



University of Tehran

## Comparative study of the effect of sodium silicate and nanoclay coating treatments on the fire resistance and mechanical properties of paper made from soda bagasse pulp

Soleiman Zaheri<sup>1\*</sup> | Ali Ghasemian<sup>2</sup> |  
Mohammad Reza Dehghani Firuzabadi<sup>3</sup> | Ghasem Asadpour<sup>4</sup>

1. Corresponding Author, Department of Paper Science and Engineering, Faculty of Wood and Paper Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. Email: [soleiman.zaheri@yahoo.com](mailto:soleiman.zaheri@yahoo.com)
2. Department of Paper Science and Engineering, Faculty of Wood and Paper Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. Email: [ghasemian@gau.ac.ir](mailto:ghasemian@gau.ac.ir)
3. Department of Paper Science and Engineering, Faculty of Wood and Paper Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. Email: [mdehghani@gau.ac.ir](mailto:mdehghani@gau.ac.ir)
4. Department of Paper Science and Engineering, Faculty of Natural Resources, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran. Email: [asadpur2002@yahoo.com](mailto:asadpur2002@yahoo.com)

### ARTICLE INFO

**Article type:**  
Research Article

**Article History:**  
Received: 16 May 2025  
Revised: 05 August 2025  
Accepted: 11 August 2025  
Published online: 16 September 2025

**Keywords:**  
*Fire-retardancy,  
Bagasse paper,  
Coating,  
Paper flammability.*

### ABSTRACT

Cellulosic papers, due to their light weight, recyclability, and biodegradability, are widely used in industries such as packaging, construction, and decoration. However, the presence of hydroxyl functional groups and a porous structure reduce their heat and fire resistance, limiting applications. To improve mechanical properties and thermal resistance, this study applied sodium silicate and montmorillonite nanoclay coatings combined with cationic starch on paper produced from soda bagasse pulp. Coating solutions at concentrations of 10, 20, and 30% were tested, and samples were evaluated for physical, mechanical, and thermal properties. Results showed that sodium silicate at 20% concentration provided the greatest improvement in strength, while 30% concentration offered the highest fire resistance. In vertical flammability tests, both treatments reduced burning time and increased char length. Sodium silicate performed better by forming a stable ceramic-like mineral layer that reduced flame spread and increased char residue. This layer not only prevented oxygen penetration into the cellulose matrix but also inhibited rapid thermal degradation. Thermogravimetric analysis (TGA) indicated that sodium silicate increased the onset temperature of degradation and char yield at 600 °C. Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR) further confirmed enhanced silicate bonding and greater reduction of hydroxyl groups. Overall, sodium silicate treatment showed superior performance and can be considered an effective method for producing heat-resistant papers for industrial applications.

**Cite this article:** Zaheri, S., Ghasemian, A., Dehghani Firuzabadi, M.R., Asadpour, G. (2025). Comparative study of the effect of sodium silicate and nanoclay coating treatments on the fire resistance and mechanical properties of paper made from soda bagasse pulp. *Journal of Forest and Wood Products*, 78 (2), 191-207. DOI: <http://doi.org/10.22059/jfwp.2025.395287.1348>



© The Author(s) **Publisher:** University of Tehran Press.  
DOI: <http://doi.org/10.22059/jfwp.2025.395287.1348>



دانشگاه تهران

## نشریه جنگل و فرآورده‌های چوب

شاپا الکترونیکی: ۲۳۸۳-۰۵۳۰

سایت نشریه: <https://jfwf.ut.ac.ir>

### بررسی مقایسه‌ای اثر تیمار پوششی سیلیکات سدیم و نانورس

### بر ویژگی‌های مقاومت به آتش و مکانیکی کاغذ حاصل از خمیر سودای باگاس

سلیمان ظاهری<sup>۱\*</sup> | علی قاسمیان<sup>۲</sup> | محمدرضا دهقانی فیروزآبادی<sup>۳</sup> | قاسم اسدپور<sup>۴</sup>

۱. نویسنده مسئول، گروه علوم و مهندسی کاغذ، دانشکده مهندسی چوب و کاغذ، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، ایران. رایانامه:

[soleiman.zaheri@yahoo.com](mailto:soleiman.zaheri@yahoo.com)

۲. گروه علوم و مهندسی کاغذ، دانشکده مهندسی چوب و کاغذ، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، ایران. رایانامه:

[gghasemian@gu.ac.ir](mailto:gghasemian@gu.ac.ir)

۳. گروه علوم و مهندسی کاغذ، دانشکده مهندسی چوب و کاغذ، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، ایران. رایانامه:

[mdehghani@gu.ac.ir](mailto:mdehghani@gu.ac.ir)

۴. گروه علوم و مهندسی کاغذ، دانشکده مهندسی چوب و کاغذ، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ایران. رایانامه:

[asadpur2002@yahoo.com](mailto:asadpur2002@yahoo.com)

#### اطلاعات مقاله

#### چکیده

#### نوع مقاله:

پژوهشی

#### تاریخ‌های مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۲۶

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۵/۱۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۲۰

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۶/۲۵

#### کلیدواژه‌ها:

اشتعال‌پذیری کاغذ،

پوشش‌دهی،

کاغذ باگاس،

کندسوزی.

کاغذهای سلولزی به دلیل ویژگی‌هایی مانند وزن سبک، قابلیت بازیافت و زیست‌تخریب‌پذیری، در صنایع مختلف از جمله بسته‌بندی، ساختمان و دکوراسیون کاربرد گسترده‌ای دارند. با این حال، وجود گروه‌های عاملی هیدروکسیل و ساختار متخلخل آنها، سبب کاهش مقاومت در برابر حرارت و آتش می‌شود و استفاده از این مواد را محدود می‌سازد. به منظور ارتقای ویژگی‌های مکانیکی و مقاومت حرارتی، در این پژوهش، از تیمار پوششی سیلیکات سدیم و نانورس مونت‌موریلونیت همراه با نشاسته کاتیونی بر روی کاغذ حاصل از خمیر سودای باگاس استفاده شد. محلول پوشش‌دهی در غلظت‌های ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد اعمال و نمونه‌ها از نظر ویژگی‌های فیزیکی، مکانیکی و حرارتی ارزیابی شدند. نتایج نشان داد که تیمار با سیلیکات سدیم، در غلظت ۲۰ درصد بهترین بهبود در ویژگی‌های مقاومتی و در غلظت ۳۰ درصد، بیشترین مقاومت در برابر اشتعال را فراهم می‌کند. در آزمون اشتعال‌پذیری عمودی نیز هر دو تیمار موجب کاهش زمان سوختن و افزایش طول زغال شدند. اما، سیلیکات سدیم با تشکیل لایه معدنی سرامیکی پایدار، در کاهش گسترش شعله و افزایش بقایای زغالی برتری داشت. این لایه نه تنها مانع نفوذ اکسیژن به بافت سلولزی شد بلکه از پیشرفت سریع تخریب حرارتی جلوگیری کرد. آزمون وزن‌سنجی حرارتی TGA نشان داد که تیمار سیلیکات سدیم موجب افزایش دمای آغاز تخریب و افزایش درصد زغال باقیمانده در دمای ۶۰۰ درجه سلسیوس شد. نتایج طیف‌سنجی FTIR نیز افزایش شدت پیوندهای سیلیکاتی و کاهش بیشتر گروه‌های هیدروکسیل را تأیید کرد. در مجموع، تیمار با سیلیکات سدیم برتری داشته و می‌تواند رویکردی کارآمد برای تولید کاغذهای مقاوم به حرارت، در کاربردهای صنعتی باشد.

استاد: ظاهری؛ سلیمان؛ قاسمیان؛ علی؛ دهقانی فیروزآبادی؛ محمدرضا؛ اسدپور؛ قاسم (۱۴۰۴). بررسی مقایسه‌ای اثر تیمار پوششی سیلیکات سدیم و نانورس بر ویژگی‌های مقاومت به آتش و مکانیکی کاغذ حاصل از خمیر سودای باگاس. نشریه جنگل و فرآورده‌های چوب، ۷۸ (۲)، ۱۹۱-۲۰۷.

DOI: <https://10.22059/jfwf.2025.395287.1348>

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

© نویسندگان.

<https://doi.org/10.22059/jfwf.2025.395287.1348>



## ۱. مقدمه

مواد سلولزی و کاغذهای تولیدشده از آن، به‌عنوان یکی از مهم‌ترین منابع زیست‌پایه، به‌واسطه ویژگی‌هایی همچون سبکی، زیست‌تخریب‌پذیری، هزینه پایین و قابلیت بازیافت، در صنایع مختلف از جمله بسته‌بندی، دکوراسیون داخلی و عایق‌های حرارتی کاربرد گسترده‌ای یافته‌اند [۱]. با این وجود، ضعف عمده این مواد در برابر حرارت و شعله، کاربرد آنها را در بسیاری از حوزه‌های ایمن‌سازی محدود ساخته است. ساختار شیمیایی کاغذ بر پایه سلولز و گروه‌های فعال مانند هیدروکسیل، موجب اشتعال‌پذیری طبیعی آن می‌شود که با افزایش دما به‌سرعت تجزیه شده و گازهای قابل احتراق آزاد می‌کند [۲].

به‌منظور ارتقاء پایداری حرارتی و ایجاد خاصیت کندسوزی، تاکنون از روش‌های مختلفی استفاده شده که یکی از آنها، بهره‌گیری از پوشش‌های سطحی بر پایه مواد معدنی و آلی سازگار با محیط‌زیست است. اعمال این پوشش‌ها، نه‌تنها موجب کاهش اشتعال‌پذیری می‌شود، بلکه بهبودهایی در خواص فیزیکی و مکانیکی کاغذ نیز به‌دنبال دارد [۳]. در بین این مواد، می‌توان به سیلیکات سدیم به‌عنوان یک ترکیب غیرآلی با خاصیت تشکیل لایه محافظ در دمای بالا [۴، ۵]، و نیز نانورس مونت‌موریلونیت با ساختار لایه‌ای و پایداری حرارتی بالا، اشاره کرد [۶، ۷].

نانورس‌ها با مسدود کردن مسیر نفوذ اکسیژن، کاهش نرخ تبخیر مواد فرار و ایجاد لایه زغالی پایدار، نقش مؤثری در مهار گسترش آتش ایفا می‌کنند [۸]. از سوی دیگر، سیلیکات سدیم نیز با تشکیل شبکه‌ای معدنی از نوع سیلیکات-اکسیژن، به‌عنوان یک سد حرارتی عمل کرده و انتقال حرارت را به درون ساختار سلولزی محدود می‌سازد [۹]. همچنین، نشاسته کاتیونی به‌عنوان یک عامل زیست‌پایه با عملکرد دوگانه (افزایش پیوندهای هیدروژنی و چسبندگی الیاف) در کنار این ترکیبات، موجب تقویت خواص مکانیکی کاغذ و بهبود پایداری پوشش ایجاد شده می‌گردد [۱۰].

پیشرفت‌های اخیر نشان می‌دهد که ترکیب مواد معدنی مانند نانو رس مونت‌موریلونیت و سیلیکات سدیم با پلیمرهای طبیعی همچون نشاسته، بدون نیاز به افزودنی‌های حاوی هالوژن یا فرمالدهید، می‌تواند روشی مؤثر، کم‌هزینه و زیست‌سازگار برای بهبود عملکرد کاغذ باشد [۱۱]. این ترکیبات از طریق تشکیل لایه‌ای متراکم و آب‌گریز بر سطح الیاف، ضمن کاهش نفوذپذیری، ویژگی‌های مطلوبی از جمله افزایش ضخامت، مقاومت به کشش و کاهش جذب آب را نیز فراهم می‌سازند [۱۲، ۱۳].

در مطالعات مختلف، نشان داده شده است که لایه‌های نانورس می‌توانند روند کربونیزاسیون را تسهیل کرده و منجر به تشکیل زغال‌های حرارتی مقاوم در دمای پایین‌تر شوند [۱۴]. این زغال‌ها به‌صورت یک مانع فیزیکی عمل کرده و نه‌تنها از گسترش شعله جلوگیری می‌کنند، بلکه به پایداری حرارتی کلی ساختار نیز می‌افزایند. این در حالی است که ساختار متراکم حاصل از سیلیکات سدیم در دماهای بالا به‌صورت سرامیکی در می‌آید و به‌عنوان یک لایه محافظ عمل می‌کند که مانع رسیدن اکسیژن و گرما به بافت سلولزی زیرین می‌شود [۱۵].

در این پژوهش، عملکرد دو نوع پوشش معدنی شامل سیلیکات سدیم و نانورس بر خواص فیزیکی، مکانیکی و اشتعال‌پذیری کاغذ باگاس به‌صورت مقایسه‌ای و ساختارمند بررسی شد. در حالی که اغلب مطالعات پیشین تنها به یک نوع تیمار پرداخته‌اند، در این طرح سه سطح غلظتی برای هر پوشش اعمال شد و تأثیر آنها بر ویژگی‌های مختلف مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. بهره‌گیری از آزمون‌های تخصصی مانند وزن‌سنجی حرارتی، طیف‌سنجی مادون قرمز و آزمون اشتعال‌پذیری عمودی، رویکردی جامع و نوآورانه برای ارزیابی عملکرد پوشش‌ها فراهم کرده است. همچنین استفاده از نشاسته کاتیونی به‌عنوان بایندر زیستی و طبیعی، ترکیب پوششی را به‌سمت مواد سبز و ایمن سوق داده است. از سوی دیگر، با توجه به نتایج این پژوهش که نشان‌دهنده بهبود معنی‌دار ویژگی‌های کندسوزی و مقاومت مکانیکی کاغذ تیمار شده با سیلیکات سدیم می‌باشد، کاربردهای صنعتی گسترده‌ای می‌توان برای این محصول پیش‌بینی کرد. از جمله این کاربردها، می‌توان به استفاده در روکش درب‌های ضدحریق، کاغذ دیواری مقاوم به آتش، پوشش ایمن برای عایق‌های کابل برق و سایر مصارف ساختمانی و دکوراتیو اشاره کرد. این کاربردها، پژوهش حاضر را از یک مطالعه آزمایشگاهی صرف فراتر برده و در زمره طرح‌هایی با پتانسیل بالا برای تجاری‌سازی و بهره‌برداری صنعتی قرار می‌دهد.

هدف از این پژوهش، بررسی تأثیر تیمار پوششی با دو ماده معدنی سیلیکات سدیم و نانورس مونت‌موریلونیت بر بهبود ویژگی‌های مقاومتی، فیزیکی و حرارتی کاغذ حاصل از خمیر سودا باگاس بود. در این راستا، نمونه‌های کاغذی با غلظت‌های مختلف از این

ترکیبات پوشش‌دهی شده و سپس تحت آزمون‌های فنی از جمله ضخامت، جذب آب، زاویه تماس، مقاومت به کشش، ترک‌یدن، پاره شدن، اشتعال‌پذیری عمودی، وزن‌سنجی حرارتی و طیف‌سنجی مادون سرخ قرار گرفتند. هدف نهایی، شناسایی ماده مؤثرتر و تعیین غلظت بهینه برای به‌کارگیری در تولید کاغذهایی با مقاومت بالا در برابر شعله و عوامل فیزیکی بود.

## ۲. روش‌شناسی پژوهش

### ۲-۱. مواد

مواد شیمیایی مورد استفاده در این تحقیق به شرح جدول یک است.

جدول ۱. مواد شیمیایی مورد استفاده

| ردیف | نام                                      | کشور و شرکت تولیدکننده |
|------|------------------------------------------|------------------------|
| ۱    | نانورس مونت‌موریلونیت (MMT) <sup>۱</sup> | آمریکا (Sigma-Aldrich) |
| ۲    | سیلیکات سدیم (SS) <sup>۲</sup>           | آلمان (Merk)           |
| ۳    | نشاسته کاتیونی (CS) <sup>۳</sup>         | کره (Samyang Genex)    |

### ۲-۲. روش کار

#### ۲-۲-۱. آماده‌سازی نانو رس مونت‌موریلونیت و سیلیکات سدیم

برای تهیه فرمولاسیون پوششی، درصد‌های مختلفی از نانورس مونت‌موریلونیت به‌صورت سوسپانسیون در آب مقطر پخش و سیلیکات سدیم به‌صورت محلول در آب حل شد و سپس هر یک به محلول نشاسته کاتیونی افزوده گردید.

#### ۲-۲-۲. آماده‌سازی محلول پوشش‌دهی

کاغذ ساخته شده از خمیر کاغذ سودای باگاس داخلی با درجه روانی ۴۰۰ CSF، وزن پایه  $125 \pm 5$  گرم بر متر مربع و ضخامت میانگین  $0.185 \pm 0.005$  میلی متر تهیه و از نانو رس مونت‌موریلونیت و سیلیکات سدیم به‌عنوان مواد بازدارنده آتش استفاده شد. برای آماده‌سازی ترکیب پوشش، ۱۰ گرم نشاسته کاتیونی داخلی با رطوبت ۱۸ درصد،  $pH = 6/9$  و درجه استخلاف ۰/۰۳۵ در ۱۰۰ میلی‌لیتر آب مقطر حل و به مدت ۳۰ دقیقه در دمای ۹۰ درجه سانتی گراد پخته شد. مقدار ۱۰، ۲۰ و ۳۰ گرم نانو رس مونت‌موریلونیت و سیلیکات سدیم (غلظت‌های ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد) به‌صورت جداگانه در ۱۰۰ میلی‌لیتر آب مقطر حل شد و به‌صورت دو ترکیب مجزا به محلول نشاسته اضافه گردید. ترکیب حاصل در دستگاه التراسونیک Qsonica-q700 به مدت ۶ دقیقه تحت تیمار فراصوت قرار گرفت. ۲۵ میلی‌لیتر از ترکیب حاصل برای پوشش‌دهی کاغذ با سطح ۰/۲۵ مترمربع استفاده گردید. از این روش، برای تولید سوسپانسیون پوشش از ترکیب ۵ میلی‌لیتر نشاسته، ۵ میلی‌لیتر نانو رس مونت‌موریلونیت و ۵ میلی‌لیتر سیلیکات سدیم به‌طور جداگانه در غلظت‌های مختلف استفاده گردید.

#### ۲-۲-۳. عملیات پوشش‌دهی کاغذ

عملیات پوشش‌دهی توسط پوشش‌دهنده میله‌ای Auto Bar Coater, No. 2 rods و در سطح وزنی ۲۵-۳۰ گرم بر متر مربع بر روی مقواهای پایه حاصل از خمیر باگاس رنگ‌بری شده، با وزن پایه  $125 \pm 5$  گرم بر متر مربع (جدول ۲) انجام شد. ۶ میلی‌لیتر از محلول پوشش‌دهی بر روی کاغذ به ابعاد A۴ ریخته شد و توسط میله پوشش‌دهی با سرعت ۲۵ میلی‌متر بر ثانیه و فشار ثابت روی کاغذ پخش گردید. بعد از پوشش‌دهی، نمونه‌ها به آون با دمای ۶۵-۶۰ درجه سانتی گراد به مدت ۱۰ دقیقه انتقال یافتند.

<sup>۱</sup>Montmorillonit

<sup>۲</sup>Sodium silicate

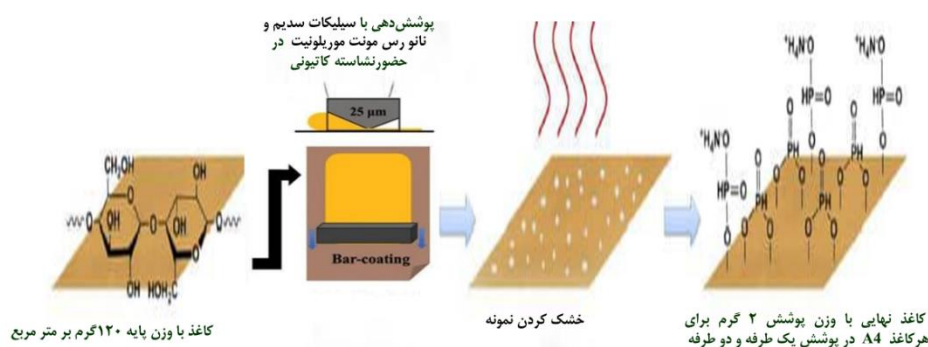
<sup>۳</sup>Cationicstarch

[۱۶]. نهایتاً کاغذهای پوشش‌دهی شده به مدت ۲ روز در دمای محیط قرار گرفتند تا کاملاً خشک شوند. عملیات پوشش‌دهی برای رسیدن به وزن ثابت پوشش برابر با ۲۵ درصد وزن کاغذ A۴ با گراماژ ۱۲۰ گرم بر متر مربع (معادل ۲ گرم برای هر کاغذ ۸ گرمی در پوشش یک‌طرفه<sup>۱</sup>) و در پوشش‌های دوطرفه<sup>۲</sup> (به‌میزان ۱ گرم برای هر طرف از کاغذ پوشش دوطرفه) تکرار شد. از مقوای پوشش‌دهی نشده به‌عنوان نمونه شاهد، استفاده شد (شکل ۱).

جدول ۲. تیمارهای آزمایش برای اصلاح ویژگی‌های مقاومت به آتش کاغذ حاصل از خمیر دست اول باکاس

| ردیف | کد تیمار*       | غلظت (درصد) | نشاسته کاتیونی (CS) (درصد) |
|------|-----------------|-------------|----------------------------|
| ۱    | C               | -           | -                          |
| ۲    | NC <sub>۱</sub> | ۱۰          | ۱۰                         |
| ۳    | NC <sub>۲</sub> | ۲۰          | ۲۰                         |
| ۴    | NC <sub>۳</sub> | ۳۰          | ۳۰                         |
| ۵    | SS <sub>۱</sub> | ۱۰          | ۱۰                         |
| ۶    | SS <sub>۲</sub> | ۲۰          | ۲۰                         |
| ۷    | SS <sub>۳</sub> | ۳۰          | ۳۰                         |

\* C نمونه کنترل، (NC) نانورس مونت‌موریلونیت، (SS) سیلیکات سدیم، (CS) نشاسته کاتیونی



شکل ۱. فرآیند اصلاح کاغذ توسط مواد پوشش‌دهنده

## ۲-۳. ارزیابی ویژگی‌های فیزیکی و مقاومتی

برای تعیین ویژگی‌های فیزیکی کاغذ، نمونه‌ها در شرایط کلیما (رطوبت نسبی  $50 \pm 2$  درصد و دمای  $23 \pm 1$  درجه سانتی گراد) به مدت ۲۴ ساعت مطابق با استاندارد TAPPI T 402 sp- 98 قرار گرفتند. درصد رطوبت براساس استاندارد TAPPI T 240 om-02 بر مبنای وزن خشک نمونه اندازه‌گیری شد. تعیین وزن پایه کاغذ (گراماژ) مطابق با دستورالعمل استاندارد TAPPI T 410 om-02 با استفاده از ترازوی آزمایشگاهی با دقت  $0.01$  گرم انجام شد. مقاومت به نفوذ مایعات (آزمون کاب)، میزان جذب آب مطابق با دستورالعمل استاندارد TAPPI T 441 om-09 اندازه‌گیری و محاسبه شد. ضخامت کاغذها با استفاده از ضخامت‌سنج Mitutoyo ساخت کشور ژاپن با دقت  $0.01$  میلی متر و براساس استاندارد TAPPI T411 om- 97 اندازه‌گیری شد. زاویه تماس قطرات آب در شرایط استاندارد، دمای  $20$  درجه سانتی گراد و رطوبت محیطی  $50$  درصد، توسط دستگاه اندازه‌گیری زاویه تماس مدل Kruss ساخت آلمان به‌منظور اندازه‌گیری مطالعه رفتار ترشوندگی سطح، استفاده شد. بدین‌منظور پس از قرارگرفتن قطره آب مقطر با حجم  $1/6$  میکرولیتر بر روی سطح نمونه مورد نظر، هر  $25$  ثانیه یکبار (در مجموع  $1$  دقیقه) عکس توسط دوربین گرفته و ثبت

<sup>1</sup> One -side coated

<sup>2</sup> Two – side coated

شد. هر نمونه در ۳ تکرار مورد ارزیابی قرار گرفت. همان‌طور که پیش از این ذکر شد، سطوح دارای زاویه تماس بیشتر از ۹۰ درجه، به سطوح آب‌گریز اطلاق می‌شود [۱۷].

برای تعیین ویژگی‌های مقاومتی کاغذ، اندازه‌گیری مقاومت به کشش نمونه‌های کاغذ پوشش‌دهی شده و کنترل با دستگاه SANTAM مدل STM-20 و استاندارد TAPPI T 404 om-98، مقاومت به ترکیدن با دستگاه Regmed مدل BT21P- و استاندارد TAPPI T403 om-02 و مقاومت به پاره‌شدن با دستگاه Sanatazma و استاندارد TAPPI T414 om-04 انجام شد [۱۸]. سپس مقادیر شاخص برای هر یک از ویژگی‌های ذکر شده محاسبه شد.

## ۲-۴. آزمون‌های اندازه‌گیری و تعیین ویژگی‌های مقاومت به آتش

### ۲-۴-۱. آنالیز گرمی-حرارتی<sup>۱</sup>

آزمون تجزیه حرارتی کاغذ توسط دستگاه آنالیز حرارتی و طبق روش استاندارد ASTM E1131 انجام شد. دستگاه STA 449 F3 Jupiter از شرکت NETZSCH یک آنالیزور حرارتی همزمان<sup>۲</sup> (STA) است که امکان اندازه‌گیری تغییرات جرم (TGA) و اثرات حرارتی<sup>۳</sup> (DSC) را در محدوده دمایی ۱۵۰- تا ۲۴۰۰ درجه سانتی‌گراد فراهم می‌کند [۱۹].

### ۲-۴-۲. اشتعال‌پذیری عمودی<sup>۴</sup>

برای بررسی مقاومت به آتش کاغذ مطابق با روش TAPPI T461os-79 از آزمونگر عمودی مقاوم در برابر آتش استفاده شد. ابعاد نمونه‌های مورد ارزیابی در این آزمون (۱- طول نمونه، ۲۱۰ میلی‌متر، ۲- عرض نمونه، ۵۰ میلی‌متر، ۳- قطر مشعل بوزن، ۱۰ میلی‌متر، ۴- فاصله زیرلبه نمونه تا بالای مشعل، ۱۹ میلی‌متر، ۵- ارتفاع شعله، ۴۰ میلی‌متر، ۶- طول نگهدارنده کاغذ ۲۵۰ میلی‌متر و ۷- عرض نگهدارنده کاغذ ۷۰ میلی‌متر می‌باشد [۲۰].

### ۲-۴-۳. طیف‌سنجی زیر قرمز تبدیل فوریه<sup>۵</sup>

این بررسی‌ها به‌وسیله دستگاه FTIR مدل Cary 630 ساخت شرکت Agilent کشور ایالات متحده آمریکا با طول موج‌هایی در محدوده ۶۴۸ نانو متر الی ۴۰۰۰ نانومتر انجام شد.

## ۲-۵. روش آماری

تجزیه و تحلیل داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار آماری SPSS در طرح کاملاً تصادفی با آنالیز واریانس یک‌طرفه انجام شد و در نهایت، گروه‌بندی میانگین‌ها به کمک آزمون دانکن (در سطح ۵ درصد) صورت گرفت.

## ۳. یافته‌های پژوهش و بحث

### ۳-۱. ارزیابی ویژگی‌های فیزیکی

#### ۳-۱-۱. ضخامت کاغذ<sup>۶</sup>

ضخامت به‌عنوان یکی از پارامترهای مهم در بررسی خواص ساختاری کاغذ، تحت تأثیر مستقیم ترکیب پوششی و نحوه توزیع آن بر سطح قرار دارد. مطالعات نشان داده‌اند که اعمال پوشش‌های سطحی با استفاده از ترکیباتی مانند سیلیکات سدیم یا نانورس، می‌تواند منجر به افزایش چشمگیر ضخامت کاغذ شود [۱۱].

نتایج حاصل از آزمون تجزیه واریانس ضخامت کاغذ نمونه‌ها نشان داد که بین این مقادیر در سطح خطای آزمایش ۵ درصد،

<sup>۱</sup>Thermogravimetric Analysis

<sup>۲</sup>Simultaneous Thermal Analysis

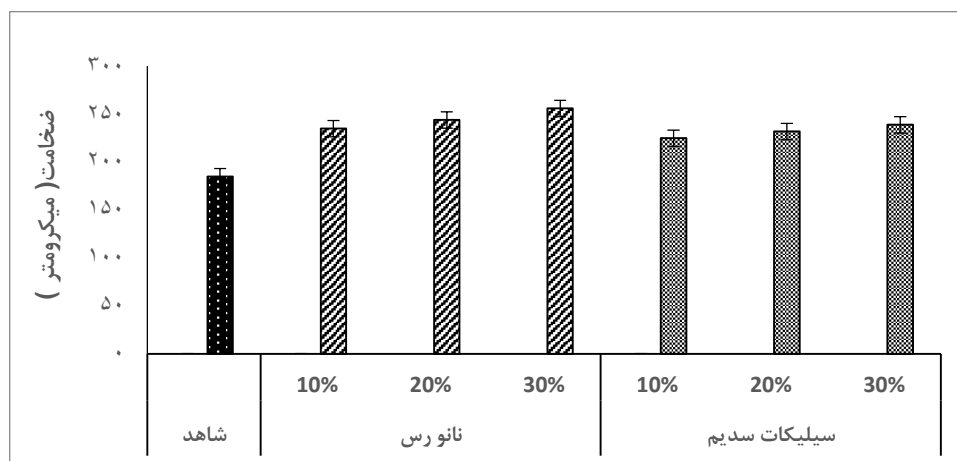
<sup>۳</sup>Differential Scanning Calorimetry

<sup>۴</sup>Vertical Flame

<sup>۵</sup>Fourier Transform Infrared Spectroscopy

<sup>۶</sup> Thickness

اختلاف معنی‌دار آماری وجود دارد (شکل ۲). در ارزیابی ویژگی‌های فیزیکی کاغذ، ضخامت، یکی از مهم‌ترین پارامترهایی است که تحت تأثیر مواد بازدارنده شعله قرار می‌گیرد. نتایج حاصل از پوشش‌دهی کاغذ با نانورس مونت‌موریلونیت نشان داد که با افزایش غلظت نانورس، ضخامت کاغذ به‌طور قابل‌توجهی افزایش می‌یابد. در تیمارهای مختلف، بیشترین ضخامت مربوط به غلظت ۳۰ درصد نانورس بود که حدود ۳۵ درصد بیشتر از نمونه شاهد ثبت شد. این افزایش ضخامت، ناشی از پر شدن منافذ سطحی کاغذ و ایجاد لایه‌های یکنواخت بر سطح آن است که توسط نانورس تقویت شده است [۲۱].



شکل ۲. تغییرات ضخامت کاغذ در مقادیر مختلف نانورس و سیلیکات سدیم به‌عنوان عامل پوشش‌دهنده

در مقابل، پوشش‌دهی کاغذ با سیلیکات سدیم نیز منجر به افزایش ضخامت شد، اما این افزایش به‌طور نسبی کمتر از نانورس بود. بیشترین ضخامت کاغذ در غلظت ۳۰ درصد سیلیکات سدیم، حدود ۲۹ درصد بیشتر از نمونه شاهد بود. در تیمارهای حاوی سیلیکات سدیم نیز افزایش ضخامت قابل‌توجهی گزارش شده که عمدتاً به‌دلیل واکنش بین سیلیکات با سطح سلولز و تشکیل فازهای ژل مانند در دمای خشک کردن است [۱۲].

### ۳-۱-۲. زاویه تماس قطره<sup>۱</sup>

زاویه تماس به‌عنوان شاخصی از میزان آب‌گریزی سطح شناخته می‌شود. هرچه این زاویه بیشتر باشد، تمایل سطح به جذب رطوبت کمتر است و مقاومت در برابر آب افزایش می‌یابد [۲۲]. نتایج حاصل از آزمون تجزیه واریانس زاویه تماس قطره نمونه‌ها نشان داد که بین این مقادیر در سطح خطای آزمایش ۵ درصد، اختلاف معنی‌دار آماری وجود دارد (شکل ۳). در آزمون زاویه تماس نمونه‌های پوشش‌یافته با نانورس، نتایج نشان داد که افزودن این نانوماده باعث افزایش معنی‌دار زاویه تماس شده است. در غلظت ۳۰ درصد نانورس، زاویه تماس نسبت به نمونه شاهد تا حدود ۲۷ درصد بیشتر شد. این افزایش به‌دلیل تشکیل لایه‌ای یکنواخت، کاهش قطبیت سطح و کاهش تخلخل مؤثر سطحی بوده است.

زاویه تماس، در تیمارهای حاوی سیلیکات سدیم به‌میزان ۳۸ درصد بیشتر از نمونه شاهد بوده که به‌دلیل ایجاد ساختارهای غیرقطبی و معدنی در سطح، زاویه تماس بهبود یافته و ویژگی آب‌گریزی سطح افزایش پیدا کرده است [۲].

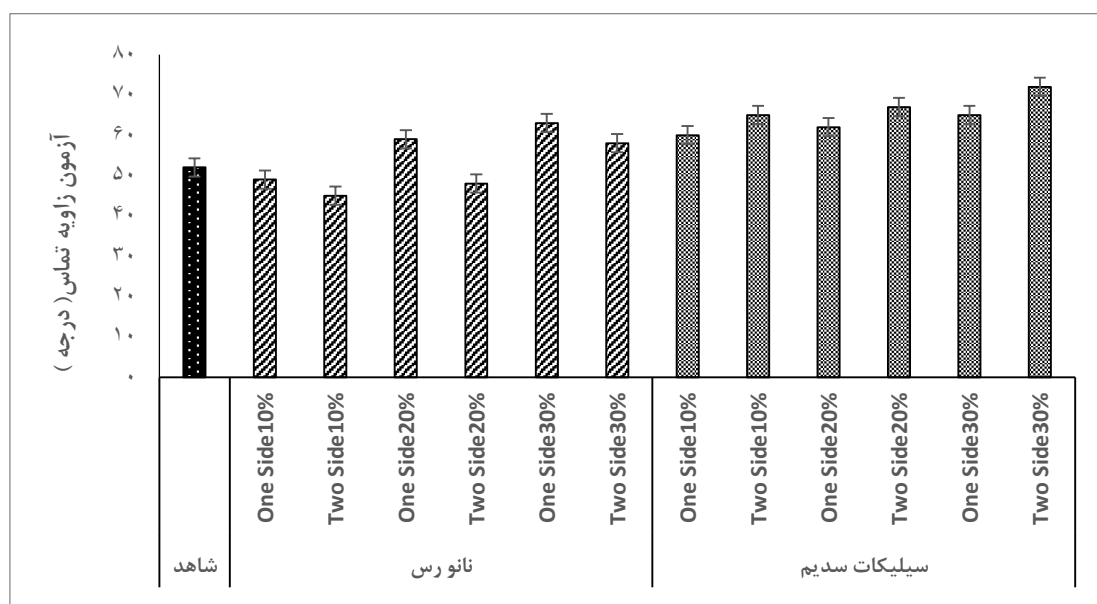
### ۳-۱-۳. جذب آب<sup>۲</sup>

در آزمون کاب، مقدار آبی که توسط سطح معینی از کاغذ در یک فاصله زمانی مشخص جذب می‌شود، اندازه‌گیری می‌گردد. توانایی کاغذ در جذب آب، یکی از شاخص‌های کلیدی برای ارزیابی نفوذپذیری و مقاومت در برابر رطوبت است. نتایج پژوهش‌ها حاکی از آن است که استفاده از نانورس و سیلیکات سدیم در فرمولاسیون پوششی، می‌تواند به‌طور مؤثری باعث کاهش

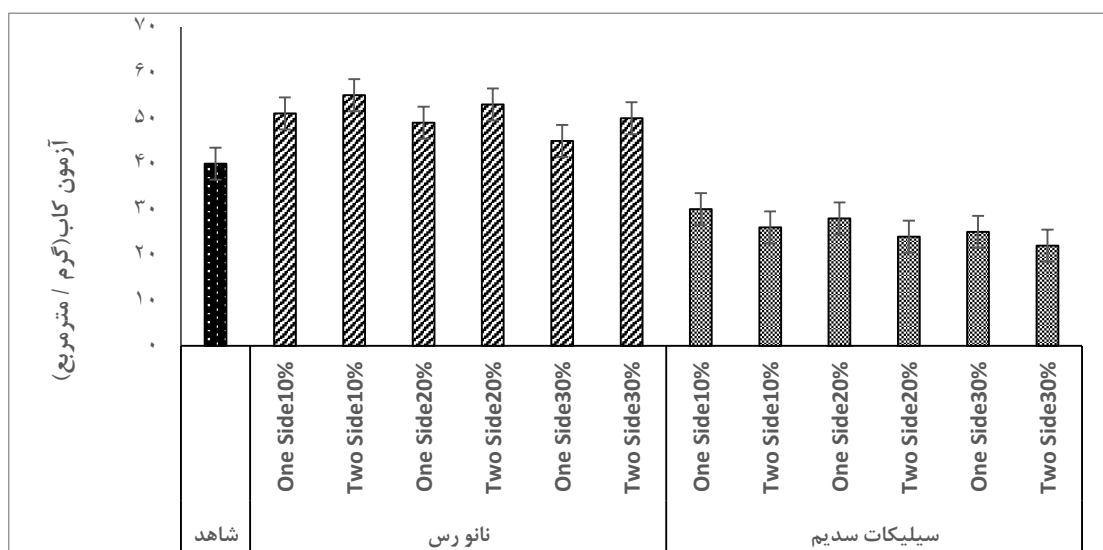
<sup>۱</sup> Contact Angle

<sup>۲</sup> Water Absorption / Cobb Value

جذب آب گردد [۱]. نتایج حاصل از آزمون تجزیه واریانس جذب آب نمونه‌ها نشان داد که بین این مقادیر در سطح ۵ درصد، اختلاف معنی‌دار آماری وجود دارد (شکل ۴).



شکل ۳. تغییرات مقدار زاویه تماس قطره در مقادیر مختلف نانوس و سیلیکات سدیم به‌عنوان عامل پوشش‌دهنده



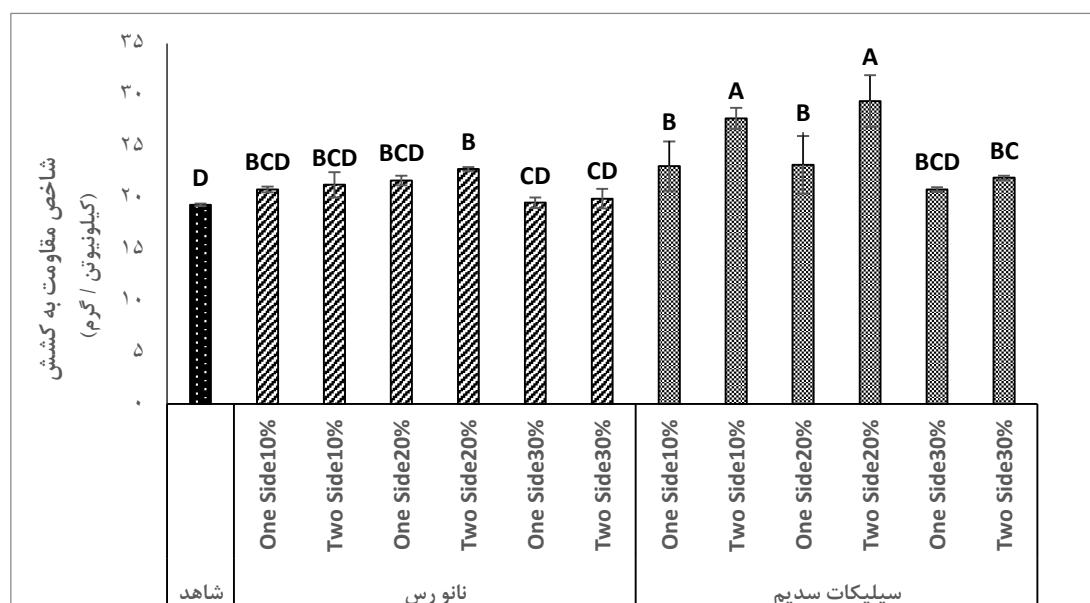
شکل ۴. تغییرات مقدار جذب آب در مقادیر مختلف نانوس و سیلیکات سدیم به‌عنوان عامل پوشش‌دهنده

در نمونه‌های پوشش‌یافته با نانوس، کاهش قابل توجهی در مقادیر جذب آب گزارش شده است، به‌گونه‌ای که در غلظت ۳۰ درصد، جذب آب تا حدود ۳۷ درصد نسبت به نمونه کنترل، کاهش یافت. این کاهش به دلیل کاهش تخلخل سطح، افزایش همپوشانی الیاف، و ایجاد پیوندهای پایدار بین نشاسته کاتیونی و نانوس در سطح کاغذ می‌باشد [۲۳]. در ترکیب‌هایی حاوی سیلیکات سدیم نیز اثر آب‌گریزی ناشی از تشکیل ساختارهای سیلیکاتی موجب کاهش جذب آب گردیده است. که این میزان به مقدار ۴۵ درصد نسبت به نمونه شاهد ارزیابی شده است. این افزایش به دلیل ایجاد لایه‌ای از ژل سیلیکاتی در هنگام خشک شدن، می‌تواند نفوذ مولکول‌های آب را محدود کند و ساختاری محافظ برای کاغذ ایجاد نماید [۹].

### ۳-۲. ارزیابی ویژگی‌های مقاومتی

#### ۳-۲-۱. مقاومت به کشش<sup>۱</sup>

مقاومت به کشش، یکی از مهم‌ترین شاخص‌های مکانیکی در تعیین کیفیت کاغذ است که بیانگر توانایی آن در تحمل نیروی کششی پیش از پارگی می‌باشد. افزایش این شاخص ارتباط مستقیمی با انسجام ساختار الیاف و کیفیت پیوندهای بین‌الیافی دارد [۱۰]. نتایج حاصل از تیمار کاغذ با نانورس نشان داد که با افزایش غلظت پوشش، شاخص مقاومت به کشش افزایش می‌یابد، به‌طوری‌که در غلظت ۲۰ درصد، حدود ۱۸ درصد نسبت به نمونه شاهد شاهد بیشتر بود. این افزایش عمدتاً به دلیل تشکیل پیوندهای هیدروژنی بین لایه پوشش و الیاف سلولزی و همچنین افزایش سطح تماس مؤثر بین ذرات است. این نتیجه مشابه با پژوهش انجام‌شده توسط Castvan و همکاران (۲۰۱۵) است [۱۶] (شکل ۵).



شکل ۵. تغییرات شاخص مقاومت به کشش در مقادیر مختلف نانورس و سیلیکات سدیم به‌عنوان عامل پوشش‌دهنده

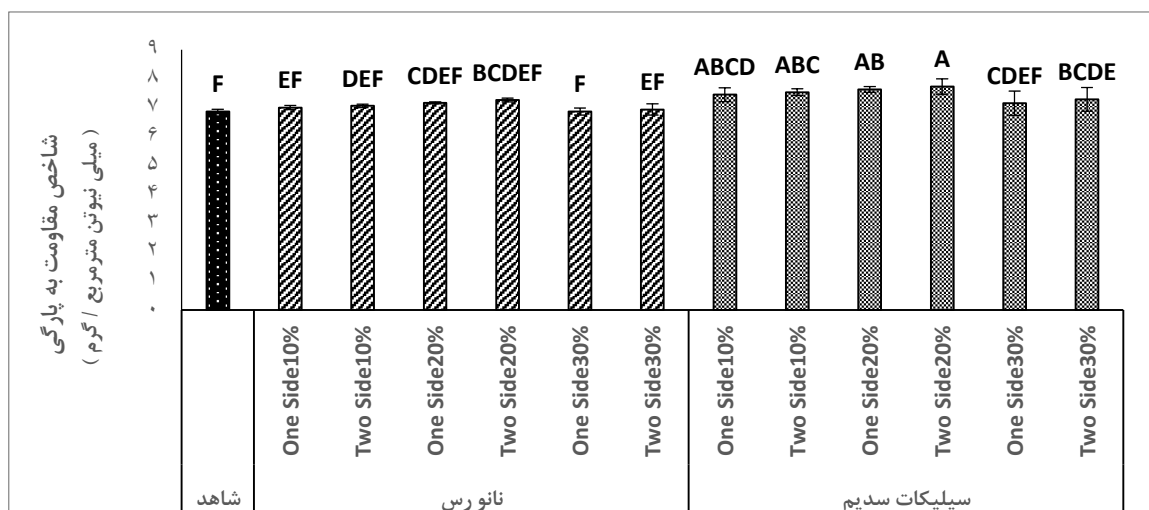
در نمونه‌های تیمار شده با سیلیکات سدیم نیز عملکرد مشابهی مشاهده شد. نتایج حاصل از تیمار کاغذ با سیلیکات سدیم نشان داد که با افزایش غلظت پوشش، شاخص مقاومت به کشش افزایش می‌یابد، به‌طوری‌که در غلظت ۲۰ درصد، حدود ۲۶ درصد نسبت به نمونه شاهد بیشتر بود که دلیل آن را می‌توان در تشکیل ساختارهای غیرآلی در سطح، پرشدن فضاهای خالی بین الیاف و افزایش چسبندگی داخلی ساختار نسبت داد [۱۲].

#### ۳-۲-۲. مقاومت به پاره شدن<sup>۲</sup>

شاخص پاره‌شدن نشان‌دهنده توان کاغذ در برابر گسترش یک بریدگی یا شکاف است و بیشتر به طول الیاف و درجه اتصال بین آنها وابسته می‌باشد [۱]. در این مطالعه، پوشش‌دهی کاغذ با نانورس باعث افزایش معنی‌دار مقاومت به پاره شدن شد. در تیمار ۲۰ درصد نانورس، افزایش مقاومت در مقایسه با نمونه کنترل تا حدود ۶ درصد گزارش شده است. این افزایش ناشی از افزایش سطح ویژه، بهبود همبستگی بین الیاف و ایجاد پل‌های بین‌ذره‌ای توسط نشاسته کاتیونی و نانورس است [۹]. در نمونه‌هایی که از سیلیکات سدیم استفاده شده، نیز مقاومت به پارگی به میزان ۱۳ درصد افزایش یافت، که می‌تواند به تقویت ساختار داخلی کاغذ به دلیل رسوب لایه‌های معدنی در نواحی ضعیف ساختار نسبت داده شود. این نتیجه مشابه با پژوهش انجام‌شده توسط Castvan و همکاران (۲۰۱۵) است [۱۶] (شکل ۶).

<sup>۱</sup> Tensile Strength

<sup>۲</sup> Tear Strength

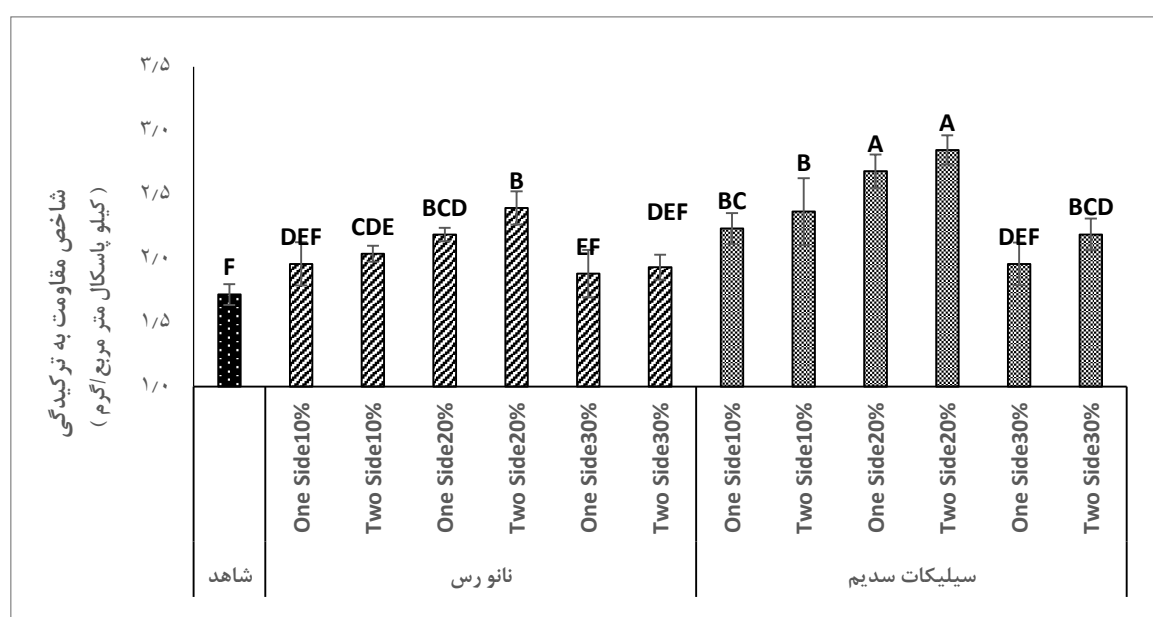


شکل ۶. تغییرات شخص مقاومت به پاره شدن در مقادیر مختلف نانو رس و سیلیکات سدیم به عنوان عامل پوشش دهنده

### ۳-۲-۳. مقاومت به ترک‌کندن<sup>۱</sup>

مقاومت به ترک‌کندن، توان کاغذ در برابر فشار یکنواخت اعمال شده بر سطح آن است. این ویژگی معمولاً به همبستگی بین مقاومت به کشش و انسجام لایه‌ای بستگی دارد [۲۲]. در پژوهش حاضر، تمامی نمونه‌های پوشش‌یافته با نانو رس نسبت به نمونه شاهد، افزایش قابل توجهی در مقاومت به ترک‌کندن نشان دادند. در غلظت ۲۰ درصد، این شاخص تا حدود ۳۵ درصد بیشتر از نمونه کنترل گزارش شد. دلیل این امر را می‌توان در افزایش ضخامت، کاهش تخلخل، و افزایش اتصالات میکروسکوپی بین ذرات پوشش و الیاف جستجو کرد.

در تیمارهای حاوی سیلیکات سدیم نیز مشابه همین روند مشاهده شد و باعث افزایش ۶۴ درصدی نسبت به نمونه شاهد گردید، که ناشی از پایداری حرارتی بیشتر و چسبندگی مناسب لایه‌های پوششی در برابر فشار است. این نتیجه مشابه با پژوهش انجام‌شده توسط Basak و همکاران، ۲۰۱۵ است [۲] (شکل ۷).



شکل ۷. تغییرات شخص مقاومت به ترک‌کندن در مقادیر مختلف نانو رس و سیلیکات سدیم به عنوان عامل پوشش دهنده

<sup>۱</sup> Burst Strength

جدول ۳ نتایج حاصل از تجزیه واریانس آزمون ویژگی‌های مکانیکی (مقاومت به کشش، مقاومت به پاره شدن و مقاومت به ترک‌کندن) کاغذ پوشش داده شده با نانورس مونت‌موریلونیت و سیلیکات سدیم را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌گردد، بین مقادیر مقاومت نمونه‌های شاهد با نمونه‌های پوشش‌دهی شده، اختلاف معنی‌دار آماری در سطح ۵ درصد مشاهده گردید. همچنین نتایج آزمون دانکن نشان داد که افزایش مقاومت ناشی از افزایش مقدار غلظت ماده پوشش در مقایسه با نمونه شاهد قابل ملاحظه بود.

**جدول ۳.** نتایج آنالیز واریانس یک‌طرفه ویژگی‌های کاغذهای حاصل از خمیر کاغذ باگاس تیمار شده با نانورس مونت‌موریلونیت و سیلیکات سدیم در حضور نشاسته کاتیونی

| مشخصه   | مقاومت به کشش |        | مقاومت به پاره شدن |       | مقاومت به ترک‌کندن |        |
|---------|---------------|--------|--------------------|-------|--------------------|--------|
|         | Sig           | F      | Sig                | F     | Sig                | F      |
| تیمارها | ۰/۰۰۰         | ۱۴/۸۰۵ | ۰/۰۰۰              | ۵/۶۱۵ | ۰/۰۰۰              | ۱۵/۹۰۰ |

\*در سطح ۵ درصد معنی‌دار است.

### ۳-۳. اندازه‌گیری و تعیین ویژگی‌های مقاومت به آتش کاغذ

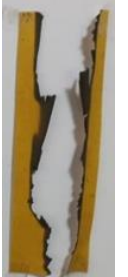
#### ۳-۳-۱. اشتعال‌پذیری عمودی کاغذ

نتایج مربوط به این آزمایش‌ها در جدول ۴ و شکل ۸ نشان داده شده است. پس از مشتعل شدن نمونه از مرکز لبه پایینی، آتش به سمت بالا گسترش یافت و رفتار نمونه‌های مشتعل شده مورد بررسی قرار گرفت. شکل ۸ جهت و شکل آتش را در طول سوختن نمونه نشان می‌دهد.

مطابق جدول ۴ و شکل ۸، کاغذهای پوشش‌دهی شده به صورت پوشش‌های یک‌طرفه (کد ۱۰ درصد OSC، ۲۰ درصد OSC، ۳۰ درصد OSC) و دوطرفه (کد ۱۰ درصد TSC، ۲۰ درصد TSC، ۳۰ درصد TSC) با نانورس مونت‌موریلونیت و سیلیکات سدیم نسبت به نمونه کنترل، کندسوزی خوبی نشان دادند. بررسی نتایج نشان داد که تیمارهای مختلف پوشش‌دهی با سیلیکات سدیم، تأثیر مثبتی بر کاهش اشتعال‌پذیری عمودی کاغذ داشته‌اند. در کاغذهای تیمار شده با سیلیکات سدیم، زمان سوختن و طول زغال باقیمانده، بهبود قابل توجهی داشت و رفتار خودخاموش‌شوندگی مشاهده شد، به‌طوری که شعله، پس از حذف منبع حرارت متوقف شد.

**جدول ۴.** نتایج آزمایش اشتعال‌پذیری عمودی نمونه‌های کاغذ پوشش‌داده شده و نمونه کنترل

| نمونه                                | غلظت مواد (درصد) | زمان اشتعال (ثانیه) | زمان سوختن (ثانیه) | طول سوختن (میلی‌متر) | طول زغال (میلی‌متر) | زمان پس شعله (ثانیه) | نتیجه       |
|--------------------------------------|------------------|---------------------|--------------------|----------------------|---------------------|----------------------|-------------|
| شاهد                                 | -----            | ۱۲                  | ۲                  | ۲۱۰                  | بدون باقی‌مانده     | ۰                    | کاملاً سوخت |
| پوشش یک‌طرفه با نانورس ۱۰ درصد       | ۱۰               | ۱۲                  | ۱۴                 | ۲۱۰                  | بدون باقی‌مانده     | ۲                    | کاملاً سوخت |
| پوشش یک‌طرفه با نانورس ۲۰ درصد       | ۲۰               | ۱۲                  | ۱۸                 | ۲۱۰                  | بدون باقی‌مانده     | ۶                    | کاملاً سوخت |
| پوشش یک‌طرفه با نانورس ۳۰ درصد       | ۳۰               | ۱۲                  | ۲۴                 | ۲۱۰                  | بدون باقی‌مانده     | ۱۲                   | کاملاً سوخت |
| پوشش دوطرفه با نانورس ۱۰ درصد        | ۱۰               | ۱۲                  | ۱۷                 | ۲۱۰                  | بدون باقی‌مانده     | ۵                    | کاملاً سوخت |
| پوشش دوطرفه با نانورس ۲۰ درصد        | ۲۰               | ۱۲                  | ۲۲                 | ۲۱۰                  | بدون باقی‌مانده     | ۱۰                   | کاملاً سوخت |
| پوشش دوطرفه با نانورس ۳۰ درصد        | ۳۰               | ۱۲                  | ۳۰                 | ۲۱۰                  | بدون باقی‌مانده     | ۱۸                   | کاملاً سوخت |
| پوشش یک‌طرفه با سیلیکات سدیم ۱۰ درصد | ۱۰               | ۱۲                  | ۱۲                 | ۱۴۰                  | ۹۱                  | ۰                    | تا حدی سوخت |
| پوشش یک‌طرفه با سیلیکات سدیم ۲۰ درصد | ۲۰               | ۱۲                  | ۱۰                 | ۹۳                   | ۶۹                  | ۰                    | تا حدی سوخت |
| پوشش یک‌طرفه با سیلیکات سدیم ۳۰ درصد | ۳۰               | ۱۲                  | ۷                  | ۷۹                   | ۵۵                  | ۰                    | نسوخت       |
| پوشش دوطرفه با سیلیکات سدیم ۱۰ درصد  | ۱۰               | ۱۲                  | ۹                  | ۹۶                   | ۷۲                  | ۰                    | تا حدی سوخت |
| پوشش دو طرفه با سیلیکات سدیم ۲۰ درصد | ۲۰               | ۱۲                  | ۷                  | ۷۶                   | ۶۲                  | ۰                    | تا حدی سوخت |
| پوشش دو طرفه با سیلیکات سدیم ۳۰ درصد | ۳۰               | ۱۲                  | ۴                  | ۶۴                   | ۴۸                  | ۰                    | نسوخت       |

| شاهد         | پوشش یک‌طرفه                                                                        |                                                                                     |                                                                                   | پوشش دو طرفه                                                                      |                                                                                   |                                                                                   | نمونه رس مورب                                                                     |
|--------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|
|              |  |  |  |  |  |  |  |
| سیلیکات سدیم |  |  |  |  |  |  |  |
|              | بدون تیمار                                                                          | غلظت ۱۰ درصد                                                                        | غلظت ۲۰ درصد                                                                      | غلظت ۳۰ درصد                                                                      | غلظت ۱۰ درصد                                                                      | غلظت ۲۰ درصد                                                                      | غلظت ۳۰ درصد                                                                      |

شکل ۸. تصاویر پس از آزمایش اشتعال‌پذیری عمودی نمونه‌های کاغذ پوشش‌داده شده و نمونه کنترل

در تیمارهای حاوی نانو رس نیز اشتعال‌پذیری کاهش یافت، اما مقدار آن در مقایسه با سیلیکات سدیم کمتر بود. در غلظت‌های بالاتر نانو رس، زغال ایجاد شده یکنواخت نبود و سبب کاهش اثر بخشی آن در جلوگیری از انتشار شعله شد. با ایجاد لایه محافظ توسط سیلیکات سدیم، دسترسی اکسیژن به سطح کاغذ محدود می‌شود که این امر باعث کاهش نرخ سوختن می‌گردد. نتایج پژوهش Di Blasi و همکاران (۲۰۰۷) نشان داد که این لایه‌های محافظ می‌توانند به عنوان موانع فیزیکی و شیمیایی عمل کرده و از گسترش شعله و انتقال حرارت به بخش‌های داخلی بافت کاغذ جلوگیری کنند [۲۴]. در مجموع، سیلیکات سدیم در مقایسه با نانو رس عملکرد بهتری در کاهش اشتعال‌پذیری کاغذ و افزایش پایداری حرارتی نشان داد. در واقع بازدارنده آتش، پایداری کاغذ در مقابل حرارت و شعله را ایجاد می‌کند که این اصلاح می‌تواند کاغذ حاصل از خمیر باگاس را با راندمان بازدارنده شعله بالا، بدون انتشار هالوژن یا فرمالدئید ایجاد کند.

### ۳-۳-۲. وزن سنجی حرارتی

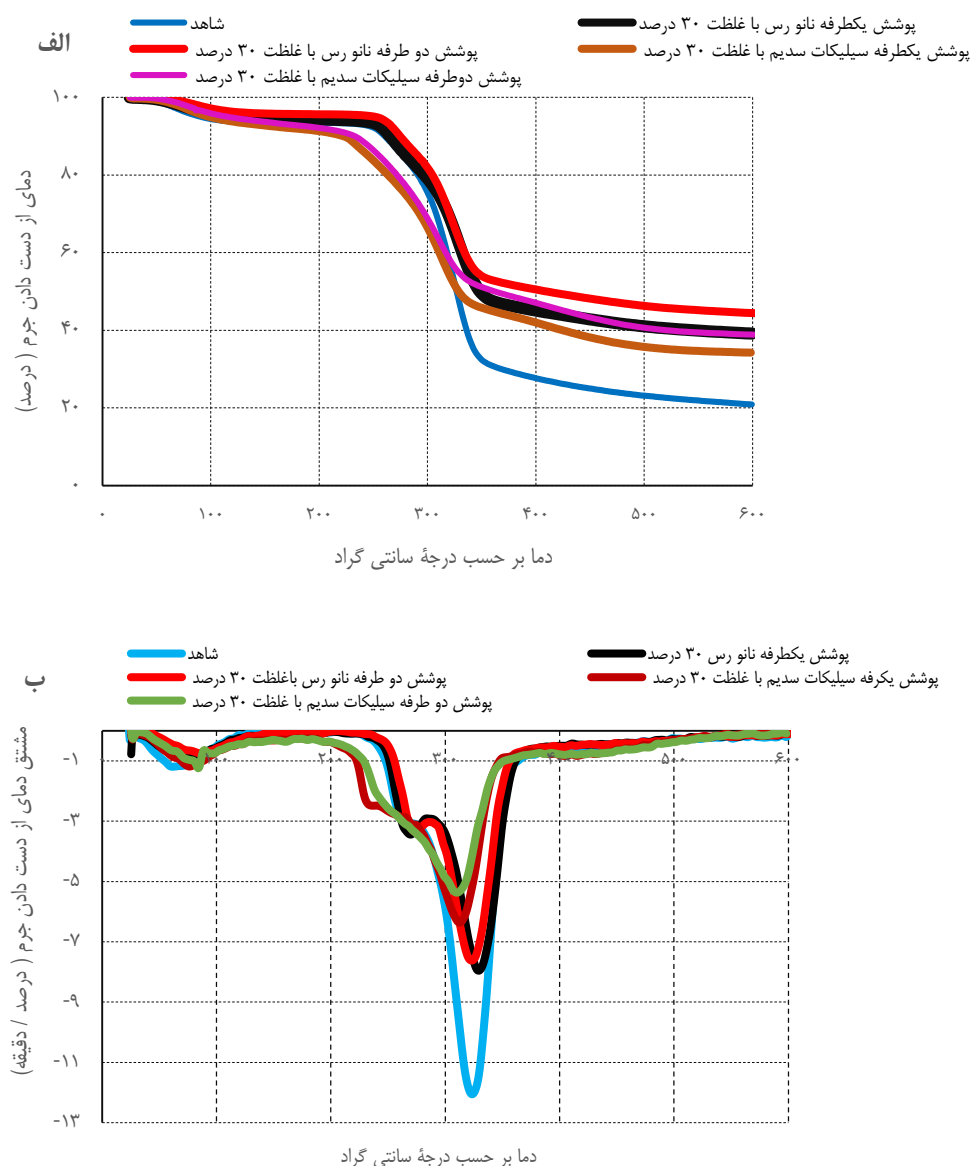
پایداری حرارتی نمونه‌های کاغذ کنترل و پوشش‌دهی شده توسط آزمون TG در اتمسفر نیتروژن مورد ارزیابی قرار گرفت. منحنی‌های TG و DTG در شکل ۹ به ترتیب با حروف a و b مشخص شده است. در جدول ۵، داده‌های TG و DTG، شامل دمای از دست دادن جرم ۱۰ درصد وزنی یا دمای تجزیه برای کاهش وزن (۱۰ درصد  $T_{Oneset}$ )<sup>۱</sup>، دما در حداکثر نرخ کاهش جرمی یا دما در حداکثر سرعت تجزیه ( $T_{max}$ )<sup>۲</sup> و بازده زغال در ۶۰۰ درجه سانتی گراد (CY۶۰۰) نشان داده شده است.

آزمون وزن سنجی حرارتی برای بررسی رفتار حرارتی و میزان زغال باقیمانده در کاغذهای اصلاح‌شده و نمونه کنترل انجام شد. نتایج نشان داد که در نمونه‌های تیمار شده با سیلیکات سدیم در مقایسه با نمونه کنترل، میزان باقی‌مانده زغال در دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد برای تیمارهای حاوی سیلیکات به طور قابل توجهی افزایش یافت (از حدود ۱۰ درصد در شاهد به بیش از ۲۵ درصد در نمونه‌های تیمار شده). این بهبود ناشی از تشکیل ساختارهای سیلیکاتی پایدار در دماهای بالا است که از گسترش واکنش‌های حرارتی جلوگیری می‌کند [۱۲]. سیلیکات سدیم با ایجاد لایه‌ای از ترکیبات سرمایی در حین فرآیند تخریب، انتشار گازهای قابل اشتعال را محدود کرده و سرعت تخریب حرارتی کاغذ را کاهش می‌دهد [۲]. نمونه‌های تیمار شده با سیلیکات سدیم در غلظت ۳۰ درصد بهترین

<sup>1</sup> Temperature Oneset<sup>10</sup>

<sup>2</sup> Temperature max

عملکرد را نشان دادند، به‌طوری‌که افزایش محسوس در دمای تجزیه اولیه (T10 درصد) و دمای بیشینه نرخ کاهش وزن ( $T_{max}$ ) نشان دادند. این نتیجه مشابه با پژوهش انجام‌شده توسط Tavakoli و همکاران (۲۰۲۱) است [۱۰]. نتایج پژوهش Ghiyasiyan-Arani و همکاران (۲۰۱۶) نشان داد که این رفتار به دلیل تشکیل لایه‌ای از زغال متراکم است که از انتقال حرارت به لایه‌های زیرین جلوگیری کرده و سوختن کاغذ را کند می‌کند [۲۵]. نمونه‌های حاوی نانورس نیز رفتار حرارتی مشابهی داشتند، اما مقدار زغال باقیمانده در آنها کمتر از سیلیکات سدیم بود. میزان زغال باقیمانده در ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد در نمونه‌های پوشش‌یافته با نانورس، بین ۲۰ تا ۲۴ درصد اندازه‌گیری شد که نسبت به نمونه‌های بدون پوشش، افزایش قابل‌ملاحظه‌ای داشت. مکانیسم عملکرد نانورس مبتنی بر ایجاد سد فیزیکی در سطح، کاهش نفوذ اکسیژن و هدایت مسیر تخریب به‌سوی تشکیل زغال کربنی پایدار است. در مجموع، آزمون TGA نشان داد که سیلیکات سدیم در افزایش پایداری حرارتی و بازده زغال نسبت به نانورس عملکرد بهتری دارد و این ویژگی به کاهش اشتعال‌پذیری کمک می‌کند این نتیجه مشابه پژوهش انجام شده است [۲۶-۲۹].



شکل ۹. منحنی‌های TGA و DTG نمونه‌های کاغذ پوشش‌دهی شده و کاغذ کنترل

<sup>1</sup> Thermogravimetric Analysis

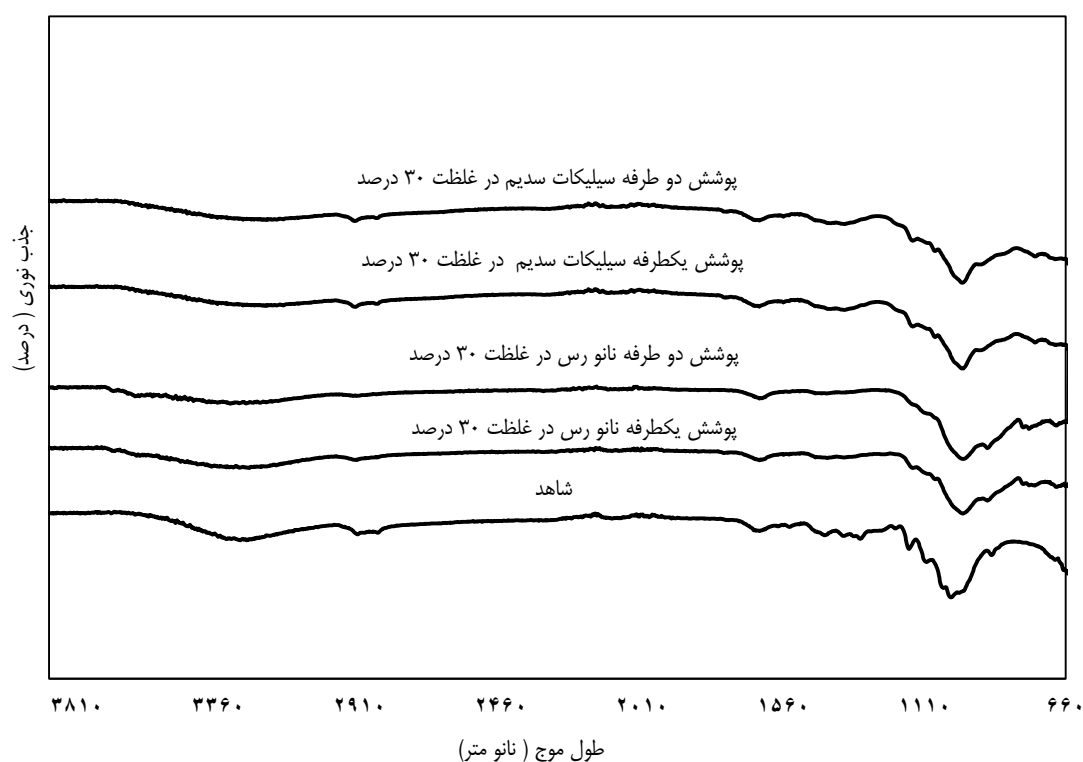
<sup>2</sup> Derivative Thermogravimetry

جدول ۵: داده‌های TGA نمونه‌های کاغذ با پوشش‌دهی یک‌طرفه و دو طرفه و کاغذ کنترل

| نمونه‌ها                            | دمای از دست دادن جرم ۱۰ درصد وزنی<br>(درجه سانتی گراد) | دما در حداکثر سرعت تجزیه<br>(درجه سانتی گراد) | بازده زغال<br>(درصد) |
|-------------------------------------|--------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|----------------------|
| شاهد                                | ۲۴۱/۱۷۰                                                | ۳۴۲                                           | ۲۰/۸۲۰               |
| طرفه با نانو رس ۳۰ درصدپوشش یک      | ۲۵۸/۳۰۷                                                | ۳۵۴/۱۹۷                                       | ۳۹/۱۹                |
| پوشش دوطرفه با نانو رس ۳۰ درصد      | ۲۷۲/۱۷۹                                                | ۳۵۳/۱۱۷                                       | ۴۳/۴۶                |
| طرفه با سیلیکات سدیم ۳۰ درصدپوشش یک | ۲۳۲/۳۰۷                                                | ۳۳۴/۲۹۸                                       | ۳۴/۲۳۵               |
| پوشش دوطرفه با سیلیکات سدیم ۳۰ درصد | ۲۶۴/۱۷۹                                                | ۳۴۸/۱۸۰                                       | ۴۴/۵۰۴               |

### ۳-۳-۳. طیف‌سنجی فروسرخ با تبدیل فوریه

برای مطالعه بیشتر سازوکار بازدارندگی شعله در فاز متراکم، FTIR کاغذهای پوشش‌داده شده و باقیمانده‌های زغال مورد بررسی قرار گرفت باقیمانده زغال پوشش یک‌طرفه با کد (۳۰ درصد) OSC و دوطرفه با کد (۳۰ درصد) TSC در شکل ۱۰ نشان داده شده است.



شکل ۱۰. طیف FTIR نمونه‌های کاغذ پوشش‌داده شده و نمونه کنترل

در نمونه‌های تیمار شده با سیلیکات سدیم، نتایج آزمون FTIR نشان‌دهنده تغییرات قابل توجهی در ساختار شیمیایی سطح کاغذ بود. مهمترین مشاهدات عبارت بودند از: افزایش شدت باندهای جذب در ناحیه ۱۱۰۰-۱۰۰۰ نانومتر که مربوط به ارتعاشات کششی پیوندهای Si-O-Si و Si-O-C است [۱۲]. کاهش شدت باندهای گروه‌های هیدروکسیل (OH-) در محدوده ۳۵۰۰-۳۳۰۰ نانومتر بیانگر کاهش گروه‌های قطبی و بهبود خاصیت آب‌گریزی سطح می‌باشد. ظاهر شدن باند جدید در حوالی ۹۰۰-۸۰۰ نانومتر مربوط به ساختارهای سیلیکاتی متراکم است [۲]. وجود سیلیکات سدیم روی سطح کاغذ باعث ایجاد پیوندهای سیلیکاتی جدید

شده است و ساختار سلولزی اولیه را با ایجاد پوشش معدنی اصلاح کرده است. نتایج آزمون FTIR نمونه‌های پوشش‌یافته با نانورس نیز تغییراتی را نسبت به نمونه کنترل نشان داد. افزایش شدت باند در ناحیه ۱۰۴۰-۱۰۲۰ نانومتر مربوط به ارتعاش کششی پیوند Si-O-Si در ساختار نانورس است. کاهش شدت باندهای مربوط به گروه‌های OH- در ناحیه ۳۴۰۰ نانومتر نشان‌دهنده کاهش جذب آب سطحی کاغذ است. افزایش شدت باندهای سیلیکاتی و کاهش گروه‌های قطبی در نمونه‌های پوشش‌یافته با نانورس، نشان‌دهنده اصلاح سطح و بهبود مقاومت کاغذ در برابر رطوبت و حرارت است. سیلیکات سدیم نسبت به نانورس در اصلاح شیمیایی سطح کاغذ و ایجاد پوشش غیرقطبی قوی‌تر عمل کرده است. این موضوع از شدت بالاتر باندهای سیلیکاتی و کاهش بیشتر باندهای هیدروکسیلی مشخص می‌شود. نانورس مونت‌موریلونیت بیشتر با ایجاد سد فیزیکی و تقویت ساختار رس-سلولز باعث بهبود نسبی خواص فیزیکی سطح شده است

#### ۴. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این پژوهش، بهبود خواص فیزیکی، مکانیکی و حرارتی کاغذ خمیر سودا با گاس با استفاده از دو نوع تیمار پوششی شامل سیلیکات سدیم و نانورس مونت‌موریلونیت بررسی شد. نتایج نشان داد که هر دو ماده، تأثیرات قابل توجهی در بهبود ویژگی‌های مورد مطالعه داشتند، اما تفاوت‌هایی در نحوه و میزان اثرگذاری آنها مشاهده گردید. افزایش ضخامت کاغذ در نمونه‌های تیمار شده، ناشی از پر شدن فضای خالی بین الیاف و ایجاد لایه‌های متراکم‌تر بر سطح کاغذ بود. این افزایش ضخامت در هر دو تیمار مشاهده شد، اما در تیمار سیلیکات سدیم میزان بیشتری داشت که به دلیل واکنش‌های معدنی و تشکیل ساختارهای سیلیکاتی متراکم‌تر بود. آزمون‌های جذب آب و زاویه تماس نشان دادند که تیمار با هر دو ماده، موجب بهبود آب‌گریزی سطح کاغذ گردید. با این حال، سیلیکات سدیم در کاهش جذب آب و افزایش زاویه تماس عملکرد بهتری داشت. این بهبود به دلیل تشکیل پوشش معدنی غیرقطبی و کاهش گروه‌های هیدروکسیل سطحی تأیید شد که توسط نتایج FTIR نیز پشتیبانی گردید. از نظر ویژگی‌های مقاومتی، هر دو تیمار، موجب بهبود مقاومت به کشش، ترکیدن و پاره‌شدن شدند. تیمار با نانورس مونت‌موریلونیت نسبت به سیلیکات سدیم در بهبود برخی ویژگی‌های مکانیکی مانند مقاومت به پارگی، عملکرد نسبتاً بهتری داشت که می‌تواند ناشی از افزایش پیوندهای فیزیکی بین الیاف و لایه نانورس باشد. ارزیابی اشتعال‌پذیری عمودی نشان داد که هر دو ماده موجب کاهش زمان سوختن و افزایش طول زغال شدند. با این حال، نانورس در ایجاد لایه محافظ فیزیکی مؤثرتر عمل کرده و در کنترل توسعه شعله کارآمدتر ظاهر شد. از سوی دیگر، سیلیکات سدیم با تشکیل ساختار سرامیکی حرارتی در دمای بالا، پایداری بیشتری در برابر تخریب حرارتی از خود نشان داد. آزمون وزن‌سنجی حرارتی نیز تأیید کرد که تیمار با سیلیکات سدیم موجب افزایش چشمگیر دمای آغاز تخریب و درصد باقیمانده زغال نسبت به تیمار با نانورس شد. این نتایج نشان می‌دهد که سیلیکات سدیم در بهبود مقاومت حرارتی کاغذ مؤثرتر از نانورس عمل کرده است.

به‌طور کلی، می‌توان نتیجه گرفت که سیلیکات سدیم در افزایش مقاومت حرارتی، ایجاد پوشش معدنی مقاوم و بهبود آب‌گریزی سطح، عملکرد بهتری دارد. نانورس مونت‌موریلونیت در تقویت ویژگی‌های مکانیکی مانند مقاومت به پارگی و ایجاد لایه محافظ فیزیکی در برابر شعله مؤثرتر عمل کرده است.

#### ۵- منابع

- [1] Kazuaki, N., Megumi, A. & Takayuki, T. (2018). Lignocellulose nanofibers prepared by ionic liquid pretreatment and subsequent mechanical nanofibrillation of bagasse powder: application to esterified bagasse/polypropylene composites. *Carbohydrate Polymers*, 182(8), 8-14.
- [2] Basak, S., Samanta, K.K., Chattopadhyay, S.K. & Narkar, R. (2015). Thermally stable cellulosic paper made using banana pseudostem sap a wasted by-product. *Cellulose*, 22(4), 2767-2776.
- [3] Zaheri, S. & Asadpur, G. (2019). Feasibility study of using different types of bio-polymer coatings on paper packaging materials. *Packaging Science & Art*, 10(38), 18-27. (In Persian)

- [4] Sandberg, D., Kutnar, A. & Mantanis, G. (2017). Wood modification technologies - A review. *iForest*, 10(6), 895–908.
- [5] Whitney, R.S. (2009). System and Method for Programming a Weighing Scale Using a Key Signal to Enter a Programming Mode. *United States Patent*, 1(12), 14.
- [6] Tutus, A., Cicekler, M. & Deniz, I. (2012). Using of burnt red pine wood for pulp and paper production (Turkish, Abstract in English). *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, 90-95.
- [7] Kollman, F.F.P. & Côté, W.A. (1968). Principles of wood science and technology: solid wood: Allen & Unwin.
- [8] Browne, F. (1958) 'Theories of the combustion of wood and its control', *United States Department of Agriculture Forest Service Report*, 2136, 1-72.
- [9] Li, P., Zhang, Y., Zuo, Y., Lu, J., Yuan, G. & Wu, Y. (2020) 'Preparation and characterization of sodium silicate impregnated Chinese fir wood with high strength, water resistance, flame retardant and smoke suppression', *Journal of Materials Research and Technology*, 9(1), 1043-1053.
- [10] Tavakoli, M., Ghasemian, A., Dehghani-Firouzabadi, M.R., & Mazela, B. (2021). Cellulose and its nano-derivatives as a water-repellent and fire-resistant surface: a review. *Materials*, 15(1), 82.
- [11] Xie, J., Xu, J., Cheng, Z., Chen, J., Zhang, Z., Chen, T., Yang, R. & Sheng, J. (2020). Facile synthesis of fluorine-free cellulosic paper with excellent oil and grease resistance. *Cellulose*, 27(11), 7009–7022.
- [12] Dong, L.Y. & Zhu, Y.J. (2017). A new kind of fireproof flexible inorganic nanocomposite paper and its application to the protection layer in flame-retardant fiber-optic cables. *Chemistry - A European Journal*, 23(19), 4597-4604.
- [13] Weil, E.D. & Levchik, S.V. (eds) (2015) *Flame Retardants for Plastics and Textiles: Practical Applications*. Munich: Hanser, 303-333.
- [14] Laoutid, F., Bonnaud, L., Alexandre, M., Lopez-Cuesta, J.M. & Dubois, P. (2009). New prospects in *flame retardant polymer materials*: From fundamentals to nanocomposites. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 63(3), 100-125.
- [15] Kiliaris, P. & Papaspyrides, C. (2010). Polymer/layered silicate (clay) nanocomposites: An overview of flame retardancy. *Progress in Polymer Science*, 35(7), 902-958.
- [16] ASTM E1131-20. Standard Test Method for Compositional Analysis by Thermogravimetry.
- [17] TAPPI T461OS-79. Testing procedure using YG815B vertical fabric flame-retardant tester (Nantong Sansi Electromechanical Science & Technology Co. Ltd. China).
- [18] Castvan, S., Lazarevic, D., Stojanovic, P., Ivkovic, Z., Petrovic, R. & Kovic, J. (2015). Improvement of the mechanical properties of paper by starch coatings modified with sepiolite nanoparticles. *Starch*, 67(3–4), 373-380.
- [19] Rezayati Charani, P. & Moradian, M. H. (2019). Utilization of cellulose nanofibers and cationic polymers to improve breaking length of paper. *Journal of Cellulose Chemistry and Technology*, 53(7-8), 767–774.
- [20] Barati Darband, G., Aliofkhazraei, M., Khorsand, S., Sokhanvar, S. & Kaboli, A. (2020). Science and engineering of superhydrophobic surfaces: Review of corrosion resistance, chemical and mechanical. *Arabian Journal of Chemistry*, 13(1), 1763-1802.
- [21] Mortazavi, F., Resalati, H., Rasouli, S. & Asadpour, G. (2021). Investigation of industrial paper coating with recycled kaolin. *Journal of Color Science and Technology*, 15(2), 117-129. (In Persian)
- [22] Weil, E. D. & Levchik, S.V. (2015). Flame retardants for plastics and textiles: Practical applications. Hanser Germany.
- [23] Ashley, R.H., Matthew, R., Gillian, A.H. & Elsie, E.G. (2013). Clays and tetracyclines: Composite formulation and antibacterial properties. XV International Clay Conference.
- [24] Di Blasi, C., Branca, C. & Galgano, A. (2007). Effects of diammonium phosphate on the yields and composition of products from wood pyrolysis. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 46(2), 430–438.
- [25] Ghiyasiyan-Arani, M., Masjedi-Arani, M., Ghanbari, D., Bagheri, S. & Salavati-Niasari, M. (2016) 'Novel Chemical Synthesis and Characterization of Copper Pyrovanadate Nanoparticles and its Influence on the Flame Retardancy of Polymeric Nanocomposites. *Scientific Reports*, 6(1), 1-9.

- [26] Jia, Y.L., Lu, Y., Zhang, G.X., Liang, Y. & Zhang, F. (2017). Facile synthesis of an eco-friendly nitrogen-phosphorus ammonium salt to enhance the durability and flame retardancy of cotton. *Journal of Materials Chemistry A*, 5(20), 9970-9981.
- [27] Davies, P.J., Horrocks, A.R. & Alderson, A. (2005). The sensitization of thermal decomposition of ammonium polyphosphate. *Thermochimica Acta*, 432(1-2), 73-82.
- [28] Fu, Q., Medina, L., Li, Y., Carosio, F., Hajian, A. and Berglund, L.A. (2014). Nanostructured wood hybrids for fire-retardancy prepared by clay impregnation into the cell wall. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 9(41), 36154-36163.
- [29] Xiao, Z., Xu, J., Mai, C., Militz, H., Wang, Q. & Xie, Y. (2016). Combustion behavior of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) sapwood treated with a dispersion of aluminum oxychloride-modified silica', *Holzforschung*, 70(12), 1165-1173.