University of Tehran

Journal of Forest and Wood Products

Online ISSN: 2383-0530

Home Page: https://jfwp.ut.ac.ir

The effect of fiber surface oxidation and lignosulfonate coating on packaging paper properties

Seyed Sheyda Shafiei[1] | Noureddin Nazarnezhad[2*] | Shaghayegh Rezanezahd[3] | Seyed Majid Zabihzadeh[4]

1. Department of Wood and Cellulosic Product, Agricultural Sciences and Natural Resources University of Sari, Sari, Iran. Email: sheyda.shafiei1990@gmail.com
2. Corresponding Author, Associate Professor, Department of Wood and Cellulosic Product, Agricultural Sciences and Natural Resources University of Sari, Iran, Email: nazarnezhad91@gmail.com
3. Department of Wood and Cellulosic Product, Agricultural Sciences and Natural Resources University of Sari, Sari, Iran. Email: rezanezhad.sh@gmail.com
4. Department of Wood and Cellulosic Product, Agricultural Sciences and Natural Resources University of Sari, Sari, Iran. Email: m.zabihzadeh@yahoo.com

ARTICLE INFO

Article type:
Research Article

Article History:
Received: 13 August 2026
Revised: 07 September 2026
Accepted: 14 October 2026
Published online: 20 November 2026

Keywords:
Lignin,
Lignosulfonate,
Oxidation,
Packaging paper,
Surface modification.

ABSTRACT

Introduction: In recent years, many efforts have been made to use natural polymers, especially cellulose and lignin, as renewable and environmentally friendly materials. Lignin with phenylpropane units has great potential for reaction, modification, and use in various applications. This material is recovered in large quantities from the pulp and paper industry every year. Lignosulfonate (LS) is obtained from the sulfite pulping process. It is water-soluble and has a high molecular weight. Lignosulfonate can be used as an emulsion stabilizer, dispersant in oil well drilling, cement compounding and paper coating. Given the importance of lignin, it is essential to investigate the capabilities of lignin in the manufacture of paper and cardboard. Therefore, in this research, the effect of using lignin on the properties of packaging paper was studied.

Method: First, long-fiber kraft pulp sheets were crushed into small pieces. The fibers were soaked for 24 hours, then they were defibrated using a laboratory disintegrator. After moisture content determination, the fibers were refined according to the TAPPI standard to achieve freeness about 250 ± 25 ml. Hand-sheets with a basis weight (g/m^2) of 60 ± 5 was made from the refined fibers, according to the TAPPI standard. Finally, after making the hand-sheets and before press, the hand-sheets surface was modified by using spray method the sodium hydroxide and then 3% hydrogen peroxide. After cold pressing, the surface of the hand-sheets was sprayed with a lignosulfonate solution. The concentration of the coating solution was 2.5 and 5%. The hand-sheets were fixed by using plate and rings to prevent wrinkles. Then, the strengths, physical and barrier properties of the control and coated papers, including tensile, tear, burst, density, thickness, ash content, surface roughness, water absorption, and air resistance, were investigated.

Results: The results showed that the highest tensile, burst and tear strengths index in hand-sheets is related to the modified hand-sheets samples with oxidative surface treatment and coated with lignosulfonate 5%. Also, statistical analysis of the data of the strength's properties indicated that the difference in the data is significant at the 95% confidence level. The highest hand-sheets thickness is related to the hand-sheet sample without oxidative surface treatment and coated with lignosulfonate 2.5%. The highest apparent density of the hand-sheets is related to the sample with oxidative surface treatment and coated with lignosulfonate 5%. Also, the highest ash content and the lowest surface roughness value in the hand-sheet samples are related to the modified hand-sheet sample with oxidative surface treatment and coated with lignosulfonate 5%. The lowest water absorption is related to the control hand-sheet sample and then the sample without oxidative surface treatment and coated with lignosulfonate 5%. The highest value of air resistance in the hand-sheets is related to the sample with oxidative surface treatment and coated with lignosulfonate 5%. Also, statistical analysis of the physical and barrier properties' data of hand-sheets showed that the difference in data is significant at the 95% confidence level.

Conclusion: The aim of this research is to coat modified fibers with lignosulfonate and investigate the properties of handmade paper. In this process, hydrogen peroxide was used as an oxidizing agent in an alkaline environment. The results showed that the surface oxidation process caused the creation of functional groups such as COOH on the surface of cellulose fibers. Also, this surface agent increased the reactivity of fibers and lignosulfonate, so that in the samples with the oxidation process, the amount of lignosulfonate absorption and, as a result, the percentage of ash in the paper increased.

Cite this article: Shafiei, S.Sh., Nazarnezhad, N., Rezanezahd, Sh., Zabihzadeh, S.M. (2026). The effect of fiber surface oxidation and lignosulfonate coating on packaging paper properties. *Journal of Forest and Wood Products*, 79 (3), 307-319. DOI: http//doi.org/10.22059/jfwp.2026.417929.1404

© The Author(s) **Publisher:** University of Tehran Press.
DOI: http//doi.org/10.22059/jfwp.2026.417929.1404

نشریهٔ جنگل و فرآورده‌های چوب
سایت نشریه: https://jfwp.ut.ac.ir
شاپا الکترونیکی: ۲۳۸۳-۰۵۳۰
دانشگاه تهران

بررسی تأثیر اکسایش سطوح الیاف و پوشش‌دهی با لیگنوسولفونات بر ویژگی‌های کاغذ بسته‌بندی

سید شیدا شفیعی[۱] | نورالدین نظرنژاد[۲*] | شقایق رضانژاد[۳] | سید مجید ذبیح‌زاده[۴]

۱. گروه چوب و فرآورده‌های سلولزی، دانشکدهٔ منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع‌طبیعی ساری، ساری، ایران. رایانامه: sheyda.shafiei1990@gmail.com
۲. نویسنده مسئول، گروه چوب و فرآورده‌های سلولزی، دانشکدهٔ منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع‌طبیعی ساری، ساری، ایران. رایانامه: nazarnezhad91@gmail.com
۳. گروه چوب و فرآورده‌های سلولزی، دانشکدهٔ منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع‌طبیعی ساری، ساری، ایران. رایانامه: rezanezhad.sh@gmail.com
۴. گروه چوب و فرآورده‌های سلولزی، دانشکدهٔ منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع‌طبیعی ساری، ساری، ایران. رایانامه: m.zabihzadeh@yahoo.com

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
پژوهشی

تاریخ‌های مقاله:
تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۵/۲۲
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۶/۱۶
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۷/۲۲
تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۸/۲۹

کلیدواژه:
اصلاح سطح،
اکسایش،
کاغذ بسته‌بندی،
لیگنین،
لیگنوسولفونات.

چکیده

مقدمه: در سال‌های اخیر، تلاش‌های زیادی جهت استفاده از پلیمرهای طبیعی به‌ویژه سلولز و لیگنین به‌عنوان مواد تجدیدپذیر و دوست‌دار محیط‌زیست انجام شده است. لیگنین با واحدهای فنیل پروپانی پتانسیل زیادی جهت واکنش، اصلاح و استفاده در کاربردهای مختلف دارد. سالانه این ماده به مقدار زیادی از صنایع خمیرکاغذ بازیابی می‌شود. لیگنوسولفونات از فرآیند خمیرسازی سولفیت به‌دست می‌آید. این ماده محلول در آب و دارای وزن مولکولی بالا است. از لیگنوسولفونات می‌توان به‌عنوان تثبیت‌کنندهٔ امولسیون، پراکنده‌ساز، ترکیب سیمان و پوشش کاغذ استفاده کرد. با توجه به اهمیت لیگنین، بررسی قابلیت‌های لیگنین در ساخت کاغذ و مقوا ضروری می‌باشد. از این‌رو در این تحقیق تأثیر استفاده از لیگنین در ویژگی‌های کاغذ بسته‌بندی مورد مطالعه قرار گرفت.

روش پژوهش: در ابتدا ورق‌های خمیرکاغذ الیاف بلند کرافت به ابعاد کوچک خرد شدند. الیاف به‌مدت ۲۴ ساعت خیسانده شد، سپس جداسازی و دفیبره کردن الیاف انجام شد. پس از تعیین رطوبت، الیاف مطابق با استاندارد تاپی، برای دست‌یابی به درجهٔ روانی ۲۵±۲۵۰ میلی‌لیتر تحت پالایش قرار گرفت. مطابق با استاندارد تاپی از الیاف پالایش و دفیبره شده، کاغذ دست‌ساز با وزن پایه ۵±۶۰ گرم بر متر مربع ساخته شد. در نهایت پس از ساخت کاغذ و قبل از پرس کاغذهای ساخته شده، سطوح الیاف ابتدا به‌وسیلهٔ هیدروکسید سدیم و سپس پراکسید هیدروژن ۳ درصد، با روش اسپری بر سطح، اصلاح سطحی شدند. پس از انجام پرس سرد، سطح کاغذ دست‌ساز به روش اسپری، توسط محلول لیگنوسولفونات پوشش داده شد. غلظت مادهٔ پوشش‌دهندهٔ ۲/۵ و ۵ درصد بود. کاغذهای دست‌ساز به‌وسیلهٔ صفحه و حلقه‌های مخصوص کاغذ، تحت قید قرار گرفتند تا بدون ایجاد چروک و ناصافی سطح خشک شوند. سپس ویژگی مقاومتی، فیزیکی و ممانعتی کاغذهای شاهد و پوشش داده شده شامل مقاومت کششی، مقاومت به پاره شدن، مقاومت به ترکیدن کاغذ، دانسیته و ضخامت، مقدار خاکستر و زبری سطح، جذب آب و مقاومت به عبور هوا مورد بررسی قرار گرفتند.

یافته‌ها: بررسی نتایج نشان داد که بیشترین شاخص مقاومت کشش، ترکیدن و پاره شدن در کاغذهای دست‌ساز مربوط به نمونه کاغذ اصلاح شده با تیمار سطحی اکسیداسیونی و پوشش‌دهی شده با لیگنوسولفونات ۵ درصد است. همچنین تجزیه‌وتحلیل آماری داده‌های مربوط به ویژگی‌های مقاومتی نشان داد که تفاوت داده‌ها در سطح اعتماد ۹۵ درصد معنی‌دار است. بیشترین ضخامت کاغذ مربوط به نمونهٔ کاغذ بدون تیمار سطحی اکسیداسیونی و پوشش‌دهی شده با لیگنوسولفونات ۲/۵ درصد و بیشترین مقدار دانسیتهٔ ظاهری کاغذ مربوط به نمونهٔ تیمار سطحی اکسیداسیونی و پوشش‌دهی شده با لیگنوسولفونات ۵ درصد بود. همچنین بیشترین مقدار خاکستر و کمترین مقدار زبری سطح در نمونه‌های کاغذ مربوط به نمونهٔ کاغذ اصلاح شده با تیمار سطحی اکسیداسیونی و پوشش‌دهی شده با لیگنوسولفونات ۵ درصد بود. کمترین مقدار جذب آب در نمونهٔ کاغذ شاهد و سپس نمونهٔ بدون تیمار سطحی اکسیداسیونی و پوشش‌دهی شده با لیگنوسولفونات ۵ درصد مشاهده شد. بیشترین مقدار مقاومت به عبور هوا در کاغذ مربوط به نمونه با تیمار سطحی اکسیداسیونی و پوشش‌دهی شده با لیگنوسولفونات ۵ درصد بود. همچنین تجزیه‌وتحلیل آماری داده‌های مربوط به ویژگی‌های فیزیکی و ممانعتی کاغذهای دست‌ساز نشان داد که تفاوت داده‌ها در سطح اعتماد ۹۵ درصد معنی‌دار است.

نتیجه‌گیری: هدف این پژوهش، پوشش‌دهی الیاف اصلاح شده با لیگنوسولفونات و بررسی ویژگی‌های کاغذ دست‌ساز بود. در این فرآیند از مادهٔ پراکسید هیدروژن به‌عنوان عامل اکسایشی در محیط قلیایی استفاده شد. نتایج نشان داد که فرآیند اکسیداسیون سطحی سبب ایجاد گروه‌های عاملی مانند COOH در سطح الیاف سلولزی شد. همچنین این عامل سطحی، سبب افزایش واکنش‌پذیری الیاف و لیگنوسولفونات شد، به‌طوری‌که در نمونه‌های با فرآیند اکسیداسیون مقدار جذب لیگنوسولفونات و در نتیجه درصد خاکستر موجود در کاغذ افزایش یافت.

استناد: شفیعی؛ سید شیدا، نظرنژاد؛ نورالدین، رضانژاد؛ شقایق، ذبیح‌زاده؛ سید مجید (۱۴۰۵). بررسی تأثیر اکسایش سطوح الیاف و پوشش‌دهی با لیگنوسولفونات بر ویژگی‌های کاغذ بسته‌بندی. *نشریهٔ جنگل و فرآورده‌های چوب*، ۷۹ (۳)، ۳۱۹-۳۰۷. DOI: https://10.22059/jfwp.2026.417929.1404

© نویسندگان.
ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.
https://doi.org/10.22059/jfwp.2026.417929.1404

۱. مقدمه

در سال‌های اخیر، محدودیت انرژی و مسائل محیطزیستی سبب توجه به استفاده و بهره‌برداری از زیست‌توده‌های تجدیدپذیر شده است. زیست‌تودهٔ لیگنوسلولزی یکی از منابع تجدیدپذیر مهم و ارزان قیمت می‌باشد که از سه پلیمر اصلی سلولز، همی‌سلولز و لیگنین و مقادیر کمی از مواد آلی و ترکیبات معدنی تشکیل شده است. این مواد اتصالات سادهٔ فیزیکی ندارند، آنها دارای انواع مختلفی از اتصالات شیمیایی پیچیده مانند اتصال اتری، گلیکوزیدی، استالی، استری، هیدروژنی و واندروالسی هستند [۱]. یکی از مهم‌ترین پلیمرهای زیست‌توده، لیگنین است. لیگنین فراوان‌ترین پلیمر طبیعی آروماتیک روی زمین است. این منبع تجدیدپذیر که به فراوانی یافت می‌شود، حدود ۱۵ تا ۴۰ درصد از تودهٔ زیستی چوب را تشکیل می‌دهد [۲]. این پلیمر زیستی شامل سه واحد فنیل پروپان شامل واحد سیرنجیل (S)، گوآیاسیل (G) و P–هیدروکسی فنول (H) است [۳]. تفاوت این واحدها در تعداد گروه‌های متوکسیل متصل شده به حلقهٔ آروماتیک است. واحدهای سیرنجیل دارای دو گروه متوکسیل، واحد گوآیاسیل دارای یک گروه متوکسیل و P–هیدروکسی فنول، گروه متوکسیل ندارد [۴]. لیگنین کاربردهای فراوانی شامل کشاورزی (آفت‌کش و حشره‌کش)، صنایع شیمیایی (تولید وانیلین و دی‌متیل سولفوکسید)، مواد مبدل (الیاف کربن)، چسب و اتصال‌دهنده‌ها (جوهر پرینت ترموپلاستیک، مواد معدنی)، کوپلیمرها (اوره فرمالدهید، فوران، فنولیک، اورتان، اپوکسی) و مواد افزودنی (گل حفاری، بتن، سیمان، صنایع چرم‌سازی) دارد [۵]. صنایع خمیر و کاغذ مهم‌ترین منبع لیگنین به شمار می‌آیند [۴]. در طول فرآیند خمیرسازی مقادیر متفاوتی از ترکیبات تغییر یافته لیگنین در لیکور مصرفی حل می‌شود [۶]. سالانه حدود ۲۰۰ میلیون تن لیکور سیاه در دنیا تولید می‌شود که بیش از ۷۰ میلیون تن از آن را لیگنین تشکیل می‌دهد [۷]. بیشتر لیگنین تجاری جهت تولید انرژی سوزانده می‌شود، این درحالی است که کمتر از ۱۰ درصد آن برای کاربردهای با ارزش افزوده بالا مورد استفاده قرار می‌گیرد [۸]. با توجه به حجم بالای مایع پخت تولید شده تیمار آن هم از نظر اقتصادی و هم از نظر محیطزیستی اهمیت زیادی دارد [۷].

به‌علت ویژگی‌هایی همچون تنوع کاربرد، تولید با مواد اولیه ارزان، دسترسی و تجدید پذیر بودن، قابلیت بازیافت و برگشت به چرخهٔ تولید و استفاده، سازگاری با محیطزیست و دوست‌دار محیطزیست بودن، ضرورت استفاده از فرآورده‌های کاغذی در گسترهٔ وسیعی از زندگی انسان احساس می‌شود [۹]. یکی از مهم‌ترین کاربردهای کاغذ، استفاده آن در صنایع بسته‌بندی کالا و مواد غذایی می‌باشد. استفاده از مواد تجدیدپذیر برای بسته‌بندی و بهره‌برداری پایدار از منابع طبیعی، به‌کارگیری مواد لیگنوسلولزی مبتنی بر بازیافت و بازیابی بسیار اهمیت یافته است. در این زمینه کاغذ به‌عنوان ماده‌ای تجدیدشونده نقش منحصربه‌فردی را ایفا می‌نماید. استفاده از کاغذهای مرغوب یکی از مؤلفه‌های مهم در ارتقا کیفیت بسته‌بندی می‌باشد [۱۰]. علاوه بر این، استفاده از افزودنی‌های شیمیایی و ترکیبات طبیعی تجدیدپذیر نقش تعیین‌کننده‌ای را در بهبود ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی کاغذهای بسته‌بندی و نهایتاً کیفیت بسته‌بندی دارد [۱۱]. شبکهٔ آروماتیک پیچیدهٔ لیگنین شامل واحدهای فنیل پروپان با اتصالات بین گروه‌های آروماتیک می‌باشد. این مسأله حرکت مولکول‌ها و افزایش دمای انتقال شیشه‌ای (Tg) را محدود کرده و لیگنین را به انتخابی مناسب جهت تقویت کاغذهای بسته‌بندی تبدیل می‌کند [۱۲]. از طرفی، استفاده از لیگنین و مشتقات لیگنین در کاغذسازی با توجه به رنگ قهوه‌ای آنها روشنایی کاغذ را کاهش می‌دهد. البته این همیشه به‌عنوان مشکل مطرح نخواهد بود به‌گونه‌ای که در کارخانه‌های تولید کاغذهایی مانند تست‌لاینر از رنگدانه‌هایی استفاده می‌شود که از نظر بصری به رنگ قهوه‌ای، مشابه کاغذ کرافت دیده شود [۱۰]. لیگنین دارای مقادیر زیاد گروه‌های هیدروکسیل فنولی (آروماتیک) و آلیفاتیک و گروه‌های متوکسیل می‌باشد که سبب بهبود پتانسیل واکنش‌گری آن می‌شود [۱۳]. این بهبود واکنش‌گری و پیوندپذیری سبب بهبود پیوند بین الیاف و افزایش مقاومت‌های کاغذ و مقوای حاصل خواهد شد. در میان فرآورده‌های مختلف ناشی از لیگنین بدون شک لیگنوسولفونات‌ها مهم‌ترین مشتق تجاری شده هستند [۱۴]. برخلاف خود لیگنین، لیگنوسولفونات یک محصول محلول در آب است. این پلیمر آنیونی دارای گروه‌های سولفونیک است که دارای کاربردهای مختلفی همچون سیال روان‌کننده در گل حفاری چاه‌های نفت، عامل پراکنده‌ساز در صنعت سیمان و سرامیک و استحکام بخش بتُن‌ها، رنگدانه در مرکب چاپ و صدها کاربرد دیگر است [۴]. در لیگنوسولفونات یا لیگنین سولفونه شده، محتوای گروه‌های فنلی در مقایسه با گروه‌های کربوکسیلیک اسید (RCOOH) بسیار بیشتر از لیگنین طبیعی است. Han و Cho (۲۰۱۶) در تحقیقی تأثیر آهاردهی با لیگنین حاصل از لیکور سیاه خمیرسازی کرافت و ترکیب لیگنین با آلوم را بر

خواص مقاومتی کاغذ بسته‌بندی کنگره‌دار مورد ارزیابی قرار دادند. بررسی مقاومت‌ها نشان داد که آهاردهی سطحی، سبب بهبود مقاومت خشک کاغذ شد [۱۵]. Copacic و همکاران (۲۰۱۸) نیز استفاده از لیگنین کرافت و لیگنوسولفونات را در آهاردهی سطحی مقوا با هدف درک تأثیر لیگنین‌ها بر توسعهٔ مقاومت‌ها و آب‌گریزی بررسی کردند. خواص مقاومتی و آب‌گریزی مقوا با آهار لیگنین، سبب افزایش خواص مقاومتی نمونه‌ها و حداقل ۱۰ درصد بیشتر در مقایسه با مقوای بدون آهار بود. علاوه بر این، نفوذپذیری هوا، آب‌گریزی و جذب آب تحت تأثیر قرار گرفته و بهبود یافتند [۱۶].

یکی دیگر از عوامل بهبود عملکرد در الیاف، اصلاح سطح الیاف می‌باشد. در واقع خصوصیات سطح الیاف، بر تمایل آنها به جذب افزودنی‌های مختلف شیمیایی تأثیر می‌گذارد. جذب و ماندگاری پلی‌الکترولیت‌های افزودنی توسط ذرات موجود در سوسپانسیون کاغذسازی تحت تأثیر بار الکترواستاتیکی قرار دارد. ظرفیت تبادل یونی الیاف چوب می‌تواند ناشی از وجود گروه‌های اسیدی باشد [۱۷]. این گروه‌های اسیدی ممکن است گروه‌های کربوکسیلی (COOH) باشند. گروه کربوکسیل یک گروه عاملی قابل یونی شدن است که از نظر شیمی پایانه تر به‌دلیل اثر آن بر بار سطحی الیاف اهمیت خاص دارد. این گروه در حین تخریب قلیایی سبب تولید گروه‌های اسیدکربوکسیلیک در انتهای احیاکنندهٔ زنجیره‌های سلولزی می‌گردد. همچنین در تیمارهای اکسایشی خمیرکاغذ نیز این گروه‌ها ایجاد می‌شوند. گروه‌های کربوکسیل یونیزه شده آنیونی، محل‌های جذب خوبی برای دیگر مولکول‌ها هستند و هر چه درصد گروه کربوکسیل الیاف بیشتر باشد تأثیر بیشتری در جذب و ماندگاری برخی الکترولیت‌ها خواهد شد [۱۸]. یکی از روش‌های کاربردی جهت ایجاد و افزایش گروه‌های کربوکسیل الیاف فرآیند تیمار با پروکسید هیدروژن در محیط قلیایی است. در شرایط قلیایی، پراکسید هیدروژن تجزیه شده و یون پرهیدروکسیل (HOO^-) تشکیل می‌شود [۱۹]. مکانیسم واکنش و تبدیل پروکسید هیدروژن در محیط قلیایی به‌صورت رابطهٔ زیر است [۲۰]:

$$H_2O_2 + OH^- \rightarrow H_2O + HOO^-$$

این یون‌های پرهیدروکسیل با کربن سطح الیاف سلولزی واکنش داده و گروه‌های کربوکسیل را تشکیل می‌دهند. با تیمار الیاف با پروکسید هیدروژن و تشکیل گروه‌های کربوکسیلی در الیاف، پیوندپذیری الیاف با الیاف و همچنین ماندگاری مواد روی سطح الیاف افزایش یافته و سبب بهبود برخی خواص کاغذ می‌گردد.

با توجه به اهمیت روز افزون استفاده از لیگنین، بررسی قابلیت‌های لیگنین به‌عنوان یک مادهٔ افزودنی در ساخت کاغذ و مقوا ضروری می‌باشد. از این‌رو در این تحقیق، امکان استفاده از لیگنین در بهبود ویژگی‌های کاغذهای بسته‌بندی بررسی شد.

۲. روش‌شناسی پژوهش

۲-۱. مواد

ورق‌های خمیرکاغذ الیاف بلند کرافت وارداتی و رنگبری شده از کارخانهٔ چوب و کاغذ مازندران تهیه شد. لیگنو سولفونات سدیم ($C_{20}H_{24}Na_2O_{10}S_2$) با وزن مولکولی ۵۳۴/۵ گرم بر مول از شرکت سیگما آلدریچ تهیه شد. هیدروکسید سدیم (با درصد خلوص ۹۹ درصد) (NaOH) و پروکسید هیدروژن (با درصد خلوص ۳۵ درصد) (H_2O_2) از شرکت مرک تهیه شدند.

۲-۲. آماده‌سازی خمیرکاغذ الیاف بلند

خمیرکاغذ الیاف بلند کرافت به‌منظور آماده‌سازی و استفاده در آزمایش، مطابق با استاندارد T200 sp-01 آیین‌نامهٔ TAPPI تحت پالایش قرار گرفت. فرآیند پالایش الیاف توسط دستگاه پالایشگر مدل IDM ساخت اتریش برای دست‌یابی به درجه روانی ۲۵۰±۲۵ میلی‌لیتر انجام شد. سپس درصد رطوبت مواد اولیه با استفاده از رابطهٔ زیر محاسبه شد:

$$Mc = \frac{Mh - Md}{Mh} \times 100$$

که در آن M_c درصد رطوبت نمونه‌ها، M_h وزن مرطوب مواد اولیه و M_d وزن خشک مواد است. از الیاف آماده شده کاغذ دست‌ساز با وزن پایه۶۰±۵ گرم بر متر مربع، مطابق با استاندارد شمارهٔ T205 sp-02 آیین‌نامهٔ TAPPI ساخته شد.

۲-۳. اصلاح سطحی و پوشش‌دهی کاغذ دست‌ساز

پس از ساخت کاغذ دست‌ساز و قبل از پرس، سطح الیاف و کاغذهای ساخته شده با روش اکسیداسیون، اصلاح شد. برای انجام تیمار اکسایشی روی سطح الیاف دو محلول هیدروکسید سدیم و پراکسید هیدروژن ۳ درصد آماده شد. از آنجا که هیدروکسید سدیم در دمای حدود ۴۰ درجهٔ سانتی‌گراد عملکرد بهتری در اکسیداسیون دارد، محلول آماده شده در حمام آب گرم با دمای ۴۰ درجهٔ سانتی‌گراد قرار داده شده تا دمای محلول هیدروکسید سدیم تثبیت شود. pH محلول هیدروکسید سدیم حدود ۱۱ بود. پس از تثبیت دما، محلول روی سطح الیاف اسپری شد. بعد از گذشت زمان ۲ دقیقه محلول پراکسید هیدروژن بر سطح الیاف اسپری شد. سپس کاغذهای دست‌ساز تحت پرس قرار گرفتند. پرس سرد به‌وسیلهٔ دستگاه پرس آزمایشگاهی با فشار ۵۰ پوند بر اینچ مربع و طی دو مرحله با دو زمان ۲ دقیقه و ۵ دقیقه انجام شد.

جهت آماده‌سازی محلول پوشش لیگنوسولفونات در دو غلظت ۲/۵ و ۵ درصد، پودر لیگنوسولفونات در آب دیونیزه مخلوط و به‌مدت ۱۰ دقیقه در دمای محیط با همزن مگنت‌دار هم‌زده شد. با توجه به اینکه لیگنوسولفونات کاملاً محلول در آب است، قابلیت اسپری شدن توسط ظروف اسپری را داشت. در ادامه کاغذ دست‌ساز به‌مدت ۲۴ ساعت روی صفحات و بین حلقه‌های پلاستیکی تحت اثر یک وزنه به آرامی و بدن ایجاد چروک هوا خشک شدند.

۲-۴. آزمون ویژگی‌های فیزیکی، مقاومتی و ممانعتی کاغذهای دست‌ساز

ویژگی مقاومتی و ممانعتی کاغذهای شاهد و پوشش داده شده مطابق آیین‌نامهٔ TAPPI بررسی شد. ویژگی‌های مقاومتی و فیزیکی شامل مقاومت کششی، مقاومت به پاره شدن، مقاومت به ترکیدن کاغذ، دانسیته و ضخامت، مقدار خاکستر و زبری سطح به‌ترتیب مطابق با استانداردهای T494 om-01، T414 om-04، T403 om-04، T411 om-05، T-211 om-93 و T555 om-04 انجام شد. همچنین ویژگی‌های ممانعتی کاغذهای دست‌ساز شامل جذب آب (cobb) و مقاومت به عبور هوا به‌ترتیب مطابق با استانداردهای T441 om-04 و T460 om-02 مورد بررسی قرار گرفتند.

۲-۵. طیف‌سنجی مادون قرمز تبدیل فوریه (FTIR)

جهت بررسی ساختار شیمیایی مواد از طیف زیر قرمز تبدیل فوریه (FTIR) استفاده شد. طیف نمونه‌ها با دستگاه طیف سنج زیر قرمز تبدیل فوریه مدل Cary 630، ساخت شرکت Aglient آنالیز شد.

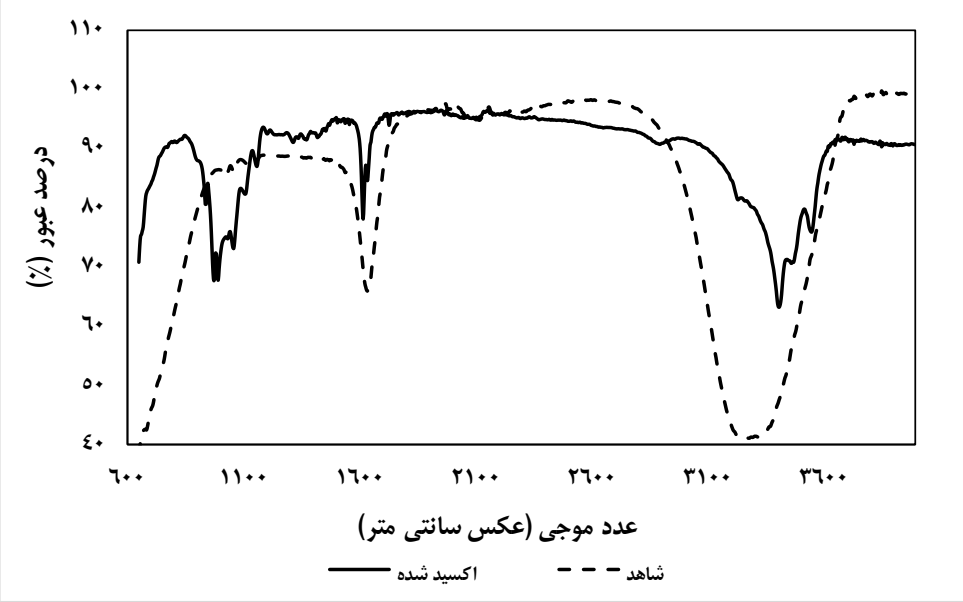
۲-۶. تجزیه‌وتحلیل آماری

جهت تجزیه‌وتحلیل آماری این پژوهش از نرم‌افزار SPSS استفاده شد و داده‌ها به‌صورت آزمایشات فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با استفاده از روش تجزیه واریانس مورد تحلیل آماری قرار گرفتند. مقایسهٔ بین نمونه‌ها و تیمارهای مختلف براساس گروه‌بندی میانگین‌ها و به روش آزمون دانکن انجام شد.

۳. یافته‌های پژوهش و بحث

۳-۱. طیف‌سنجی مادون قرمز تبدیل فوریه (FTIR)

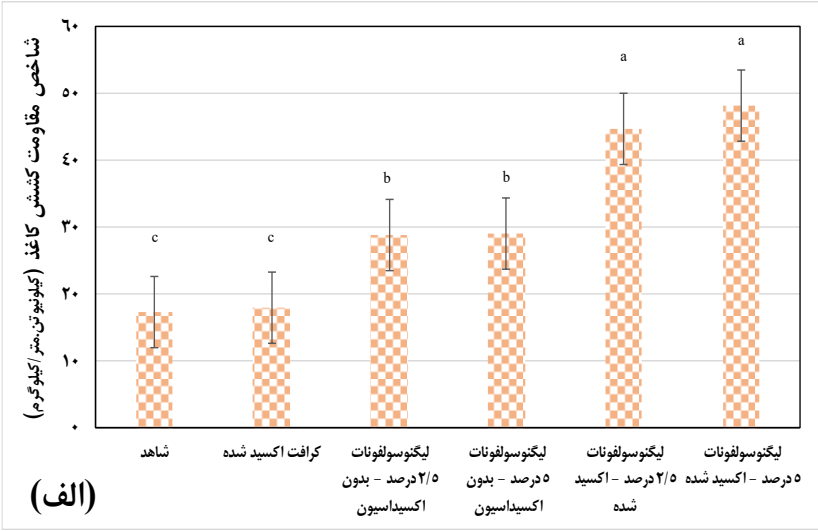
شکل ۱ طیف‌سنجی مادون قرمز تبدیل فوریه (FTIR) الیاف بلند کرافت و الیاف اکسید شده را نشان می‌دهد. جهت بررسی تغییرات ناشی از واکنش‌های شیمیایی در ساختار و گروه‌های عاملی در الیاف کرافت قبل و بعد از فرآیند اکسایش از طیف سنجی زیر قرمز تبدیل فوریه استفاده شد. پیک‌هایی در محدودهٔ عکس سانتی‌متر ۱۰۵۹ و ۳۴۱۴-۳۳۱۱ به‌ترتیب مربوط به پیوند کششی ارتعاشی کربن–اکسیژن–کربن و گروه هیدروکسیل آزاد می‌باشد [۲۱]. پیک در محدودهٔ ۲۹۰۰ عکس سانتی‌متر مربوط به گروه کششی کربن–هیدروژن است [۲۲]. پیک در محدودهٔ ۱۶۴۰ مربوط به پیوند گلکوزیدیک بین واحدهای سلولز می‌باشد. در پیک سلولز اکسید شده با پراکسید هیدروژن یک پیک جدید در ناحیهٔ حدود ۱۷۴۰ عکس سانتی‌متر مشاهده می‌شود که مربوط به گروه کربوکسیل و پیوند دوگانه کششی ارتعاشی C=O می‌باشد [۲۲، ۲۳].

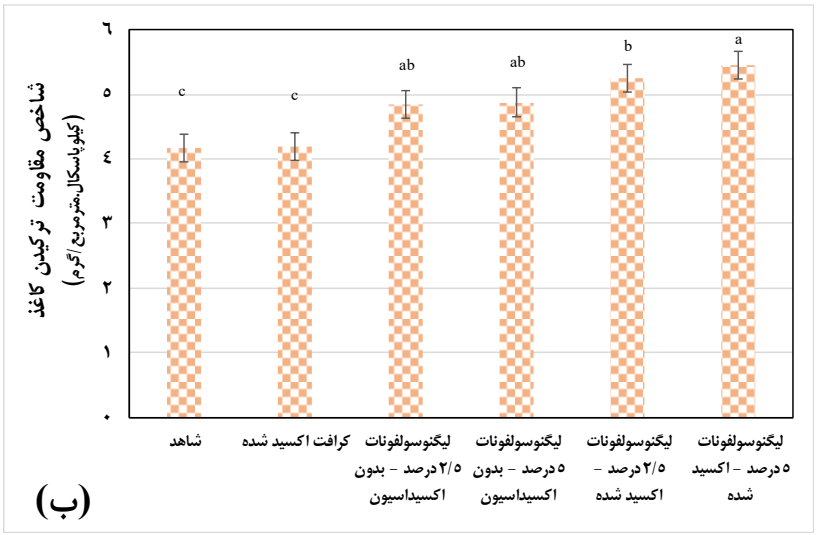


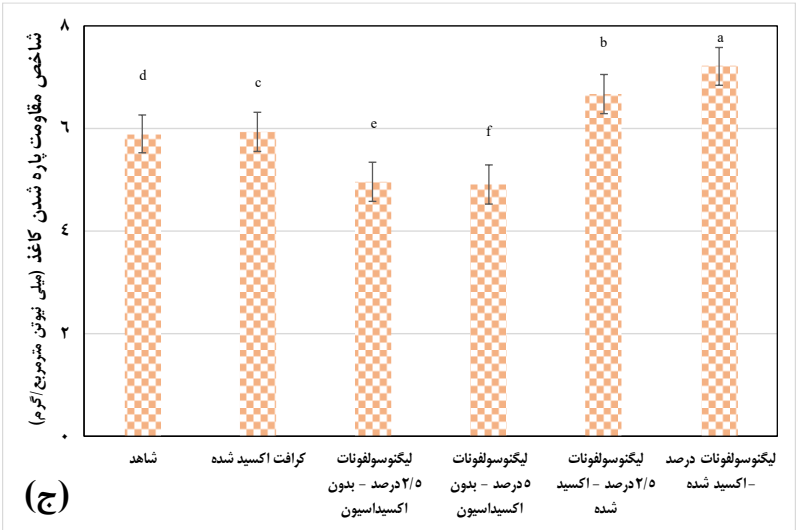
شکل ۱. طیف FTIR الیاف کرافت شاهد و اکسید شده با پروکسید هیدروژن

۳-۲. ویژگی‌های مقاومتی

شکل ۲ ویژگی‌های مقاومتی کاغذهای شاهد، شاهد با اکسیداسیون سطحی و پوشش‌دهی شده با لیگنوسولفونات، شامل شاخص مقاومت کشش، ترکیدن و پاره شدن کاغذ را نشان می‌دهد. بیشترین شاخص مقاومت کشش کاغذ مربوط به نمونه کاغذ اصلاح شده با تیمار سطحی اکسیداسیونی و پوشش‌دهی شده با لیگنوسولفونات ۵ درصد است. جدول ۱ نتایج حاصل از داده‌های آماری و تجزیه واریانس ویژگی‌های مقاومتی در نمونه‌ها را نشـان می‌هد. تجزیه واریانس داده‌های مقاومت کشـش در نمونه‌های مختلف ن شان داد که در سطح اعتماد ۹۵ در صد دارای اختلاف معنی‌دار ه ستند. همچنین برر سی داده‌ها با آزمون دانکن ن شان داد که داده‌ها در سه گروه قرار دارند. بیشترین مقدار شاخص مقاومت ترکیدن کاغذ مربوط به نمونه کاغذ ا صلاح شده با تیمار سطحی اکسیداسیونی و پوشش‌دهی شده با لیگنوسولفونات ۵ درصد است. تجزیه واریانس داده‌های مقاومت ترکیدن در نمونه‌های مختلف ن شان داد که در سطح اعتماد ۹۵ در صد دارای اختلاف معنی‌دار ه ستند. همچنین برر سی داده‌ها با آزمون دانکن ن شان داد که داده‌ها در سه گروه قرار دارند. همچنین بیشترین مقدار شاخص مقاومت پاره شدن کاغذ مربوط به نمونهٔ کاغذ اصلاح شده با تیمار سطحی اکسیداسیونی و پوشش‌دهی شده با لیگنوسولفونات ۵ درصد است. تجزیه واریانس داده‌های مقاومت پاره شدن کاغذ در نمونه‌های مختلف نشان داد که در سطح اعتماد ۹۵ درصد دارای اختلاف معنی‌دار هستند. همچنین بررسی داده‌ها با آزمون دانکن نشان داد که داده‌ها در شش گروه قرار دارند. شاخص‌های مقاومتی در نمونه‌های تحت تیمار اکسیداسیون، افزایش بیشتری نسبت به نمونه‌های بدون اکسیدا سیون ن شان داد. اکسیدا سیون سبب ایجاد گروه‌های عاملی سطحی مانند گروه‌های کربوکسیلی روی سطح الیاف شده و در نتیجه واکنش‌پذیری و ایجاد پیوند را افزایش می‌دهد [۲۴]. همچنین لیگنین دارای یک شبکهٔ چند پلیمری آروماتیک اسـت. این شـبکه شـامل واحدهای فنیل پروپان یا اتصـالات بین گروه‌های آروماتیک می‌باشـد. این موضـوع حرکت مولکول‌ها و افزایش دمای انتقال شی شه‌ای را محدود می‌کند و لیگنین را به انتخابی منا سب برای تقویت و بهبود در کاربردهای بسته‌بندی تبدیل می‌کند [۲۵]. Hasanjanzadeh و همکاران (۲۰۲۲) در پژوهشی با استفاده از ترکیب لیگنین سودا و فرماسل و نشاسته، کاغذهای لاینر را آهاردهی سطحی کردند. ویژگی‌های مقاومتی کاغذها شامل کشش و ترکیدن افزایش نشان داد [۱۰]. Han و Cho (۲۰۱۶) نیز تأثیر آهاردهی با لیگنین و ترکیب لیگنین با آلوم را بر خواص مقاومتی کاغذ کرافت مورد ارزیابی قرار دادند و برر سی مقاومت ک شش کاغذ افزایش ۲۴/۳ در صدی ن سبت به نمونه شاهد ن شان داد [۱۵]. بنابراین می‌توان گفت که واکنش گروه‌های عاملی لیگنین و ایجاد پیوندهای عرضـی با نقاط واکنش‌پذیر الیاف سـلولزی و گروه‌های عاملی ایجاد شـده با فرآیند اکسیداسیون سطحی الیاف، می‌تواند عامل افزایش ویژگی‌های مقاومتی در نمونه‌های کاغذ دست‌ساز باشد.







شکل ۲. مقاومت کشش (الف)، ترکیدن (ب) و پاره شدن کاغذ (ج) در نمونه‌های شاهد و کاغذ با و بدون اکسیداسیون سطحی و پوشش‌دهی با لیگنوسولفونات

جدول ۱. تجزیه‌وتحلیل واریانس اثر تیمارها بر مقاومت به کشش، ترکیدن و پاره شدن نمونه‌ها

نوع تیمار	مقاومت کشش				
	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین متوسط	مقدار F	سطح معنی‌داری
	۲۴۵۵۲/۴۳۳	۵	۴۹۱۰/۴۸۷	۲۴۴۱۶۷/۸۳۸	۰/۰۰۰
نوع تیمار	مقاومت ترکیدن				
	۲/۵۹۳	۵	۰/۵۱۹	۹/۹۶۴	۰/۰۰۱
نوع تیمار	مقاومت به پاره شدن				
	۷/۴۵۳	۵	۱/۴۹۱	۱۹۸۷۵۹/۰۱۲	۰/۰۰۰

۳-۳. ویژگی‌های فیزیکی

جدول ۲ ویژگی‌های فیزیکی کاغذهای شاهد، شاهد با اکسیدا سیون سطحی و پو شش‌دهی شده با لیگنو سولفونات، شامل ضخامت، دانسیتهٔ ظاهری، مقدار خاکستر و زبری سطح کاغذ را نشان می‌دهد. همچنین گراماژ کاغذهای دست‌ساز گزارش شده است. کاغذ پایه با وزن ۶۰ گرم بر متر مربع در نظر گرفته شد. پس از تیمار سطحی کاغذها با محلول لیگنوسولفونات، با توجه به قرار گرفتن مواد روی سطح کاغذ، افزایش گراماژ در کاغذها م شاهده شد. بی شترین ضخامت کاغذ مربوط به نمونه کاغذ بدون تیمار سطحی اکسیدا سیونی و پو شش‌دهی شده با لیگنو سولفونات ۲/۵ در صد بود. جدول ۳ نتایج حا صل از داده‌های آماری و تجزیه واریانس ویژگی‌های فیزیکی در نمونه‌ها را نشان می‌هد. تجزیه واریانس داده‌های ضخامت در نمونه‌های مختلف نشان داد که در سطح اعتماد ۹۵ درصد دارای اختلاف معنی‌دار هستند. همچنین بررسی داده‌ها با آزمون دانکن نشان داد که داده‌ها در چهار گروه قرار دارند. پو شش سطحی کاغذهای دست ساز سبب افزایش ضخامت شد. در نمونه‌هایی که تیمار سطحی اکسیدا سیونی انجام شد، به‌علت ایجاد گروه‌های عاملی سطحی و افزایش پیوندها، افزایش ضخامت ن سبت به نمونه‌های بدون اکسیدا سیون کمتر و ن سبت به نمونهٔ شاهد بی شتر بود. بی شترین مقدار دان سیتهٔ ظاهری کاغذ مربوط به نمونه تیمار سطحی اکسیدا سیونی و پوشش‌دهی شده با لیگنوسولفونات ۵ درصد است. تجزیه واریانس داده‌های دانسیتهٔ ظاهری در نمونه‌های مختلف نشان داد که در سطح اعتماد ۹۵ درصد دارای اختلاف معنی‌دار هستند. بررسی داده‌ها با آزمون دانکن نشان داد که داده‌ها در پنج گروه قرار دارند. بیشترین مقدار خاکستر در نمونه‌های کاغذ مربوط به نمونه کاغذ اصلاح شده با تیمار سطحی اکسیداسیونی و پوشش‌دهی شده با لیگنو سولفونات ۵ در صد ا ست. تجزیه واریانس داده‌های مقدار خاکستر کاغذ در نمونه‌های مختلف ن شان داد که در سطح اعتماد ۹۵ درصد دارای اختلاف معنی‌دار هستند. بررسی داده‌ها با آزمون دانکن نشان داد که داده‌ها در چهار گروه قرار دارند. لیگنین بازیابی شده حاوی مواد موجود در لیکور سیاه مانند کربوهیدراتهای تخریب شده و یا نمک‌های معدنی می‌باشد. به‌همین دلیل میزان خاکستر به عنوان شاخص مطلوبیت و کارایی لیگنین بازیابی شده محسوب می‌گردد [۲۶]. لذا در کاغذهای تیمار شده با لیگنو سولفونات افزایش مقدار خاکستر م شاهده شد. بی شترین و کمترین مقادیر زبری سطح کاغذ به‌ترتیب مربوط به نمونه کاغذ شاهد و اصلاح شده با تیمار سطحی اکسیداسیونی و پوشش‌دهی شده با لیگنوسولفونات ۵ درصد است. تجزیه واریانس داده‌های زبری سطح کاغذ در نمونه‌های مختلف ن شان داد که در سطح اعتماد ۹۵ در صد دارای اختلاف معنی‌دار هستند. بررسی داده‌ها با آزمون دانکن نشان داد که داده‌ها در شش گروه قرار دارند. Maximova و همکاران (۲۰۰۱) نیز نتیجه مشابهی را گزارش کردند [۲۷]. نتایج حاصل از بررسی زبری سطح کاغذ نشان داد که پس از پوشش‌دهی کاغذ با لیگنوسولفونات، زبری سطح کاهش یافته است. پوشش سطحی موجب بهبود صافی سطح کاغذ شده و به‌دلیل پر شدن منافذ سطح کاغذ و ایجاد لایه‌ای نازک در سطح کاغذ این نتیجه حاصل شده است [۲۸]. ذرات لیگنین با قرارگیری در بین منافذ کاغذ باعث بهبود صافی سطح کاغذ شده که در نهایت موجب بهبود در کیفیت چاپ کاغذهای بسته‌بندی می‌گردد [۲۵]. همچنین نتایج ن شان داد که مقدار بی شتر پو شش سبب عملکرد بهتر در ایجاد صافی سطح شد. Elyasi و Jalali (۲۰۱۷) نیز به نتیجه م شابهی د ست یافتند و اعلام کردند که ایجاد پوشش در سطح کاغذ سبب بهبود صافی و کاهش زبری سطح می‌گردد [۲۸].

جدول ۲. گراماژ، ضخامت، دانسیتهٔ ظاهری، مقدار خاکستر و زبری در نمونه‌های کاغذ دست‌ساز شاهد با و بدون اکسیداسیون سطحی و پوشش‌دهی با لیگنوسولفونات

	لیگنوسولفونات ۵ درصد- اکسیدشده	لیگنوسولفونات ۲/۵ درصد- اکسیدشده	لیگنوسولفونات ۵درصد- بدون اکسید	لیگنوسولفونات ۲/۵ درصد- بدون اکسید	شاهد - اکسیدشده	شاهد
گراماژ (گرم بر مترمربع)	۶۳/۹	۶۳/۱۲	۶۲/۵	۶۱/۴۶	۶۰/۵۹	۶۰/۸
ضخامت (میکرومتر)	۱۰۶/۱^{c}	۱۰۸/۲^{c}	۲۷۵/۳^{b}	۲۷۹/۵^{a}	۱۰۱/۰۴^{d}	۱۰۲/۳^{d}
دانسیتهٔ ظاهری (کیلوگرم/مترمکعب)	۶۰۲/۲۶^{a}	۵۸۳/۳۶^{c}	۲۲۷^{d}	۲۱۹/۹^{e}	۵۹۹٫۶۶^{b}	۵۹۴/۳۳^{b}
خاکستر (درصد)	۳/۷^{a}	۳/۳۹^{b}	۲/۴۷^{c}	۲/۴۳^{c}	۰/۸^{d}	۰/۸۵^{d}
زبری سطح (میکرومتر)	۸/۴۲^{f}	۸/۷۱^{e}	۹/۱۵^{d}	۹/۲۳^{c}	۹/۵۴^{b}	۹/۶۷^{a}

جدول ۳. تجزیه‌وتحلیل واریانس اثر تیمارها بر ضخامت، دانسیتهٔ ظاهری، خاکستر و زبری سطح نمونه‌ها

نوع تیمار	ضخامت				
	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین متوسط	مقدار F	سطح معنی‌داری
	۱۱۹۹۲۲/۵۷۷	۵	۲۳۹۸۴/۵۱۵	۱۸۹۱۶۸۰/۷۷۴	۰/۰۰۰
نوع تیمار	دانسیته ظاهری				
	۲۷۸/۱۶۱	۵	۵۵/۳۶۲	۱۶۸۴۹۲/۴۷۷	۰/۰۰۰
نوع تیمار	خاکستر				
	۲۷/۶۶۰	۵	۵/۵۳۲	۱۷۷۸۱۳/۱۶۹	۰/۰۰۰
نوع تیمار	زبری سطح				
	۳/۴۴۸	۵	۰/۶۹۰	۸۸۶۵۹۸/۱۷۱	۰/۰۰۰

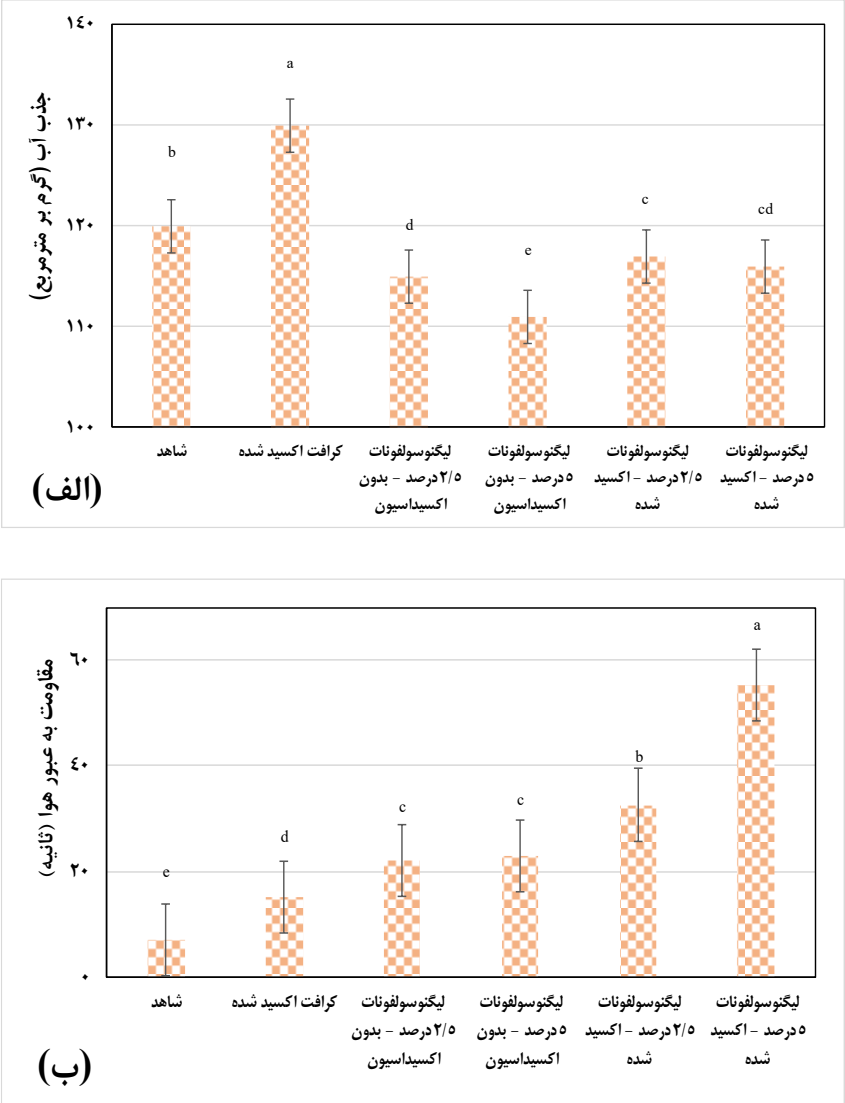
۳-۴. ویژگی‌های ممانعتی

شکل ۳ ویژگی‌های ممانعتی کاغذهای شاهد، شاهد با اکسیداسیون سطحی و پوشش‌دهی شده با لیگنوسولفونات، شامل جذب آب و مقاومت به عبور هوا را نشان می‌دهد. بیشترین جذب آب مربوط به نمونهٔ کاغذ شاهد و بدون تیمار سطحی اکسیداسیونی و کمترین آن مربوط به نمونهٔ پوشش‌دهی شده با لیگنوسولفونات ۵ درصد است. جدول ۴ نتایج حاصل از داده‌های آماری و تجزیه واریانس ویژگی‌های ممانعتی در نمونه‌ها را نشان می‌دهد. تجزیه واریانس داده‌های جذب آب در نمونه‌های مختلف نشان داد که در سطح اعتماد ۹۵ درصد دارای اختلاف معنی‌دار هستند. بررسی داده‌ها با آزمون دانکن نشان داد که داده‌ها در پنج گروه قرار دارند. به‌طور کلی پوشش‌دهی با لیگنوسولفونات سبب کاهش جذب آب شد. لیگنوسولفونات‌های حاوی گروه‌های هیدروکسیل، متوکسیل، کربوکسیل، کربونیل و سولفونات هستند که این مواد را قادر به تشکیل پیوندهای هیدروژنی می‌کند [۲۹]. وجود این پیوندهای هیدروژنی می‌تواند مکان‌های واکنش را مسدود کرده و بر کاهش جذب آب اثرگذار باشد [۲۴]. از آنجا که اکسیداسیون سطحی سبب ایجاد گروه‌های عاملی سطحی و با واکنش‌پذیری بیشتر می‌شود، جذب آب و واکنش با مولکول‌های آب را افزایش می‌دهد. لذا نمونه بدون اکسیداسیون سطحی الیاف و با مقدار بیشتر لیگنوسولفونات عملکرد بهتری نسبت به ممانعت به آب نشان داد. برخلاف سایر لیگنین‌های صنعتی مانند لیگنین قلیایی که حلالیت کمی در آب دارد، گروه‌های سولفونیک که عمدتاً در طول خمیرسازی سولفیت در موقعیت کربن α متصل می‌شوند، به لیگنوسولفونات اجازه می‌دهند در شرایط خنثی یا نسبتاً اسیدی محلول باشد. گروه‌های سولفونات (SO^{3-})، یک گروه یونی بسیار قطبی است که باعث افزایش برهم‌کنش لیگنوسولفونات با محیط آبی و افزایش حلالیت آن می‌شود [۳۰، ۳۱]. بیشترین مقدار مقاومت به عبور هوا در کاغذ مربوط به نمونه با تیمار سطحی اکسیداسیونی و پوشش‌دهی شده با لیگنوسولفونات ۵ درصد است. تجزیه واریانس داده‌های مقاومت به عبور هوا در نمونه‌های مختلف نشان داد که در سطح اعتماد ۹۵ درصد دارای اختلاف معنی‌دار هستند. بررسی داده‌ها با آزمون دانکن نشان داد که داده‌ها در پنج گروه قرار

دارند. Hasanjanzadeh و همکاران (۲۰۲۲) نیز به نتیجهٔ مشابهی دست پیدا کردند. آنها تأیید کردند که استفاده از ۱۰۰ درصد لیگنین در آهاردهی سطحی کاغذ، نفوذپذیری به هوا را نسبت به نمونه شاهد ۷ درصد کاهش داده است [۱۰].

جدول ٤. تجزیه‌وتحلیل واریانس اثر تیمارها بر جذب آب و مقاومت به عبور هوا نمونه‌ها

نوع تیمار	جذب آب				
	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین متوسط	مقدار F	سطح معنی‌داری
	۱۹۳۳/۵۴۸	۵	۳۸۶/۷۱۰	۱۷۸۸۹/۴۲۱	۰/۰۰۰
نوع تیمار	مقاومت به عبور هوا				
	۴۲۱۶/۵۶۳	۵	۸۴۳/۳۱۳	۶۰۹۶۲۳/۵۶۳	۰/۰۰۰



شکل ۳. جذب آب (الف) و مقاومت به عبور هوا (ب) در نمونه‌های شاهد و کاغذ با و بدون اکسیداسیون سطحی و پوشش‌دهی با لیگنوسولفونات

۴. نتیجه‌گیری

هدف از این پژوهش پوشش‌دهی سطحی کاغذ با لیگنوسولفونات سدیم به‌عنوان یک مشتق طبیعی و زیست‌تخریب‌پذیر لیگنین بود. همچنین تأثیر اکسیداسیون سطحی الیاف بر جذب مواد پوشش‌دهی و ویژگی‌های مقاومتی، فیزیکی و ممانعتی کاغذ دست‌ساز مورد ارزیابی قرار گرفت. با توجه به نتایج حاصل از این پژوهش، پوشش لیگنوسولفونات موجب افزایش شاخص کشش، ترکیدن و پاره شدن در کاغذهای دست‌ساز شد. همچنین ویژگی‌های ممانعتی کاغذها شامل ممانعت به جذب آب و مقاومت به نفوذپذیری به هوا در نمونه‌های دارای پوشش بهبود نشان داد. همچنین ویژگی‌های فیزیکی کاغذهای دارای پوشش نشان می‌دهد که لیگنوسولفونات سبب عملکرد بهتر در کاهش زبری سطح کاغذ و بهبود صافی سطح شد. بنابراین با توجه به فراوانی تولید لیگنین در کارخانه‌های کاغذسازی و امکان جداسازی و استفاده از آن در کاغذ، می‌توان این ماده را به‌عنوان گزینه‌ای مناسب برای استفاده در صنعت کاغذ در نظر گرفت، تا اینکه بتوان از آن در کاربردهایی با ارزش افزوده بیشتر استفاده کرد.

ملاحظات اخلاقی

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این پژوهش علمی رعایت نمودهاند و این موضوع مورد تأیید آنهاست.

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

حامی مالی

حمایت مالی از این پژوهش از طرف دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، دانشکدهٔ مهندسی چوب و فرآورده‌های سلولزی در قالب پژوهانهٔ رساله دانشجویی خانم سید شیدا شفیعی و همچنین هزینهٔ شخصی دکتر نورالدین نظرنژاد انجام شده است.

مشارکت نویسندگان

نویسنده اول: دانشجو: تهیه و آماده‌سازی نمونه‌ها، انجام آزمایش‌ها و گردآوری داده‌ها، انجام محاسبات، تحلیل و تفسیر اطلاعات و نتایج، تهیهٔ پیش‌نویس مقاله

نویسنده دوم: استاد راهنمای رساله، طراحی فازهای پژوهش به تفکیک، نظارت بر مراحل انجام پژوهش، بررسی و کنترل نتایج، تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها، اصلاح، بازبینی و نهایی‌سازی مقاله

نویسنده سوم: استاد مشاور رساله، طراحی مقدماتی پژوهش، نظارت بر مراحل مقدماتی پژوهش، کمک در بازبینی مقاله

نویسنده چهارم: استاد مشاور رساله، مشارکت در طراحی پژوهش، نظارت بر روش‌های مرتبط با مباحث شیمیایی پژوهش

بیانیه دسترسی به داده‌ها

داده‌های پژوهش حاضر از طریق درخواست از نویسندگان قابل دسترسی است.

References

[1] Zhang, Y., Wang, H., Sun, X., Wang, Y. & Liu Z. (2021). Separation and characterization of biomass components (Cellulose, Hemicellulose, and Lignin) from corn stalk. *Bioresources*, 16(4), 7205-7219. https://doi.org/10.15376/biores.16.4.7205-7219

[2] Ghorbani, M., Loebner, F., Herwijnen, H. W. G., Pfungen, L., Krahofer, M., Budvaj, E. & Konnerth, J. (2016). Lignin phenol formaldehyde resoles: the impact of lignin on adhesive properties. *Bioresources*, 11(3), 6727-6741. https://doi.org/10.15376/biores.11.3.6727-6741

[3] Cao, C., Shao, L., Lucia, L.A. & Liu, Y. (2021). Fabrication of magnetic lignin-based adsorbent for removal of methyl orange dye from aqueous solution. *Bioresources*, 16(3), 5436–5449. https://doi.org/10.15376/biores.16.3.5436-5449

[4] Vidal, C., Carrillo-Varela, I., Reyes-Contreras, P., Gutierrez, L. & Teixiera Mendonca, R. (2021). Sulfomethylation of Radiata pine kraft lignin and its use as a molybdenite depressant in selective chalcopyrite-molybdenite separation by floatation. *Bioresources*, 16(3), 5646-5666. https://doi.org/10.15376/biores.16.3.5646-5666

[5] Mandalkar, N., Cayla, A., Rault, F., Giraud, S., Salaun, F., Mallucelli, G. & Guan, J. P. (2018). An Overview on the Use of Lignin and Its Derivatives in Fire Retardant Polymer Systems. In: Poletto, M., Ed., Lignin: Trends and Applications, *IntechOpen, London*, 207-231.

[6] Antonsson, S., Henriksson, G., Johansson, M. & Lindstrom, E.M. (2008). Low Mw-lignin fractions together with vegetable oils as available oligomers for novel paper-coating applications as hydrophobic barrier. *Industrial Crops and Products*, 27, 98–103. https://doi.org/ 10.1016/j.indcrop.2007.08.006

[7] Khorasani, Z., Abdolkhani, A., Hamzeh, Y., Momenbeik, F. & Hedjazi, S. (2019). Extraction of lignin with lignoboost process and production of water-soluble sulfonated derivatives from lignin of bagasse soda black liquor. *Iranian Journal of Wood and Paper Industries*, 10(4), 237-247. (In Persian)

[8] Zhu, W., Westman, G. & Theliander, H. (2014). Investigation and Characterization of Lignin Precipitation in the LignoBoost Process. *Journal of Wood Chemistry and Technology*, 34, 77-97. https://doi.org/10.1080/02773813.2013.838267

[9] Kaco, H., Waznah, Kh., Jaafar, N. & Gan, Y.S. (2017). Preparation and characterization of Fe_3O_4 / Regenerated cellulose membrane. *Sains Malaysiana*, 46(4), 623-628.

[10] Hasanjanzadeh, H., Hedjazi, S., Hamzeh, Y. & Abdolkhani, A. (2022). The potential of replacing the starch with soda and formacell lignins in surface sizing and evaluation of physical and mechanical properties of produced liner papers. *Iranian Journal of Wood and Paper Industries*, 12(4), 453-464. (In Persian)

[11] Honnold, V. (2009). Developments in the sourcing of raw materials for the production of paper. United States international trade commission. *Journal of International Commerce and Economics. USA Trade Commission*. 26p.

[12] Thakur, V.K., Thakur, M.K., Raghavan, P. & Kessler, M.R. (2014). Progress in green polymer composites from lignin for multifunctional applications: A Review. *ACS Sustainable Chemistry Engineering*, 2, 1072–1092. https://doi.org/10.1021/sc500087z

[13] Younesi, H., Kazemi Najafi, S., Behrooz, R. & Pizzi, A. (2015). Investigation Changes in Structure and Thermal Properties of Glyoxalated Soda and Kraft Lignins. *Journal of Forest and Wood Product*, 68(1), 169-179. [In Persian]

[14] Agrawal, A., Kaushik, N. & Biswas, S. (2014). Derivatives and applications of lignin. *The SciTech Journal*, 1(7), 30-36.

[15] Han, K. M. & Cho, B. U. (2016). Effect of surface sizing of black liquor on properties of corrugated medium. *BioResources*, 11(4), 10391-10403. https://doi.org/10.15376/biores.11.4.10391-10403

[16] Kopacic, S., Ortner, A., Guebitz, G., Kraschitzer, T., Leitner, J. & Bauer, W. (2018). Technical Lignins and Their Utilization in the Surface Sizing of Paperboard. *Industrial Engineering of Chemistry Research*, 57(18), 6284-6291. https://doi.org/10.1021/acs.iecr.8b00974

[17] Ekhtera, M. H., Rezayati Charani, P., Ramezani, O. & Azad Fallah, M. (2008). Effects of poly-aluminum chloride, starch, alum and rosin on the rosin sizing, strength and microscopic appearance of paper prepared from old corrugated container (OCC) pulp. *BioResources*, 3(2), 383–402. https://doi.org/10.15376/biores.3.2.383-402

[18] Hamzeh, Y. & Rostampour, M. (2008). The paper chemistry. Tehran University publication, Tehran, 424 p. [In Persian]

[19] Mehri Iraie, H., Ghasemian, A., Resalati, H., Saraeyan, A.R. & Akbarpour, I. (2014). Investigation on Bleaching of Mixed Old Newspaper and Magazine Deinked Pulp with Hydrogen Peroxide. *Journal of Forest and Wood Products*, 67(3), 503-516. [In Persian]

[20] Zeinaly, F. & Dehghani, M. R. (2013). A Comparison between Alkali Peroxide and Activated Peroxide Processes in Bleaching Hardwoods Chemi-mechanical Pulp. *Iranian Journal of Wood and Paper Industries*, 3(2), 91-103. [In Persian]

[21] Liu, K., Nasrallah, J., Chen, L., Huang, L. & Ni, Y. (2015). Preparation of CNC-dispersed Fe_3O_4 nanoparticles and their application in conductive paper. *Carbohydrate Polymers*, 126, 175-178. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2015.03.009

[22] Haniffa, M. A. C. M., Ching, Y. C., Chuah, C. H., Ching, K. Y., Nazri, N., Abdullah, L. C. & Nai-Shang, L. (2017). Effect of TEMPO – oxidization and rapid on thermo – structural properties of nanocellulose. *Carbohydrate Polymers*, 173, 91-99. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2017.05.084

[23] Habibi, Y., Chanzy, H. & Vignon, M. R. (2006). TEMPO-mediated surface oxidation of cellulose whiskers. *Cellulose*, 13, 679-687. https://doi.org/10.1007/s10570-006-9075-y

[24] Rezanezhad, Sh., Nazarnezhad, N., Resalati, H. & Zabihzadeh, S.M. (2022). Characterization of magnetic bio-nanocomposites of nanocrystalline cellulose (NCC) coated on paper surface. *BioResources*, 17(3), 4607-4622. https://doi.org/10.15376/biores.17.3.4607-4622

[25] Mousavi N., Nazarnezhad N., Asadpour Gh., Ramamoorthy S.K. & Zamani, A. (2021). Ultrafine friction grinding of lignin for development of starch biocomposite films. *Polymers*, 13, 1-16. https://doi.org/10.3390/polym13122024

[26] Mousavi, N., Nazarnezhad, N. & Asadpour, Gh. (2021). Recovery of lignin from Kraft black liquor by oxygen and carbondioxide pretreatment from hardwood Kraft black liquor. *Iranian Journal of Wood and Paper Industries*, 12(2), 235-246. [In Persian]

[27] Maximova, N., Österberg, M., Koljonen, K. & Stenius, P. (2001). Lignin adsorption on cellulose fibre surfaces: Effect on surface chemistry, surface morphology and paper strength. *Cellulose*, 8, 113-125. https://doi.org/10.1023/A:1016721822763

[28] Elyasi, Sh. & Jalali Torshizi, H. (2017). The effect of concentration of anionic starch solution in paper surface sizing on physical and strength properties of recycled paper. *Iranian Journal of Wood and Paper Industries*, 7(4), 487-497. [In Persian]

[29] Lugovitskaya, T.N. & Naboychenko, S.S. (2020). Lignosulfonates as charge carriers and precursors for the synthesis of nanoparticles. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 602, 125127. https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2020.125127

[30] Selvik, V.M., Aachmann, F.L., Salas-Bringas, C. & Eikemo, V. (2026). Unravelling the Complexity of Lignosulfonates Fractionation and Physicochemical Profiling. *Biomacromolecules*, 27, 917-929. https://doi.org/10.1021/acs.biomac.5c02229

[31] Brienza, F., Cannella, D., Montesdeoca, D., Cybulska, I. & Debecker, D.P. (2024). A guide to lignin valorization in biorefineries: traditional, recent, and forthcoming approaches to convert raw lignocellulose into valuable materials and chemicals. *RSC Sustainability*, 2, 37-90. https://doi.org/10.1039/d3su00140g