian Journal of Wood and Paper Science Research*, vol. 33(3), pp 428-437, (2018). (In Persian).
- [16] A. Ashori, "Pulp and paper from kenaf bast fibers," *Fibers and Polymers*, vol. 7, pp 26-29, 2006.
- [17] A. Ashori, and W. D. Raverty, "Printability of sized kenaf (*Hibiscus cannabinus*) papers," *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, vol. 46(7), pp 683-687, 2007. DOI: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/03602550701429250>
- [18] A. Ashori, W. D. Raverty, and J. Harun, "Effect of chitosan addition on the surface properties of kenaf (*Hibiscus cannabinus*) paper," *Fibers and Polymers*, vol. 6, pp 174-179, 2005. DOI: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF02875611>