





Investigation on the Effect of Nano-clay on Improving Fire Retardancy Properties of Paper Made from Bagasse Soda Pulp

Soleiman Zaheri* , Ali Ghasemian , Mohammadreza Dehghani Firouzabadi, Ghasem Asadpur

*Ph.D. Student, Dept. of Paper Sciences and Engineering, Faculty of Wood and Paper Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran

(Received: 12/08/2024, Revised: 24/08/2024, Accepted: 13/10/2024, Published: 10/12/2024)

DOR: 20.1001.1.22286675.1403.15.59.3.6

ABSTRACT

Fire retardant materials play an important role in increasing thermal stability and reducing risks associated with material ignition. One of the effective methods to increase fire retardancy properties is the use of nanomaterials such as nanoclays. Montmorillonite nanoclay (MMT) is known as one of the most important nanomaterials in this field due to its layered structure and unique properties. In addition, cationic starch, as a natural material with high adhesion and synergistic properties, can guarantee the improvement of mechanical and thermal properties of materials. In this research, using soda bagasse paper pulp, handmade cardboard with a basis weight of 125 g/m² and the thickness of 0.185 mm was prepared. Nanoclay was used as a fire retardant with different concentrations (10%, 20%, 30%). To improve paper dry resistance and char formation, cationic starch was added to all treatments at a constant rate of 10%. The coating operation was carried out at Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources with Auto Bar Coater. The physical and resistance characteristics of paper, including liquid penetration resistance, paper thickness, contact angle, tensile strength, burst resistance, and tear resistance were investigated. Also, the properties of slow burning and thermal stability were investigated using TGA device and vertical flammability tests and FTIR. The results showed that coating with montmorillonite nanoclay and cationic starch can significantly increase the tensile strength, tearing resistance and bursting resistance of the paper. The best performance was observed at 20% concentration. Various mechanisms including the formation of hydrogen bonds and the increase of specific surface area contributed to this improvement. In addition, the coating improved the flame retardancy properties and thermal stability of the paper. These results show that the use of nanoclay and cationic starch can effectively improve the resistance and thermal properties of paper.

Keywords: Coating, Flame Retardancy, Bagasse Virgin Soda Pulp, Montmorillonite Nanoclay, Packaging Paper

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: soleiman.zaheri@yahoo.com

علمی - پژوهشی

بررسی اثر نانورس بر بهبود ویژگی‌های کاغذ حاصل از خمیر سودای باگاس در برابر آتش

سلیمان زاهری^{۱*}، علی قاسمیان^۲، محمدرضا دهقانی فیروزآبادی^۳، قاسم اسدپور^۴

۱- دانشجوی دکتری صنایع خمیر و کاغذ، گروه علوم و مهندسی کاغذ، دانشکده مهندسی چوب و کاغذ، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، ایران ۲- استاد، گروه علوم و مهندسی کاغذ، دانشکده مهندسی چوب و کاغذ، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، ایران ۳- دانشیار، گروه علوم و مهندسی کاغذ، دانشکده مهندسی چوب و کاغذ، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، ایران ۴- دانشیار، گروه علوم و مهندسی کاغذ، دانشکده مهندسی چوب و کاغذ، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ایران

DOR: 20.1001.1.22286675.1403.15.59.3.6

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۷/۲۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۵/۲۲

تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۰۹/۲۰

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۶/۰۳

چکیده

مواد بازدارنده آتش نقش مهمی در افزایش پایداری حرارتی و کاهش خطرات مرتبط با اشتعال مواد دارند. یکی از روش‌های مؤثر برای افزایش خواص بازدارندگی آتش، استفاده از نانومواد مانند نانورس‌ها است. نانورس مونت موریلونیت (MMT) به دلیل ساختار لایه‌ای و خواص منحصر به فردش، به‌عنوان یکی از مهم‌ترین نانومواد در این حوزه شناخته می‌شود. علاوه بر این، نشاسته کاتیونی به‌عنوان یک ماده طبیعی با خواص چسبندگی و هم‌افزایی بالا، می‌تواند بهبود خواص مکانیکی و حرارتی مواد را تضمین کند. در این تحقیق، با استفاده از خمیر کاغذ حاصل از سودای باگاس، مقوای دست‌ساز با وزن پایه ۱۲۰ گرم بر مترمربع و ضخامت ۰/۱۸۵ میلی‌متر تهیه شد. نانورس به‌عنوان ماده بازدارنده آتش با غلظت‌های مختلف (۱۰٪، ۲۰٪، ۳۰٪) استفاده شد. برای بهبود مقاومت خشک کاغذ و تشکیل زغال، نشاسته کاتیونی به میزان ثابت ۱۰٪ به‌تمامی تیمارها اضافه شد. عملیات پوشش‌دهی در دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان با دستگاه Auto Bar Coater انجام گرفت. ویژگی‌های فیزیکی و مقاومتی کاغذ از جمله مقاومت به نفوذ مایعات، ضخامت کاغذ، زاویه تماس، مقاومت به کشش، مقاومت به ترک‌شدن و مقاومت به پاره شدن بررسی شد. همچنین ویژگی‌های کندسوزی و پایداری حرارتی با استفاده از دستگاه TGA و آزمون‌های اشتعال‌پذیری عمودی و FTIR بررسی گردید. نتایج نشان داد که پوشش‌دهی با نانورس مونت موریلونیت و نشاسته کاتیونی می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی مقاومت به کشش، مقاومت به پاره شدن و مقاومت به ترک‌شدن کاغذ را افزایش دهد. بهترین عملکرد در غلظت ۲۰٪ مشاهده شد. مکانیزم‌های مختلفی از جمله تشکیل پیوندهای هیدروژنی و افزایش سطح ویژه به این بهبود کمک کردند. علاوه بر این، پوشش‌دهی موجب بهبود ویژگی‌های کندسوزی و پایداری حرارتی کاغذ شد. این نتایج نشان می‌دهد که استفاده از نانورس و نشاسته کاتیونی می‌تواند به‌طور مؤثری ویژگی‌های مقاومتی و حرارتی کاغذ را بهبود ببخشد.

کلیدواژه‌ها: پوشش‌دهی، کندسوزی، کاغذ باگاس، بسته‌بندی، نانورس مونت موریلونیت

۱- مقدمه

کربوکسیل، فسفریل و غیره جایگزین شود، توجه پژوهشگران زیادی را به خود جلب کرده است تا ویژگی‌های برجسته و بی‌نظیری از آن به دست آید. دارابودن ویژگی‌های بی‌بدیل سلولز، آن را به پایه‌ای منحصربه‌فرد برای بسیاری از کاربردها و مصارف بین‌رشته‌ای تبدیل کرده است. در مطالعات زیادی از انواع مختلف منابع سلولزی و ویژگی‌های مختلف آنها به دو شکل خام و اصلاح شده برای دستیابی به ویژگی‌های موردنظر و خاص استفاده شده است. برای نمونه، نشاسته، کیتوزان و به‌ویژه سلولز به‌عنوان زیست‌مواد بیشتر در مصارف مربوط به کندسوزی به کار می‌روند [۲، ۳]. استفاده از کاغذهای کندسوز شده به‌عنوان یک مانع حرارتی و محافظ در برابر

کاغذهای مبتنی بر سلولز که از چوب ساخته شده است از سه ترکیب اصلی شامل سلولز، همی سلولز و لیگنین تشکیل شده است [۱]. سلولز به‌عنوان یک ماکرومولکول زیستی و به دلیل دارابودن گروه‌های هیدروکسیل که می‌تواند با گروه‌های دیگری مانند آمین،

* رایانامه نویسنده مسئول: soleiman.zaheri@yahoo.com

(موجود در هوا) برای احتراق پلیمر ضروری هستند. بازدارندگی شعله با جلوگیری از تکرار این چرخه یا ایجاد اختلال در آن قابل دستیابی است [۹].

نحوه عمل بازدارنده‌های شعله به یکی از حالت‌های فیزیکی، شیمیایی یا مخلوطی از هر دو عمل می‌کنند. در حالت فیزیکی بازدارنده شعله از راه رقیق کردن سوخت یا ایجاد لایه مقاوم عمل می‌کند. درحالی‌که در حالت شیمیایی با تغییر یا تأثیر بر مسیر تجزیه پلیمر یا پیشروی شعله، فرایند احتراق مختل می‌شود. بازدارندگی شعله ممکن است در فاز متراکم (فاز جامد یا مذاب در سطح پلیمر) یا در فاز گازی (بخار) انجام گیرد [۱۰]. فرایند پوشش‌دهی سبب می‌شود تا حفرات موجود در ساختار کاغذ پر شوند و یک‌لایه یکنواخت بر روی سطح کاغذ تشکیل شود [۱۱]. اعمال تیمارهای سطحی بر روی کاغذ است که می‌تواند هزینه تولیدی کمتری نسبت به سایر تیمارهای فرایندی را در پی داشته باشد که پوشش‌دهی کاغذ در بین تیمارهای سطحی جایگاه ویژه‌ای را به خود اختصاص داده است [۱۲]. پوشش‌دهی بر بهبود خواص مکانیکی و خواص نفوذپذیری، به‌منظور بهبود خصوصیات ظاهری نیز انجام می‌شود [۱۳].

از متداول‌ترین کمک نگهدارنده‌های مورد استفاده صنعت کاغذسازی نشاسته است. نشاسته کاتیونی، نشاسته‌ای است که در طول زنجیره‌های پلیمری آن ترکیبات آمونیموم چهارتایی جایگزین هیدروکسیدها گردیده‌اند که حاوی بار مثبت بر روی نیتروژن استخلافی خود هستند. این ذرات با توجه به تفاوت باری که با نانوذرات رس و الیاف دارند می‌توانند موجب افزایش مقدار باقیمانده (وزن پوشش) ذرات در سطح کاغذ و اتصال ذرات پوشش‌دهی با سطح کاغذ شوند [۱۴]. با افزودن نشاسته، دانسیته ظاهری افزایش می‌یابد، به‌طوری‌که نشاسته کاتیونی بین الیاف قرار گرفته و فضای بین آنها را پر می‌کند، به‌نحوی که با افزایش سطح اتصال در الیاف و سطح پیوندی، باعث افزایش مقاومت به ترکیدن، کشش و پاره شدن می‌شود [۱۵].

۲- مواد و روش

در این بررسی، از خمیر کاغذ دست‌اول سودای باگاس شرکت‌های داخلی برای تهیه مقوهای دست‌ساز آزمایشگاهی با وزن پایه 120 g/m^2 استفاده شد.

۲-۱- مواد شیمیایی

مواد شیمیایی مورد استفاده در این تحقیق به شرح جدول (۱) بوده که به مشخصات و شرکت سازنده آن‌ها اشاره گردیده است.

گرمای خارجی و همچنین به دلیل زیست تخریب‌پذیر بودن، سبک بودن، خصوصیات مکانیکی خوب و همچنین قابلیت بازیابی، یک ماده عالی برای بسیاری از کاربردها مانند کاغذدیواری، روکش درب، درون دیوارهای دوجداره پیش‌ساخته، عایق کابل برق، صنایع و اشرا سازی و صنایع بسته‌بندی و غیره اهمیت زیادی دارد [۴،۳۸]. نانورس‌ها در دماهای بالا ساختارهای منسجم و لایه‌های محافظتی ایجاد می‌کنند که مانع از نفوذ اکسیژن و گازهای اشتعال‌زا به سطح کاغذ می‌شوند و به‌عنوان عایق حرارتی عمل کرده و انتشار حرارت را در سطح کاغذ کاهش دهند. همچنین می‌توانند مسیرهای تجزیه حرارتی کاغذ را تغییر داده و منجر به تشکیل محصولات تجزیه با دمای بالاتر و اشتعال‌پذیری کمتر شوند. حضور نانورس‌ها باعث می‌شود که تجزیه حرارتی مواد سلولزی به سمت تشکیل زغال کربنی حرکت کند. نانورس‌ها با ایجاد پیوندهای مختلف و تشکیل لایه‌های محافظ، فرایند کربونیزاسیون را تسهیل می‌کنند. مواد کندسوز کننده، کربونیزاسیون را در دماهای نسبتاً پایین افزایش می‌دهند و سبب تقویت لایه زغال می‌شوند [۵۶]. زغال کربنی تشکیل شده در حضور نانورس‌ها دارای پایداری بیشتری است و مانع از تخریب سریع‌تر آن در دماهای بالا می‌شود. لایه زغال دارای اثرات مثبت دوگانه به شرح زیر است: i: توسط مقدار ثابت اتم‌های کربن باقیمانده که ساختار پلیمری را تشکیل می‌دهند، کاهش مواد فرار و کاهش سرعت انتشار حرارت در طول احتراق را موجب می‌شود. ii: لایه زغال که همچون بستری محافظ عمل می‌کند سبب کاهش انتقال گرما در پلیمرهای زیرین می‌شود و سینتیک انتشار حرارت را از طریق فرایند خود-تورمی^۱ اصلاح می‌کند [۷]. در نانورس‌ها زغال کربنی سیلیکاتی تشکیل شده روی سطح نمونه در حال سوختن به‌عنوان محافظی در برابر گرما و انتقال جرم عمل می‌کند [۸].

به‌منظور تعادل باری، سطح رس با بار منفی به‌طور آزادانه با کاتیون‌های بار مثبت در لایه‌های مختلف در حال مبادله بار است. در تحقیقات مختلف اثبات شده است که هرچه ذرات کوچک‌تر باشند سطح ویژه آنها بیشتر شده و در نتیجه کنش آنها بیشتر می‌شود [۸]. مکانیسم مهار احتراق ناشی از استفاده از نانورس‌ها به این صورت است که این نانوذرات در طول فرایند احتراق، تبخیر گازهای قابل احتراق را کاهش می‌دهند، از نفوذ اکسیژن جلوگیری کرده که منجر به کاهش نفوذپذیری گاز می‌شود، انتقال حرارت را مختل و مانع از تخریب و گسترش آتش می‌شوند [۱]. سه عامل سوخت (گازهای اشتعال‌پذیر آزاد شده از پیرولیز)، گرما (در اثر گرمای ناشی از منبع خارجی یا گرمای آزاد شده از اکسایش سوخت) و اکسیژن

^۱Self-intumescent

اصلاح ویژگی‌های آتش کاغذ به شرح مندرج در جدول (۲) خواهد بود.

جدول (۲): تیمارهای آزمایش برای اصلاح ویژگی‌های آتش کاغذ برای کاغذ دست اول باگاس

| ردیف | کد تیمار | نانورس (درصد) | نشاسته کاتیونی (درصد) |
|------|-----------------|---------------|-----------------------|
| ۱ | C | - | - |
| ۲ | NC _۱ | ۱۰ | ۱۰ |
| ۳ | NC _۲ | ۲۰ | ۱۰ |
| ۴ | NC _۳ | ۳۰ | ۱۰ |

C نمونه کنترل، (NC) نانورس مونت موریلونیت، (CS) نشاسته کاتیونی

۲-۵- روش

از خمیر کاغذ حاصل از سودای باگاس شرکت تولیدی صنایع کاغذ-ساز داخلی، مقوای دست‌ساز با وزن پایه 125 g/m^2 و ضخامت متوسط 0.1185 mm و درجه روانی 400 CSF^3 تهیه شد. سپس از نانو رس به‌عنوان مواد بازدارنده آتش استفاده شد. غلظت‌های مختلف محلول نانورس در سه سطح مصرف (۱۰٪، ۲۰٪، ۳۰٪) با توجه به پیش‌تست‌هایی که انجام شد برای رسیدن به مصرف بهینه به حل کردن هر کدام از آن‌ها به‌صورت جداگانه در آب مقطر تهیه شد. همچنین هم‌افزایی با نشاسته کاتیونی به‌عنوان یک کمک نگهدارنده، بهبوددهنده مقاومت خشک کاغذ و عامل تشکیل زغال، به میزان ثابت و بهینه ۱۰٪ برای همه تیمارها در نظر گرفته شده است. در نهایت پوششی در سه سطح بعد از بررسی نتایج پیش تیمار با وزن پوششی 25 g/m^2 معادل ۲ گرم بر روی کاغذ پایه A4 به ابعاد 210×297 میلی‌متر پوشش‌دهی شد.

۳- مرحله تکمیلی کاغذ مقاوم به شعله کاغذ باگاس

۳-۱- عملیات پوشش‌دهی کاغذ

عملیات پوشش‌دهی در دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان توسط پوشش‌دهنده میله‌ای Auto Bar Coater, No. 2 rods و در سطح وزنی 25 g/m^2 بر روی مقوای پایه تولید شده از الیاف کاغذ باگاس رنگ‌بری شده با گراماژ 120 g/m^2 حاوی تیمارهای با سه ترکیب به‌کاررفته در جدول (۲) انجام گرفت. برای این منظور ۶ میلی لیتر از محلول پوشش‌دهی با استفاده از سرنگ بر روی کاغذ به ابعاد A4 ریخته شد و توسط دستگاه پوشش‌دهی با سرعت ۲۵

جدول (۱): مواد شیمیایی مورد استفاده

| ردیف | نام مواد شیمیایی | کشور و شرکت تولیدکننده |
|------|--|---------------------------|
| ۱ | نانورس مونت موریلونیت ^۱ (MMT) | آمریکا (Sigma- Aldrich) |
| ۲ | نشاسته کاتیونی ^۲ (CS) | کره جنوبی (Samyang Genex) |

۲-۲- آماده‌سازی نشاسته کاتیونی

نشاسته کاتیونی با رطوبت ۱۸ درصد، $\text{pH} = 6/9$ و درجه استخلاف ۰/۰۳۵، از شرکت‌های داخلی تهیه شد. نشاسته را می‌توان به‌عنوان عامل آهاردهی به کار برد در حالی که بعد از کمی اصلاح به دلیل قابلیت تشکیل فیلم عالی می‌توان آن را به‌عنوان عامل پوشش‌دهی مورد استفاده قرار داد [۴]. در راستای آماده‌سازی ترکیب پوشش ابتدا نشاسته را که به‌عنوان عامل کمک نگهدارنده است مورد پخت قرار گرفت. محلول نشاسته با توجه به روش با درصد خشکی ۱۰ درصد با غلظت $100 \text{ ml} / 10 \text{ g}$ در دمای ۹۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۳۰ دقیقه به‌طور غیرمستقیم در حمام آب پخته، سپس در دمای اتاق سرد شد [۱۶].

۲-۳- آماده‌سازی نانورس

غلظت‌های مختلف محلول نانورس (۱۰٪، ۲۰٪، ۳۰٪) با حل کردن نانورس در آب مقطر تهیه شد.

۲-۴- آماده‌سازی محلول پوشش‌دهی

به‌منظور آماده‌سازی ترکیب پوشش ابتدا ۱۰ گرم نشاسته در ۱۰۰ میلی‌لیتر آب مقطر حل شد و سپس برای یک دوره زمانی ۳۰ دقیقه تحت دمای ۹۰ درجه سانتی‌گراد پخته شد. سپس مقدار ۳۰، ۲۰، ۱۰ گرم نانورس در غلظت‌های (۱۰٪، ۲۰٪، ۳۰٪) بصورت جداگانه در ۱۰۰ میلی‌لیتر آب مقطر حل شد. پس از پخت نشاسته، نانورس به محلول اضافه گردید. از این روش برای تولید سوسپانسیون پوشش هر کاغذ از ترکیب ۵ میلی‌لیتر نشاسته و ۵ میلی‌لیتر نانورس در غلظت‌های مختلف استفاده گردید. و ترکیب حاصل با استفاده از دستگاه التراسونیک Qsonica-q700 دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری به مدت ۶ دقیقه تحت تیمار فراصوت قرار گرفت تا توزیع یکنواخت نانوذرات در مخلوط حاصل شود. ۲۵ میلی‌لیتر از ترکیب حاصل برای پوشش‌دهی کاغذی با سطح 0.25 مترمربع استفاده گردید. تعداد تیمارهای آزمایش برای

^۱ Montmorillonit

^۲ Cationic Starch

۳-۲-۳-۲- اشتعال پذیری عمودی^۲

برای بررسی مقاومت به آتش کاغذ مطابق با روش TAPPI 461OS-79 از آزمونگر عمودی مقاوم در برابر آتش استفاده خواهد شد. ابعاد نمونه‌های مورد ارزیابی در این آزمون ۷۰ در ۲۱۰ میلی‌متر می‌باشند [۲۰].

۳-۳-۳-۳- آزمون طیف‌سنجی زیر قرمز تبدیل فوریه^۳

این بررسی‌ها به وسیله دستگاه FTIR مدل Cary 630 ساخت شرکت Agilent کشور ایالات متحده آمریکا در بازه 4000 cm^{-1} الی 648 cm^{-1} با وضوح 4 cm^{-1} انجام شد. سپس خط پایه^۴ تمامی طیف‌ها اصلاح شد.

۴-۳-۴- تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها

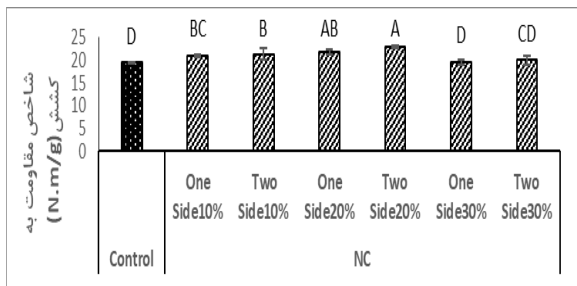
کلیه محاسبات آماری با استفاده از نرم‌افزار SPSS و بر اساس طرح کاملاً تصادفی انجام شد. از آزمون تجزیه واریانس جهت بررسی معنی‌داری داده‌ها استفاده شد.

۴-۴- نتایج و بحث

۴-۱-۱- ارزیابی ویژگی‌های مقاومتی

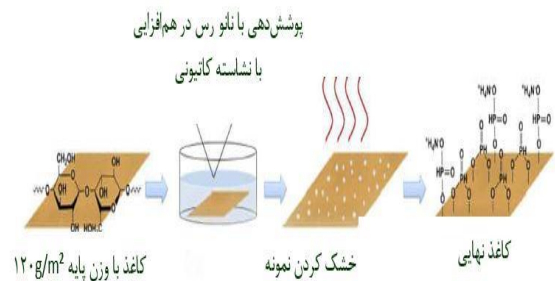
۴-۱-۱-۱- شاخص مقاومت به کشش

در جدول (۳) نتایج حاصل از تجزیه واریانس آزمون مقاومت به کشش کاغذ حاصل از کاغذ پوشش‌ده شده با نانورس را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌گردد، بین مقاومت نمونه‌های شاهد با نمونه‌های قرار گرفته در معرض پوشش‌دهی اختلاف معنی‌داری مشاهده گردید. همچنین نتایج آزمون دانکن نشان داد که افزایش مقاومت ناشی از افزایش مقدار غلظت پوشش در مقایسه با نمونه شاهد قابل ملاحظه بود.



شکل (۳): تغییرات میزان شاخص مقاومت به کشش در نتیجه مصرف مقادیر مختلف نانورس و نشاسته کاتیونی به‌عنوان یک عامل پوششی در کاغذ

میلیمتر بر ثانیه و فشار ثابت روی کاغذ پخش گردید. بعد از پوشش‌دهی، نمونه‌ها به آون با دمای $65-60^\circ\text{C}$ به مدت ۱۰ دقیقه انتقال یافتند [۱۷]. نهایتاً کاغذهای پوشش‌دهی شده به مدت ۲ روز در دمای محیط قرار گرفتن تا کاملاً خشک شوند. عملیات پوشش‌دهی برای رسیدن به وزن ثابت پوشش برابر با ۲۵ درصد وزن کاغذ (معادل ۲ گرم برای هر کاغذ با گراماژ ۱۲۰ گرم) در پوشش‌های یک طرفه و به میزان ۱ گرم برای هر سمت از کاغذ پوشش دو طرفه تکرار شد. از مقوای دست‌ساز پوشش‌دهی نشده به‌عنوان نمونه شاهد، استفاده شد. در شکل (۱) فرایند اصلاح کاغذ توسط مواد کندسوزکننده آمده است.



شکل (۱): فرایند اصلاح کاغذ توسط مواد کندسوزکننده

۳-۲-۲- بررسی ویژگی‌های فیزیکی و مقاومتی کاغذ اصلاح‌شده

برای انجام این آزمون‌ها، ابتدا نمونه‌ها بعد از اعمال پوشش‌دهی کاغذ در شرایط کلیما (رطوبت نسبی $50 \pm 2^\circ\text{C}$ و دمای $23 \pm 1^\circ\text{C}$) به مدت ۲۴ ساعت مطابق با استاندارد TAPPI T 402 sp-98 قرار گرفتند [۱۸]. اندازه‌گیری شاخص مقاومت به کشش نمونه‌های کاغذ پوشش‌دهی شده و شاهد با دستگاه Santam، مدل STM-20 و استاندارد TAPPI T 404 OM-98، شاخص مقاومت به ترک‌شدن با دستگاه Regmed مدل BT21P- و استاندارد TAPPI T 403 om-02 و شاخص مقاومت به پارگی با دستگاه Sanatazma و استاندارد TAPPI T 414 om-04 انجام گرفت.

۳-۳- اندازه‌گیری و تعیین ویژگی‌های کندسوزی

۳-۳-۱- پایداری حرارتی و احتراق^۱

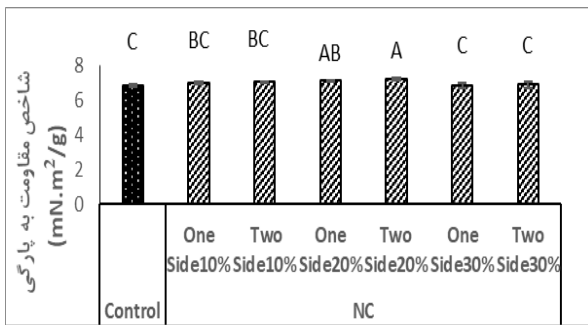
رفتار تخریب حرارتی کاغذ توسط دستگاه تجزیه و تحلیل حرارتی از روش استاندارد ASTM E1131 استفاده شد [۱۹].

^۲Vertical Flame

^۳Fourier Transform Infrared Spectroscopy

^۴Baseline

^۱Thermogravimetric Analysis



شکل (۳): تغییرات میزان شاخص پاره شدن در نتیجه مصرف مقادیر مختلف نانورس به‌عنوان یک عامل پوششی در کاغذ

پوشش‌دهی با MMT می‌تواند به طور قابل توجهی مقاومت به پاره شدن کاغذ باگاس را افزایش دهد. این امر به دلیل چندین مکانیسم رخ می‌دهد: سطح ویژه کاغذ باگاس را افزایش می‌دهد. این امر به نوبه خود، منجر به افزایش تعداد پیوندهای هیدروژنی بین الیاف کاغذ می‌شود که استحکام کلی کاغذ را افزایش می‌دهد. همچنین می‌تواند بین الیاف کاغذ باگاس پیوندهای قوی ایجاد کند. این پیوندها به‌عنوان یک "پل" عمل می‌کنند و از جدا شدن الیاف در هنگام اعمال تنش جلوگیری می‌کنند. البته نقش نشاسته کاتیونی نیز در افزایش ویژگی‌های مقاومتی کاغذها قابل توجه است. افزودن نشاسته کاتیونی باعث باردارشدن سطح الیاف (بار کاتیونی) خواهد شد که در مرحله بعد با افزودن نانورس مونت موریلونیت (با بار آنیونی) آن را جذب خواهد کرد [۲۲]. مقاومت به پارگی کنشی از طول الیاف، مقاومت الیاف و درجه‌ای از اتصال در صفحه کاغذ است [۲۶، ۲۷، ۲۸]. این ترکیب در غلظت ۲۰٪ بهترین عملکرد مقاومتی را نشان می‌دهد. به‌نحوی که میزان افزایش مقاومت به پاره شدن کاغذ با پوشش دوطرفه در غلظت ۲۰٪ حدود ۱۰ درصد بیش از کاغذ شاهد بود. اما در غلظت ۳۰٪، تجمع ذرات نانورس و تشکیل لایه‌های غیریکنواخت به کاهش عملکرد منجر شد [۲۱].

۴-۱-۳- شاخص مقاومت به ترکیدن

در جدول (۳) نتایج حاصل از تجزیه واریانس آزمون مقاومت به ترکیدن کاغذ حاصل از کاغذ پوشش داده شده با نانورس را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌گردد، بین مقاومت نمونه‌های شاهد با نمونه‌های قرار گرفته در معرض پوشش‌دهی اختلاف معنی‌داری مشاهده گردید. همچنین نتایج آزمون دانکن نشان داد که افزایش مقاومت ناشی از افزایش مقدار غلظت پوشش در مقایسه با نمونه شاهد قابل ملاحظه بود. گاهی اوقات گفته می‌شود که مقاومت به ترکیدن با مقاومت به کشش، رابطه تنگاتنگی دارد. اساس این گفته به توزیع تنش‌ها در حین آزمایش برمی‌گردد، لذا هرچقدر کاغذ بتواند در برابر تنش‌های وارده مقاومت بیشتری را از خود نشان دهد. مقاومت به ترکیدن بیشتری را خواهد داشت [۲۹، ۱۴].

نانورس مونت موریلونیت به دلیل ساختار لایه‌ای و سطح ویژه بالا، می‌تواند به‌عنوان یک تقویت‌کننده عمل کند و مقاومت به کشش کاغذ را افزایش دهد. همان‌طور که در شکل (۲) مشاهده می‌شود با افزایش مقدار غلظت پوشش، روند افزایشی در مقاومت به کشش نمونه‌ها ایجاد شده است. این ترکیب در غلظت ۲۰٪ بهترین عملکرد مقاومتی را نشان می‌دهد به‌نحوی که میزان افزایش مقاومت به کشش توسط کاغذ با پوشش دوطرفه در غلظت ۲۰٪ حدود ۱۸ درصد بیشتر از کاغذ شاهد بود. اما در غلظت ۳۰٪، تجمع ذرات نانورس و تشکیل لایه‌های غیریکنواخت به کاهش عملکرد منجر شد.

جدول (۳): تجزیه واریانس یک‌طرفه ویژگی‌های خمیر کاغذ باگاس تیمار

شده با استفاده از نانورس و نشاسته کاتیونی

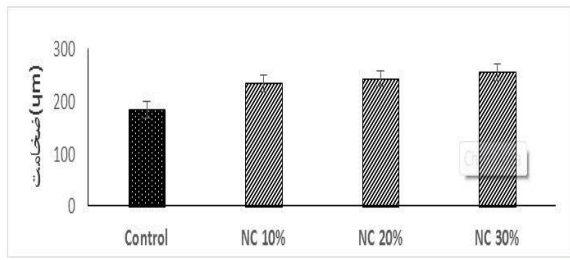
| مشخصه | مقاومت به کشش | مقاومت به پاره شدن | مقاومت به ترکیدن |
|---------|-----------------|--------------------|------------------|
| متغیر | Sig F | Sig F | Sig F |
| تیمارها | ۱۱/۰۸۱ ۰/۰۰۰ | ۶/۴۸۶ ۰/۰۰۲ | ۹/۹۲۶ ۰/۰۰۰ |

* در سطح اعتماد ۹۵ درصد معنی‌دار است

با افزایش ضخامت، محلول پوشش بیشتر بر روی سطح مانده و افزایش پیوندهای بین پوشش و الیاف سلولزی کاغذ پایه را منجر می‌شود که باعث مقاومت بیشتر الیاف سلولزی کاغذ پایه به همراه لایه پوشش در برابر تنش کششی می‌شود و افزایش نقطه تسلیم در این تیمارها را در پی خواهد داشت [۲۱]. همچنین این امر سازگاری زیاد بین محلول پوشش و الیاف سلولزی پایه را نشان می‌دهد. از طرف دیگر هیچ‌گونه ورقه‌ورقه شدن، گسستگی و یا پوسته‌پوسته شدن در مقطع شکست نمونه‌ها مشاهده نشده است که تأییدکننده مطلب، فوق است.

۴-۱-۲- شاخص مقاومت به پاره شدن

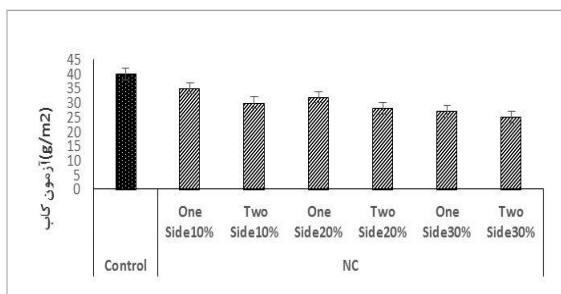
در جدول (۳) نتایج حاصل از تجزیه واریانس آزمون مقاومت به پاره شدن کاغذ حاصل از کاغذ پوشش داده شده با نانورس را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌گردد، بین مقاومت نمونه‌های شاهد با نمونه‌های قرار گرفته در معرض پوشش‌دهی اختلاف معنی‌داری مشاهده گردید. همچنین نتایج آزمون دانکن نشان داد که افزایش مقاومت ناشی از افزایش مقدار غلظت پوشش در مقایسه با نمونه شاهد قابل ملاحظه بود. (شکل ۳)



شکل (۵): تغییرات میزان ضخامت کاغذ در نتیجه مصرف مقادیر مختلف نانورس به عنوان یک عامل پوششی در کاغذ

۴-۲-۲- جذب آب

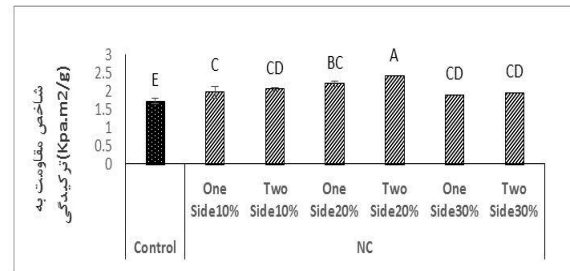
در آزمون کاب مقدار آبی که توسط سطح معینی از کاغذ در یک فاصله زمانی مشخص جذب می شود، اندازه گیری می گردد. نتایج حاصل از آزمون کاب در شکل ۶ نشان می دهد که با افزایش سطح مصرف نانورس مونت موریلونیت در ترکیب پوششی، میزان جذب آب کاغذها کاهش یافت [۳۰]. کاغذ اندود شده با نانورس در غلظت ۳۰ درصد کمترین میزان جذب آب را نسبت به کاغذ اندود شده در غلظت ۲۰ درصد و منجر به کاهش جذب آب به میزان حدود ۳۷ درصد نسبت به نمونه شاهد داشته است.



شکل (۶): تغییرات میزان جذب آب در نتیجه مصرف مقادیر مختلف

نانورس و نشاسته کاتیونی به عنوان یک عامل پوششی در کاغذ این نتایج می تواند به دلایل مختلفی صورت پذیرفته باشد. در درجه اول نشاسته که به عنوان یک کمک نگهدارنده در ترکیب با نانورس مونت موریلونیت استفاده شده است ماده ای آب گریز است و عموماً به عنوان آهار در کاغذسازی مورد استفاده قرار می گیرد [۳۱]. پوشش دهی باعث کاهش تخلخل سطح کاغذ می شود و از نفوذ آب به داخل ساختار کاغذ جلوگیری می کند از طرف دیگر، زمانی که نانورس مونت موریلونیت که ماده ای به شدت آب دوست بوده (این آب دوستی به بار سطحی منفی آن نسبت داده شده است) با نشاسته کاتیونی ترکیب می شود، تصور می شود که بار سطحی منفی ساختار نانورس مونت موریلونیت به خاطر شرکت در واکنش های الکترواستاتیکی با گروه های عاملی نشاسته کاهش می یابد و گروه های عاملی موجود در سطح نانورس که قادر به شرکت در واکنش ترکیبی با آب هستند محدود می شوند [۳۲].

همان طور که در شکل (۴) قابل مشاهده است با انجام فرایند پوشش دهی، مقاومت به ترکیدن افزایش یافته است. به طوری که تمامی نمونه های دارای پوشش، مقاومت به ترکیدن بیشتری را نسبت به کاغذ فاقد پوشش از خود نشان داده اند و با افزایش ضخامت پوشش، این مشخصه نیز افزایش می یابد. در بین تمامی تیمارها نمونه دارای پوشش با ضخامت ۲۴۴ میکرومتر بیشترین مقاومت به ترکیدن را از خود نشان داده است. علت این موضوع را می توان به تشکیل پیوندهای بیشتر پوشش با الیاف سلولزی سطح کاغذ پایه نسبت داد که در بهبود ویژگی های مقاومتی اثر قابل ملاحظه ای داشته است. این ترکیب در غلظت ۲۰٪ بهترین عملکرد مقاومتی را نشان می دهد به نحوی که میزان افزایش مقاومت به ترکیدن کاغذ با پوشش دوطرفه در غلظت ۲۰٪ حدود ۳۵ درصد بیش از کاغذ شاهد بود.



شکل (۴): تغییرات میزان شاخص مقاومت به ترکیدن در نتیجه مصرف مقادیر مختلف نانورس به عنوان یک عامل پوششی در کاغذ

۴-۲-۲- ارزیابی ویژگی های فیزیکی

۴-۲-۱- ضخامت کاغذ

نتایج نشان داد با افزودن نشاسته کاتیونی و نانورس به عنوان ماده پوشش دهنده، ضخامت کاغذ حاصل از خمیر کاغذ با گاس افزایش یافته است. در بین تیمارهای مختلف، بیشترین ضخامت در کاغذ حاصل از افزودن ۳۰ درصد نانورس حدود ۳۵ درصد بیشتر از شاهد مشاهده شد. تجزیه و تحلیل آماری داده ها نشان داد که بین میانگین ضخامت تیمارها در سطح پنج درصد تفاوت معنی داری وجود دارد. در ارزیابی ویژگی مقاومت های کاغذ، تأثیر عملیات پوشش دهی بر روی مقاومت ها دیده شده است. همان طور که در شکل (۵) مشاهده می شود و تعمیم آن بر ویژگی های مقاومتی، می توان گفت با افزایش مقدار ضخامت پوشش، روند افزایشی در مقاومت نمونه ها ایجاد شده است، به طوری که در بین سه سطح ضخامت پوشش ۲۵۶، ۲۴۴، ۲۳۵ میکرومتر، تیمار مربوط به ضخامت پوشش ۲۴۴ میکرومتر در غلظت ۲۰ درصد بیشترین مقاومت و در غلظت ۳۰ درصد مقاومت کمتر ولی بیشتر از شاهد از خود نشان داده است [۲۹].

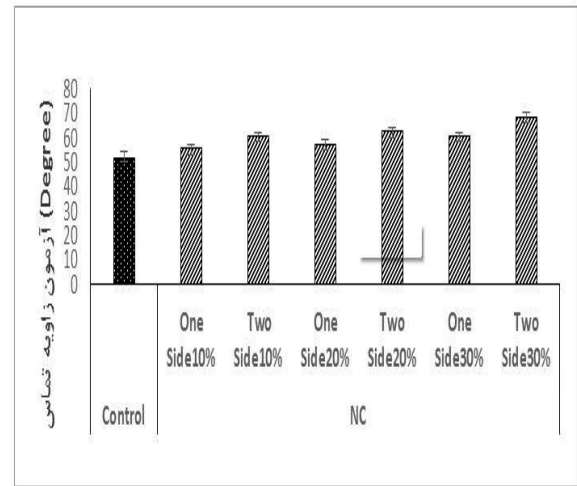
۴-۲-۳- زاویه تماس

جدول (۴): نتایج آزمایش اشتعال پذیری عمودی نمونه‌های کاغذ پوشش

یک‌طرفه و دوطرفه و کاغذ کنترل باگاس

| نمونه | غلظت مواد (درصد) | زمان اشتعال (ثانیه) | زمان سوختن (ثانیه) | طول سوختن (میلی‌متر) | طول زغال (میلی‌متر) | زمان پس شعله (ثانیه) | نتیجه |
|----------------|------------------|---------------------|--------------------|----------------------|---------------------|----------------------|-------------|
| Control | — | ۱۲ | ۲ | ۲۱۰ | بدون باقی‌مانده | ۰ | کاملاً سوخت |
| NC – OSC(1 0%) | ۱۰ | ۱۲ | ۱۴ | ۲۱۰ | بدون باقی‌مانده | ۲ | کاملاً سوخت |
| NC – OSC(2 0%) | ۲۰ | ۱۲ | ۱۸ | ۲۱۰ | بدون باقی‌مانده | ۶ | کاملاً سوخت |
| NC – OSC(3 0%) | ۳۰ | ۱۲ | ۲۴ | ۲۱۰ | بدون باقی‌مانده | ۱۲ | کاملاً سوخت |
| NC – TSC(1 0%) | ۱۰ | ۱۲ | ۱۷ | ۲۱۰ | بدون باقی‌مانده | ۵ | کاملاً سوخت |
| NC – TSC(2 0%) | ۲۰ | ۱۲ | ۲۲ | ۲۱۰ | باقی‌مانده دارد | ۱۰ | کاملاً سوخت |
| NC – TSC(3 0%) | ۳۰ | ۱۲ | ۳۰ | ۲۱۰ | باقی‌مانده دارد | ۱۸ | کاملاً سوخت |

زاویه تماس معیاری از آب‌گریزی سطح است و زاویه تماس بالاتر نشان‌دهنده سطح آب‌گریزتر است. با افزایش زاویه تماس، جذب آب توسط کاغذ باگاس نیز کاهش می‌یابد. این امر می‌تواند منجر به افزایش استحکام و دوام کاغذ شود.

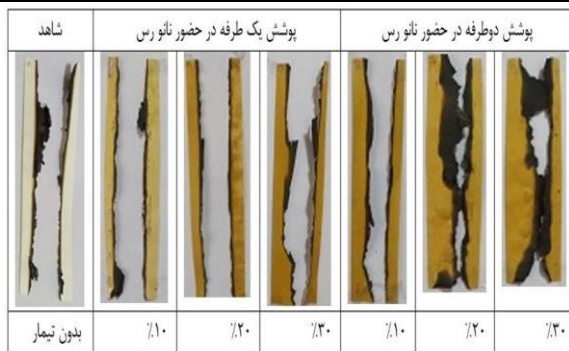


شکل (۷): تغییرات میزان جذب آب در نتیجه مصرف مقادیر مختلف

نانورس و نشاسته کاتیونی به‌عنوان یک عامل پوششی در کاغذ در بررسی اثر پوشش‌دهی با مونت موریلونیت در غلظت‌های مختلف (۱۰، ۲۰، ۳۰ درصد) در ترکیب با نشاسته کاتیونی (به میزان ۱۰ درصد) بر ویژگی زاویه تماس کاغذ حاصل از باگاس، این نتایج حاصل شد. با افزودن نشاسته کاتیونی و نانورس به‌عنوان ماده پوشش‌دهنده، زاویه تماس کاغذ افزایش یافته است. در بین تیمارهای مختلف، بیشترین زاویه تماس، در غلظت ۳۰ درصد پوشش دوطرفه به میزان حدود ۲۷ درصد و در همین غلظت در پوشش یک‌طرفه به میزان حدود ۱۶ درصد بیشتر از شاهد مشاهده شد. مطالعات نشان داده‌اند که پوشش‌دهی با مونت موریلونیت می‌تواند زاویه تماس کاغذ باگاس را به طور قابل‌توجهی افزایش دهد. این امر به دلیل تشکیل یک‌لایه محافظ روی سطح کاغذ است که مانع نفوذ آب می‌شود [۱۱].

۴-۲-۴- آزمون اشتعال‌پذیری عمودی

برای بررسی مقاومت در برابر شعله کاغذهای پوشش‌داده شده انجام شد. نتایج مربوط به این آزمایش‌ها در جدول (۴) و شکل (۸) نشان‌داده شده است. پس از مشتعل شدن نمونه از مرکز لبه پایینی، آتش به سمت بالا گسترش می‌یابد. رفتار نمونه‌های مشتعل شده مشاهده شد.



شکل (۸): تصاویر پس از آزمایش‌ها اشتعال‌پذیری عمودی، نمونه‌های کاغذ پوشش داده شده و کاغذ شاهد باگاس

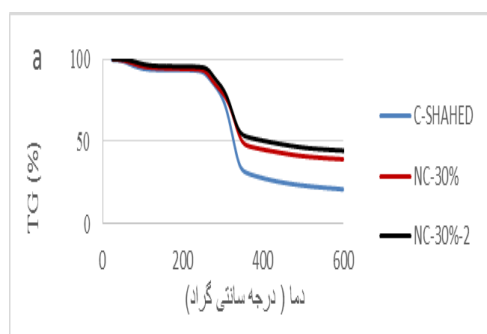
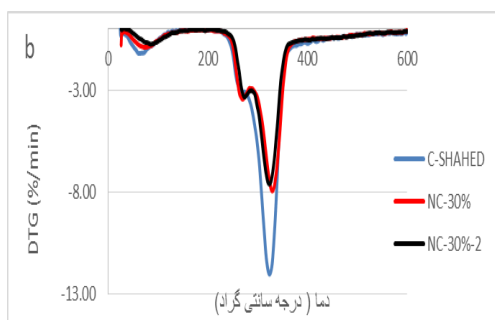
مطابق جدول (۴) و شکل (۸): کاغذهای باگاس پوشش‌داده شده نسبت به نمونه شاهد خواص کندسوزی خوبی نشان می‌دهند. نمونه کاغذ باگاس کنترل با ۲ ثانیه پس از شعله به طور کامل می‌سوزد و پس از احتراق هیچ باقیمانده‌ای به جا نمی‌ماند. پس از اصلاح، تمام کاغذهای پوشش داده شده یک‌طرفه (OSC) ^۱ و نمونه پوشش داده شده دوطرفه (TSC) ^۲ در مدت‌زمان بیشتری به سوختن

^۱One Sided Coating

^۲Two Sided Coating

مربوط به تجزیه ساختار لایه ای نانورس مونت موریلونیت است. که منجر به تشکیل گازهای دی اکسید سیلیکون، آلومینیوم اکسید و اکسیدهای دیگر می شود. فرایند کاهش جرم و تخریب به دلیل خشک شدن و یا آزاد شدن گازها و مواد فرار است و پس از آن تخریب سلولز و همی سلولز صورت می گیرد و در دماهای بالاتر تخریب لیگنین به دلیل مقاومت بهتر و بیشتر آن به دلیل دارا بودن بنزن - پروپیل دیرتر تخریب می شود [۳۳].

منحنی های TG و DTG در شکل (۹) به ترتیب (a) و (b) نشان داده شده و داده های TG و DTG، مانند دمای از دست دادن جرم ۱۰ درصد وزنی، T_{Onset} (۱۰٪)، دما در حداکثر نرخ کاهش جرمی (Tmax) و بازده زغال در ۶۰۰ درجه سانتیگراد (CY600)، در جدول (۵) خلاصه می شوند. نتایج TGA کاغذ نمونه شاهد و نمونه های اصلاح شده در شکل (۹) ارائه شده و در جدول (۷) خلاصه شده است. اثربخشی یک بازدارنده آتش را می توان از طریق داده های TGA از طریق کاهش دمای از دست دادن جرم در نقطه شروع پیرولیز، و دما در حداکثر سرعت تجزیه، Tmax ارزیابی کرد. علاوه بر این، افزایش در مقدار زغال تولیدی به عنوان یک شاخص غیرمستقیم کاهش میزان گازهای قابل احتراق تولید شده در فرآیند شناخته می شود که می تواند از مقدار جرم باقی مانده (CY) پس از تجزیه در اثر پیرولیز ارزیابی شود [۳۴].



شکل (۹): منحنی های TGA(a) و DTG(b) از نمونه های کاغذ پوشش داده شده و کاغذکنترل باگاس در اتمسفر نیتروژن

ادامه داده است به طوری که در پوشش یک طرفه در سه سطح مصرف با کد NC - OSC / ۲۰، NC - OSC / ۳۰، NC - OSC / ۱۰ و دو طرفه با کد NC - TSC / ۲۰، NC - TSC / ۳۰، NC - TSC / ۱۰، بعد از زمان شعله وری به مدت ۱۲ ثانیه، زمان سوختن آن به ترتیب ۳۰، ۲۲، ۱۷، ۲۴، ۱۸، ۱۴ ثانیه طول کشید تا کاملاً بسوزد. باتوجه به جدول ۴ در غلظت های بالاتر اثر ماده بازدارنده آتش به خوبی نشان داده شده است. به طوری که در غلظت ۳۰ درصد پوشش یک طرفه با ۱۲ ثانیه و پوشش دو طرفه با زمان ۱۸ ثانیه بعد از زمان شعله وری، تداوم شعله داشته تا به مرحله سوختن کامل برسد. در واقع ماده بازدارنده آتش استقامت و پایداری کاغذ را در برابر این نتایج تأیید می کند. این احتمال وجود دارد که بازدارنده شعله در فاز مترامک واکنش پذیر باشد و کارایی را در تغییر ویژگی های احتراق و تشکیل زغال کربن دار داشته باشد. نانورس ها به دلیل ساختار لایه ای خود می توانند لایه های محافظ بر روی سطح کاغذ تشکیل دهند. این لایه به عنوان یک مانع فیزیکی عمل کرده و از نفوذ حرارت و اکسیژن به سطح زیرین کاغذ جلوگیری می کند. در مقایسه بین دو گروه مشخص شد که استفاده از نانوذرات رس با غلظت ۳۰ درصد باعث مقاومت بیشتر در برابر اشتعال و کاهش میزان سطح کربونیزه می شود. در هنگام اشتعال، نانورس ها می توانند به تشکیل زغال (Char) کمک کنند. زغال یک لایه کربنی محافظ است که از تجزیه مواد آلی جلوگیری کرده و به عنوان یک عایق حرارتی عمل می کند. این لایه می تواند از انتقال حرارت به مواد زیرین جلوگیری کرده و اشتعال را کاهش دهد [۱۲]. در نتیجه با این اصلاح می توان کاغذ باگاس با راندمان بازدارنده شعله مناسب، بدون انتشار هالوژن یا فرمالدئید ایجاد کرد.

۴-۲-۵- آزمون وزن سنجی حرارتی (TGA)

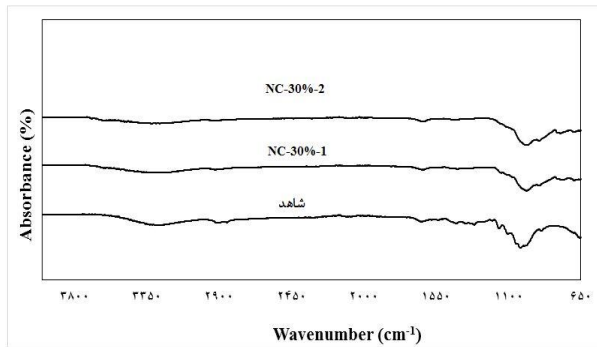
پایداری حرارتی کاغذهای باگاس کنترل و تیمار شده با نانورس توسط TG در اتمسفر نیتروژن مورد ارزیابی قرار گرفت و به طور کلی شامل سه ناحیه اصلی است. ناحیه کم دما (حدود ۵۰ تا ۲۰۰ درجه سانتیگراد): این ناحیه مربوط به از دست دادن آب جذب شده بر روی سطح نانورس مونت موریلونیت است. مقدار آب از دست رفته به سطح ویژه و مورفولوژی نانورس بستگی دارد. ناحیه دمای متوسط (حدود ۲۰۰ تا ۵۰۰ درجه سانتیگراد): این ناحیه مربوط به از دست دادن گروه های هیدروکسیل^۱ موجود در ساختار نانورس است. که در آن گروه های هیدروکسیل منجر به تشکیل آب و دی اکسید کربن می شود. ناحیه دمای بالا (بالای ۵۰۰ درجه سانتیگراد): این ناحیه

^۱ Dihydroxylation

^۲ Thermogravimetric Analysis

۴-۲-۶- تجزیه و تحلیل FTIR

برای مطالعه بیشتر مکانیسم بازدارنده شعله در فاز متراکم، FTIR کاغذهای پوشش داده شده در شکل (۱۰) مورد بررسی قرار گرفت.



شکل (۱۰): طیف FTIR نمونه‌های کاغذ پوشش داده شده و کاغذ شاهد باگاس

در طیف‌سنجی مادون قرمز تبدیل فوریه (FTIR) برای مونت‌موریلونیت، پیک‌های مشخصی وجود دارند که به شناسایی این ماده کمک می‌کنند. حدود $3690-3620\text{ cm}^{-1}$: این پیک مربوط به کشش ارتعاشی گروه‌های OH ساختاری (هیدروکسیل) است که در لایه‌های اکتاهدرال و تتراهدرال ساختار مونت‌موریلونیت یافت می‌شود. حدود $3450-3430\text{ cm}^{-1}$: این پیک به کشش ارتعاشی گروه‌های OH ناشی از آب‌های موجود در فضای بین لایه‌های^۱ مونت‌موریلونیت اختصاص دارد. پیک‌های 689 cm^{-1} ، 759 cm^{-1} ، 776 cm^{-1} ، 795 cm^{-1} : پیک‌های مربوط به Si-O-Si. این پیک‌ها معمولاً به دلیل پیوندهای سیلیکاتی موجود در ساختار مونت‌موریلونیت ظاهر می‌شوند. پیک‌های 910 cm^{-1} و 991 cm^{-1} : پیک‌های مربوط به Al-O. این پیک‌ها به پیوندهای آلومینیم - اکسیژن که در ساختار مونت‌موریلونیت وجود دارد، اشاره دارند. پیک 1107 cm^{-1} : پیک‌های مربوط به Si-O-Al. این پیک معمولاً به پیوندهای سیلیکات - آلومینات در ساختار مونت‌موریلونیت مربوط می‌شود. این پیک‌ها به ترکیبات شیمیایی موجود در مونت‌موریلونیت و ساختار لایه‌ای آن اشاره دارند. مونت‌موریلونیت دارای پیوندهای سیلیکات و آلومینات است که به ساختارهای لایه‌ای و ویژگی‌های آن کمک می‌کنند. این اطلاعات به شناسایی و تأثیر نانورس مونت‌موریلونیت در کاغذ باگاس کمک می‌کند [۳۹].

۵- نتیجه‌گیری

به‌طور کلی نتایج نشان داد که پوشش‌های اعمال شده قابلیت کاهش اشتعال‌پذیری کاغذ باگاس را دارند و استفاده از نانوذرات رس به همراه نشاسته کاتیونی باعث افزایش مقاومت پوشش‌ها شده است. در بخش آزمون مقاومت به آتش، اثر ماده بازدارنده آتش در

جدول (۵): داده‌های TGA نمونه‌های کاغذ تیمار شده و کاغذ کنترل تحت

اتمسفر نیتروژن

| Samples | $T_{\text{Onset}} (10\% \text{ } ^\circ\text{C})$ | $T_{\text{max}} (^\circ\text{C})$ | $\text{CY}_{600} (\%)$ |
|----------------|---|-----------------------------------|------------------------|
| Control | ۲۴۱/۱۷۰ | ۳۴۲ | ۲۰/۸۲۰ |
| NC - OSC (۳۰%) | ۲۵۸/۳۰۷ | ۳۵۴/۱۹۷ | ۳۹/۱۹ |
| NC - TSC (۳۰%) | ۲۷۲/۱۷۹ | ۳۵۳/۱۱۷ | ۴۳/۴۶ |

همان‌طور که در شکل (a) نشان داده شده است، کاغذ باگاس کنترل دارای $T_{10\%}$ در 241°C درجه سانتیگراد و T_{max} در 342°C درجه سانتیگراد است که مربوط به دی پلیمریزاسیون^۳ واحدهای گلیکوزیل به محصولات فرار شامل لوگلوکوزان است [۳۵]. با افزایش از نظر دما، کاغذ باگاس کنترل (Control) دارای بازده زغال CY به میزان $20/820\%$ درصد است. برای نمونه با غلظت‌های 30% NC - OSC و 30% NC - TSC، مقادیر T_{Onset} و T_{max} در مقایسه با نمونه شاهد افزایش یافت و بنابراین، مسیر تجزیه در اثر حرارت را حداقل تا حدی به دماهای بالاتر، تقریباً تا 31°C درجه سانتی‌گراد تغییر داد. از طرفی در مقایسه با کاغذ باگاس کنترل، کاغذهای باگاس پوشش داده شده دارای باقیمانده بیشتری هستند. علاوه بر این بازده زغال کاغذ اصلاح شده و نمونه شاهد مورد ارزیابی قرار گرفت. این کار به‌منظور ارزیابی تأثیر مواد شیمیایی بازدارنده آتش بر بازده واقعی زغال پس از تجزیه در اثر حرارت انجام شد. میزان بازده زغال در کاغذهای با پوشش دوپرفه با نانورس (NC - TSC/۳۰) در غلظت‌های مختلف و وزن ماده پوشش‌دهی یکسان، بیشتر از کاغذ با پوشش یک‌طرفه (NC - OSC/۳۰) و نمونه شاهد بوده است. افزایش $T_{10\%}$ به دلیل بهبود پایداری حرارتی این ماده، کاهش تولید محصولات گازی مضر و تجزیه آن در دمای بالاتر صورت می‌پذیرد [۳۶]. هنگامی که غلظت (NC) به 30% افزایش می‌یابد، بازده زغال (NC - TSC/۳۰) به $43/46\%$ افزایش می‌یابد، که 120% بیشتر از کاغذ باگاس کنترل است. نتایج نشان می‌دهد که با این اصلاح می‌توان کاغذ باگاس پوشش داده شده با نانورس با پایداری حرارتی بالایی داشته باشیم. بازدارنده شعله، کم‌آبی کاغذ باگاس را کاتالیز می‌کند و از تشکیل زغال کربنی و جلوگیری از پلیمریزاسیون سلولز جلوگیری می‌کند [۳۷]. وجود یک بازدارنده شعله به‌طور کلی بر روند تخریب حرارتی سلولز با افزایش کل زغال باقی‌مانده تأثیر می‌گذارد [۳۸]

^۱ Interlayer

^۳ Depolymerization

- [3] S. Yook, H. Park, H. Park, S.Y. Lee, J. Kwon, and H. J. Youn, "Barrier coatings with various types of cellulose nanofibrils and their barrier properties," **Cellulose**, vol. 27, pp. 4509-4523, 2020. DOI:10.1007/s10570-020-03119-4.
- [4] S. Zaheri and G. Asadpur, "Feasibility Study of Using Different Types of Bio-Polymer Coatings on Paper Packaging Materials," **Packaging Science and Art**, vol. 10, no. 38, pp. 18-27, 2019. (In Persian)
- [5] A. Tutus, M. Cicekler, and I. Deniz, "Using of burnt red pine wood for pulp and paper production (Turkish Abstract in English)," **KSU Journal of Engineering Sci**, pp. 90-95, 2012.
- [6] F. F. P. Kollman and W. A. Côté, **Principles of wood science and technology: solid wood**, Allen & Unwin, 1968. DOI:10.1007/978-9-87928-642-3.
- [7] J. Xie, J. Xu, Z. Cheng, J. Chen, Z. Zhang, T. Chen, R. Yang, and J. Sheng, "Facile synthesis of fluorine-free cellulosic paper with excellent oil and grease resistance," **Cellulose**, vol. 27, pp. 7009-7022, 2020. DOI:10.1007/s10570-020-03248-w.
- [8] F. Laoutid, L. Bonnaud, M. Alexandre, J. M. Lopez-Cuesta, and P. Dubois, "New prospects in flame retardant polymer materials: From fundamentals to nanocomposites," **Materials Science and Engineering: R: Reports**, vol. 63, no. 3, pp. 100-125, 2009, DOI: 10.1016/j.msere.2008.09.002.
- [9] P. Li, Y. Zhang, Y. Zuo, J. Lu, G. Yuan, and Y. Wu, "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**, vol. 9, no. 1, pp. 1043-1053, 2020.
- [10] S. Ryan, "System and Method for Programming a Weighing Scale Using a Key Signal To Enter a Programming Mode," **United States Patent**, Date of Patent: 1 Dec. 2009.
- [11] P. Samyn, G. Schoukens, P. Kiekens, P. Mast, H. V. Abbeele, D. Stanssens, and L. Vonck, "Thermal resistance of organic nanoparticle coatings for hydrophobicity and water repellence of paper substrates," **AUTEX Research Journal**, vol. 10, no. 4, 2010.
- [12] H. Gholamian and A. Javed, "Investigating the effect of clay nanoparticles and different coatings on increasing the thermal properties and fire resistance of wood," **Color Science and Technology**, vol. 15, no. 3, pp. 165-176, 1400. (In Persian)
- [13] H. Hamada, T. Enomae, I. Shibata, A. Isogai, and F. Onabe, "Effects of water-soluble cellulosic polymers on coating development and quality," in **Proceedings of PITA Coating Conference**, Edinburgh, Great Britain, Mar. 4-5, 2003, pp. 91-95.
- [14] P. Narchin and E. Afra, "Characteristics operation mechanism and applications of clay," **Quarterly Journal of Scientific-Promotional of Nanoworld**, no. 35, 2014. (In Persian)
- [15] M. Hadilam, E. Afra, and H. Yousefi, "Effect of cellulose nanofibers on the properties of bagasse paper," **Journal of Forest and Wood Products**, vol. 66, no. 3, pp. 351-366, 2013.
- [16] V. Guazzotti, S. Limbo, L. Piergiorgio, R. Fengler, D. Fiedler, and L. Gruber, "A study into the potential barrier properties against mineral oils of starch-based coatings on paperboard for food packaging," **Food Packaging and Shelf Life**, vol. 3, pp. 9-18, 2015.
- [17] Z. Song, H. Xiao, and Y. Zhao, "Hydrophobic-modified nanocellulose fiber/PLA biodegradable composites for lowering water vapor transmission rate (WVTR) of paper," **Carbohydr Polym.**, vol. 111, pp. 442-448, 2014, DOI: 10.1016/j.carbpol.2014.04.049.
- [18] "Standard conditioning and testing atmospheres for paperboard pulp handsheets and related products," *TAPPI Test Methods T 402 sp-08*, 2013.
- [19] ASTM E1131-20, "Standard Test Method for Compositional Analysis by Thermogravimetry."
- [20] TAPPI T461OS-79, "Testing procedure using YG815B vertical fabric flame-retardant tester (Nantong Sansi Electromechanical Science & Technology Co. Ltd. China)."
- [21] S. Castvan, D. Lazarevic, P. Stojanovic, Z. Ivkovic, R. Petrovic, and J. Kovic, "Improvement of the mechanical properties of paper by starch coatings modified with sepiolite nanoparticles," **Starch**, vol. 67, pp. 373-380, 2015.

غلظت‌های بالاتر به‌خوبی نشان‌داده شده است. در مقایسه بین دو گروه مشخص شد که استفاده از نانوذرات رس با غلظت ۳۰ درصد باعث مقاومت بیشتر در برابر اشتعال و کاهش میزان سطح کربونیزه می‌شود. در واقع ماده بازدارنده آتش پایداری کاغذ را در برابر این نتایج تأیید می‌کند. علاوه بر این بازده زغال کاغذ اصلاح شده و نمونه شاهد مورد ارزیابی قرار گرفت. این کار به‌منظور ارزیابی تأثیر مواد شیمیایی بازدارنده آتش بر بازده واقعی زغال پس از تجزیه در اثر حرارت انجام شد [۳۶]. هنگامی که غلظت (NC) به ۳۰٪ افزایش می‌یابد، بازده زغال (NC - TSC/۳۰) به ۴۳/۴۶٪ افزایش می‌یابد، که ۱۲۰٪ بیشتر از کاغذ باگاس کنترل است. نانوذرات مونت موریلونیت دارای سطح ویژه بالایی هستند که به آنها اجازه می‌دهد تا با مولکول‌های سلولز موجود در الیاف باگاس پیوند هیدروژنی ایجاد کنند. این پیوندها یک‌لایه محافظ هیدروفوبیک روی سطح کاغذ ایجاد می‌کنند که مانع نفوذ آب می‌شود و زاویه تماس را افزایش می‌دهد. استفاده از کاغذهای کندسوز شده به‌عنوان یک مانع حرارتی و محافظ در برابر گرمای خارجی در کاربردهای مانند کاغذدیواری، روکش درب، درون دیوارهای دوجداره پیش‌ساخته، عایق کابل برق، صنایع و اشکارسازی، کاغذ بسته‌بندی و غیره اهمیت زیادی دارد.

محصول مورد بررسی در این مقاله به‌ویژه در صنایع بسته‌بندی کاربردهای متعددی دارد. باتوجه به ویژگی‌های کاغذهای کندسوز شده که در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفته‌اند، این کاغذها به‌عنوان یک مانع حرارتی و محافظ در برابر گرمای خارجی در کاربردهایی همچون بسته‌بندی محصولات حساس به حرارت، عایق‌بندی، و محافظت از کالاهای ارزشمند مورد استفاده قرار می‌گیرند. یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های کاغذهای کندسوز شده، مقاوم بودن آنها در برابر آتش و حرارت است. این خاصیت، محصول را به گزینه‌ای مناسب برای بسته‌بندی محصولات حساس به دما تبدیل می‌کند. همچنین، فرایند پوشش‌دهی به‌کاررفته در تولید این کاغذها باعث پر شدن حفرات موجود در ساختار کاغذ شده و یک‌لایه یکنواخت بر روی سطح آن ایجاد می‌کند که این امر علاوه بر بهبود خواص مقاومتی، نفوذپذیری و ظاهر کاغذ، به‌ویژه در صنایع بسته‌بندی اهمیت زیادی دارد [۴۰]. این ویژگی‌ها باعث می‌شود که کاغذهای کندسوز شده بتوانند در کاربردهای متنوعی از جمله بسته‌بندی کالاهای حساس به حرارت، عایق‌بندی محصولات، و محافظت از اقلام باارزش بالا، جایگاه ویژه‌ای داشته باشند [۴۱].

۶- مراجع

- [1] F. Browne, "Theories of the combustion of wood and its control," United States Department of Agriculture Forest Service Report No. 2136, Dec. 1958, pp. 1-72.
- [2] M. Tavakoli, A. Ghasemian, M. R. Dehghani-Firouzabadi, and B. Mazela, "Cellulose and its nano-derivatives as a water-repellent and fire-resistant surface: a review," **Materials**, vol. 15, no. 1, pp. 82-90, 2021. DOI:10.3390/ma15010082.

- [32] R. H. Ashley, R. Matthew, G. A. Gillian, and E. E. Elsie, "Clays and tetracyclines: composite formulation and Antibacterial properties," in *XV International Clay Conf.*, 2013.
- [33] W. He, W. Bi, and K. Yang, "Flame retarded paper prepared with hexaamidocyclotriphosphazene," *Paper Sci Technol*, vol. 34, no. 4, pp. 24-26, 2015.
- [34] R. M. Rowell and M. A. Dietenberger, "Thermal properties, combustion, and fire retardancy of wood," in *Handbook of wood chemistry and wood composites*, pp. 121-151, 2012.
- [35] Y. L. Jia, Y. L. Wang, W. Y. Bao, and W. Z. Zhao, "Superhydrophobic and flame-retardant polybenzoxazine coated cotton fabrics," *RSC Advances*, vol. 5, no. 65, pp. 52836-52843, 2015.
- [36] Davies, P.J., Horrocks, A.R., Alderson, A., 2005 The sensitization of thermal decomposition of ammonium polyphosphate. by selected metal ions and their potential for improved cotton fabric flame retardancy. *Polym Degrad Stab* 88:114-122
- [37] Y. J. Feng, Y. Zhou, and D. K. Li, "A plant-based reactive ammonium phytate for use as a flame-retardant for cotton fabric," *Carbohydr. Polym.* , vol. 175, pp. 636-644, 2017. DOI:10.1016/j.carbpol.2017.081.
- [38] S. Zaheri and A. Ghasemian, "Evaluation of the use of fire retardants and its application in flame retardant packaging papers," *Packaging Science and Art*, vol. 12, no. 47, pp. 9-16, 2022. (In Persian)
- [39] F. Xu, L. Zhong, Y. Xu, S. Feng, C. Zhang, F. Zhang, and G. Zhang, "Highly efficient flame-retardant kraft paper," *Journal of Materials Science*, vol. 54, no. 2, pp. 1884-1897, 2019. DOI:10.1007/s10853-018-2912-y
- [40] X. Jiang and S. Li, "Flame-retardant paper and its application in packaging," *Journal of Materials Science & Technology*, vol. 36, no. 6, pp. 79-87, 2020.
- [41] H. J. Kim and S. H. Park, "Advanced fire-resistant packaging materials: A review," *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, vol. 109, pp. 10-25, 2022.
- [22] P. Rezayati Charani and M. H. Moradian, "Utilization cellulose nanofibers and cationic polymers to improve breaking length of paper." *Journal of Cellulose Chemistry and Technology*, vol. 53, no. 7-8, pp. 767-774, 2019.
- [23] G. Barati Darband, M. Aliofkhaezrai, S. Khorsand, S. Sokhanvar, and A. Kaboli, "Science and Engineering of Superhydrophobic Surfaces: Review of Corrosion Resistance Chemical and Mechanical," 2020.
- [24] Q. Wang, J. Xiong, G. Chen, X. O. Xinping, Z. Yu, Q. Chen, and M. Yu, "Facile Approach to Develop Hierarchical Roughness fiber@SiO₂ Blocks for Superhydrophobic Paper." *Materials*, vol. 12, no. 9, p. 1393, 2019, DOI:10.3390/ma12091393.
- [25] M. Tavakoli, A. Ghassemian, M. R. Dehghani Firouzabadi, B. Mazela, and W. Grzeškowiak, "Bio-production of fire retardant and hydrophobic packaging paperboard with enhanced tensile strength through coating with modified cellulose nanofiber," *European Journal of Wood and Wood Products*, pp. 1-13, 2024.
- [26] P. H. B. Piet, T. A. Wielema, "Anionic wet-end starches: a wealth of possibilities to improve paper quality and/or reduce paper," in *TAPPI Technology Summit*, 2002.
- [27] P. P. Karenlampi, "The effect of pulp fiber properties on the tearing work of paper," *Tappi journal*, 1996.
- [28] A. Ahmadi Lajimi, M. Azadfallah, Y. Hamzeh, and M. Rahmaninia, "Effect of cationic poly DADMAC based fixing agent on strength properties OCC pulp," *Iranian Journal of Wood and Paper Industries*, vol. 10, no. 4, pp. 605-616, 2020. (In Persian)
- [29] F. Mortazavi, H. Resalati, S. Rasouli, and G. Asadpour, "Investigation of Industrial Paper Coating with Recycled Kaolin," *Journal of Color Science and Technology*, vol. 15, no. 2, pp. 117-129, 2021. (In Persian)
- [30] N. Sharifi and N. Taghavinia, "Silver nano-islands on glass fibers using heat segregation method," *Materials Chemistry and Physics*, vol. 113, pp. 63-66, 2009.
- [31] C. Hagiopol and J. W. Johnston, *Chemistry of Modern Papermaking*, CRC Press, 2011. ISBN: 9781439856468. (In Persian)