Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

Journal of Wood and Forest Science and Technology

Print ISSN: 2322-2077
Online ISSN: 2322-2786

(OPEN ACCESS)

Improvement of printability features of Iranian writing paper with biodegradable coatings

Jafar Ebrahimpour Kasmani[*1], Ahmad Samariha[2]

1. Corresponding Author, Associate Prof., Department of Wood and Paper, Sava.C., Islamic Azad University, Savadkooh, Iran. E-mail: kasmani@iau.ac.ir
2. Assistant Prof., Department of Engineering Sciences, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran. E-mail: asamariha@tvu.ac.ir

Article Info

Article type:
Full Length Research Paper

Article history:
Received: 09.19.2025
Revised: 11.07.2025
Accepted: 11.08.2025

Keywords:
Biodegradable,
Coating,
Printability,
Writing paper

ABSTRACT

Background and Objectives: Writing and printing paper is valued in the printing industry for its whiteness, gloss, air resistance, and favorable printability. However, domestically produced paper often requires improvement in color uniformity, surface roughness, and physical properties, which are critical factors for print quality. This study aimed to enhance the physical and printing properties of writing and printing paper from the Mazandaran Wood and Paper Company by applying biodegradable coatings of nanographene, zein, and fluorine.

Materials and Methods: A 70 $g.m^{-2}$ writing and printing paper was used as the base substrate. For the coating, nanographene, zein, and fluorine were individually weighed and combined with styrene-butadiene latex at specified weight percentages. According to the treatment conditions, the materials were mixed in a blender at 1500 rpm for 20 minutes to create a homogeneous mixture, ensuring uniform distribution on the paper surface. Before testing, both control (uncoated) and coated samples were conditioned in a standard environment (20 °C and 65% relative humidity). The evaluated properties included thickness, ash content, air permeability, roughness, opacity, whiteness, brightness, gloss, optical density, and print adhesion.

Results: The coating process increased the paper's thickness, ash content, air permeability, whiteness, gloss, and optical density compared to the control sample. In contrast, opacity and brightness decreased, suggesting a trade-off for enhanced visual qualities. When used separately, the coating materials also reduced surface roughness, which can positively influence print quality. The results showed that the air resistance of the sample coated with graphene, zein, and fluorine increased by approximately 35 times, while the ash content in the zein-coated sample was about 5.96 times lower than the control. The opacity of the fluorine-coated sample decreased by 3.7%. Furthermore, the zein-coated sample exhibited a 45.5% increase in whiteness, and the sample coated with both zein and nanographene demonstrated a 431% increase in gloss. Adhesion testing demonstrated excellent cohesion between the coated layer and the flexo ink, as both

layers were completely removed with the paper substrate, indicating strong bonding and potential for high print durability.

Conclusion: This study confirms that coatings incorporating nanographene, zein, and fluorine can significantly enhance the physical and printing properties of writing paper. The notable improvements in gloss, whiteness, and air permeability make the coated paper particularly suitable for book printing. These findings can guide the design and production of high-quality papers, adding greater value to Iran's printing and paper industry.

Cite this article: Ebrahimpour Kasmani, Jafar, Samariha, Ahmad. 2026. Improvement of printability features of Iranian writing paper with biodegradable coatings. *Journal of Wood and Forest Science and Technology*, 32 (4), 129-150.

© The Author(s).
DOI: 10.22069/jwfst.2025.24090.2129
Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

نشریه پژوهش‌های علوم و فناوری چوب و جنگل

شاپا چاپی: ۲۳۲۲-۲۰۷۷
شاپا آنلاین: ۲۳۲۲-۲۷۸۶

بهبود ویژگی‌های چاپ‌پذیری کاغذ تحریر ایرانی با پوشش‌دهی به‌وسیله مواد زیست‌تخریب‌پذیر

جعفر ابراهیم‌پور کاسمانی*[۱]، احمد ثمریها[۲]

۱. نویسنده مسئول، دانشیار گروه چوب و کاغذ، واحد سوادکوه، دانشگاه آزاد اسلامی، سوادکوه، ایران. رایانامه: kasmani@iau.ac.ir
۲. استادیار گروه علوم مهندسی، دانشگاه ملی مهارت، تهران، ایران. رایانامه: asamariha@tvu.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مقاله کامل علمی- پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۶/۲۸
تاریخ ویرایش: ۱۴۰۴/۰۸/۱۶
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۱۷

واژه‌های کلیدی:
پوشش‌دهی،
چاپ‌پذیری،
زیست‌تخریب‌پذیر،
کاغذ تحریر

چکیده

سابقه و هدف: کاغذ تحریر به دلیل ویژگی‌هایی مانند رنگ سفید، براقیت، مقاومت در برابر عبور هوا و چاپ‌پذیری مطلوب، یکی از اصلی‌ترین انواع کاغذ مورد استفاده در صنعت چاپ به شمار می‌رود. بااین‌حال، نمونه‌های تولید داخل کشور از نظر یکنواختی رنگ، زبری سطح و ویژگی‌های فیزیکی نیازمند بهبود هستند، عواملی که می‌توانند بر کیفیت چاپ تأثیرگذار باشند. در این پژوهش، با هدف ارتقای ویژگی‌های فیزیکی و چاپ‌پذیری کاغذ چاپ و تحریر تولیدی شرکت چوب و کاغذ مازندران، از پوشش‌دهی با مواد زیست‌تخریب‌پذیر شامل نانوگرافن، زئین و فلورین استفاده شد.

مواد و روش‌ها: برای این منظور، کاغذ چاپ و تحریر با گراماژ ۷۰ گرم بر مترمربع تهیه و مورد آزمون‌های مختلف قرار گرفت. به‌منظور اندود سطح کاغذ، ابتدا نانوگرافن، زئین و فلورین به همراه لاتکس استایرن- بوتادین با درصدهای وزنی مشخص به‌طور جداگانه توزین شدند. سپس، بر اساس شرایط تیمار، مواد در دستگاه مخلوط‌کن با سرعت چرخش ۱۵۰۰ RPM به‌مدت ۲۰ دقیقه مخلوط شدند تا مخلوطی همگن حاصل شود. این فرآیند به‌منظور حصول اطمینان از توزیع یکنواخت مواد در سطح کاغذ انجام شد. قبل از انجام آزمون‌ها، نمونه‌های شاهد و نمونه‌های پوشش داده‌شده در شرایط محیطی استاندارد (دمای ۲۰ درجه سلسیوس و رطوبت نسبی ۶۵٪) قرار گرفتند. ویژگی‌های مورد بررسی در این پژوهش شامل ضخامت، خاکستر، مقاومت به عبور هوا، زبری، ماتی، سفیدی، روشنی، براقیت، دانسیته نوری و چسبندگی بودند. این ویژگی‌ها به‌دقت اندازه‌گیری شدند تا تأثیر پوشش‌دهی بر کیفیت کاغذ به‌طور کامل مورد ارزیابی قرار گیرد.

یافته‌ها: نتایج نشان داد که پوشش‌دهی باعث افزایش ضخامت، خاکستر، مقاومت به عبور هوا، سفیدی، براقیت و دانسیته نوری شد. به‌طوری‌که در مقایسه با نمونه شاهد، این ویژگی‌ها به‌طور

قابل‌توجهی بهبود یافتند. درحالی‌که نسبت به نمونه شاهد کاهش ماتی و روشنی مشاهده شد، این نتایج نشان‌دهنده این است که پوشش‌دهی تأثیر مثبت بر کیفیت ظاهری کاغذ دارد. در مواردی که از مواد پوششی به‌صورت مجزا استفاده شده است، میزان زبری نیز کاهش یافته است که به‌نوبه خود می‌تواند روی کیفیت چاپ تأثیر بگذارد. به‌عبارتی‌دیگر، مقاومت به عبور هوا در نمونه پوشش داده‌شده با گرافن، زئین و فلورین حدود ۳۵ برابر نسبت به نمونه شاهد افزایش یافت. هم‌چنین، مقدار خاکستر در نمونه پوشش داده‌شده با زئین نسبت به نمونه شاهد ۵/۹۶ برابر کم‌تر را بود که نشان‌دهنده بهبود کیفیت کاغذ است. ماتی نمونه پوشش داده‌شده با فلورین نسبت به نمونه شاهد ۳/۷ درصد کاهش را نشان داد. هم‌چنین، نمونه پوشش داده‌شده با زئین نسبت به نمونه شاهد ٤٥/٥ درصد افزایش سفیدی و نمونه پوشش داده‌شده با زئین و نانوگرافن نسبت به نمونه شاهد ٤٣١ درصد افزایش براقیت را نشان داد. میزان چسبندگی لایه پوشش داده‌شده و مرکب فلکسو اعمال‌شده عالی است، زیرا هر دو لایه همراه با سطح کاغذ (زیرآیند) توسط چسب به‌طور کامل کنده می‌شوند. این ویژگی نشان‌دهنده توانایی بالای این نوع پوشش در حفظ انسجام و کیفیت چاپ است.

نتیجه‌گیری: این پژوهش نشان می‌دهد که استفاده از نانوگرافن، زئین و فلورین به‌عنوان پوشش‌دهنده می‌تواند بهبود قابل‌توجهی در ویژگی‌های فیزیکی و چاپ‌پذیری کاغذ تحریر ایجاد کند. به‌خصوص، افزایش براقیت، سفیدی و مقاومت به عبور هوا، این کاغذ را به گزینه‌ای مناسب‌تر برای چاپ کتاب تبدیل می‌کند. به‌طورکلی، این نتایج می‌تواند به طراحی و تولید کاغذهای با کیفیت بالا کمک کند و به صنعت چاپ و کاغذ ایران ارزش افزوده بیش‌تری ببخشد.

استناد: ابراهیم‌پور کاسمانی، جعفر، ثمریها، احمد (۱۴۰۴). بهبود ویژگی‌های چاپ‌پذیری کاغذ تحریر ایرانی با پوشش‌دهی به‌وسیله مواد زیست‌تخریب‌پذیر. *نشریه پژوهش‌های علوم و فناوری چوب و جنگل*، ۳۲ (۴)، ۱۵۰-۱۲۹.
DOI: 10.22069/jwfst.2025.24090.2129

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان
© نویسندگان.

مقدمه

در دنیای امروز، با افزایش نگرانی‌ها نسبت به تأثیرات منفی مواد غیرقابل تجزیه بر محیط زیست، توجه به استفاده از مواد پایدار و زیست‌تخریب‌پذیر به‌طور قابل‌توجهی افزایش یافته است. یکی از حوزه‌های کلیدی که در این زمینه مورد توجه قرار گرفته، صنعت کاغذ و چاپ است. کاغذ به‌عنوان یکی از پرکاربردترین مواد در زندگی روزمره، از کتاب‌ها و مجلات گرفته تا بسته‌بندی و تبلیغات، نقش اساسی در جامعه ایفا می‌کند. بااین‌حال، کیفیت و ویژگی‌های چاپ‌پذیری کاغذهای تحریر ایرانی، به‌خصوص در مقایسه با استانداردهای جهانی، نیازمند بهبود است (۱).

کاغذ تحریر که در ایران با نام بین‌المللی "Writing and Printing Paper" شناخته می‌شود، معمولاً به دو دسته اصلی، یعنی "اندود شده" و "اندود نشده" تقسیم می‌شود. نوع "اندود نشده" آن به‌طور عمده در ایران تولید می‌شود و کاربرد اصلی آن در صنعت چاپ و تحریر است. این کاغذ بیش‌تر برای چاپ انواع کتاب‌ها و مجلات مورد استفاده قرار می‌گیرد و سهم قابل‌توجهی از بازار داخلی را به خود اختصاص داده است.

کاغذ تحریر معمولاً دارای سطح با بافت چندقسمتی و حفره‌دار است که این ویژگی باعث می‌شود جوهر به‌راحتی جذب بافت کاغذ شود و کیفیت چاپ و ماندگاری آن افزایش یابد. چاپ‌پذیری، یکی از ویژگی‌های کلیدی کاغذ است که به‌طور مستقیم بر کیفیت نهایی چاپ تأثیر می‌گذارد. این ویژگی به عوامل مختلفی مانند جذب جوهر، یکنواختی سطح و ضخامت کاغذ بستگی دارد (۲). بهبود این ویژگی‌ها می‌تواند به افزایش رضایت مشتریان، کاهش هزینه‌های تولید و بهبود کیفیت نهایی آثار چاپی منجر شود.

پژوهش‌های متعددی در زمینه بهبود ویژگی‌های کاغذ تحریر و افزایش کیفیت چاپ انجام شده است. به‌عنوان‌مثال، پژوهش‌ها نشان داده‌اند که استفاده از پوشش‌های خاص می‌تواند به بهینه‌سازی خشک شدن مرکب و کاهش جذب آب کمک کند (۳). به‌علاوه، استفاده از مواد زیست‌تخریب‌پذیر مانند نانوگرافن و زئین به‌عنوان پوشش‌دهنده‌های مؤثر، می‌تواند خواص مکانیکی و حرارتی کاغذ را بهبود بخشد و اثرات منفی بر محیط‌زیست را کاهش دهد (٤). با وجود مزایای بالقوه استفاده از این مواد، چالش‌هایی نیز در این مسیر وجود دارد. هزینه‌های بالای تولید و نیاز به پژوهش و توسعه بیش‌تر در زمینه بهینه‌سازی فرآیندهای تولید، از جمله این چالش‌ها هستند (۵). اما با توجه به توجه روزافزون جامعه به مسائل محیط‌زیستی، تولید کاغذهای تحریر با ویژگی‌های بهبود یافته و اثرات زیست‌محیطی کم‌تر می‌تواند به افزایش محبوبیت این کاغذها در بازار کمک کند.

پوشش زئین ذرت به‌عنوان یک لایه مؤثر در ممانعت از نفوذ اکسیژن و رطوبت عمل می‌کند. فیلم حاصل از زئین در شرایط خشک دارای ضریب نفوذپذیری به رطوبت بسیار پایین‌تری نسبت به بسیاری از پوشش‌های پلیمری متداول از جمله پلی‌اتیلن با دانسیته بالا و پایین و نایلون است. مطالعات نشان داده‌اند که کاغذهای پوشش داده‌شده با زئین، خاصیت ممانعتی بیش‌تری در برابر رطوبت و چربی نسبت به لایه‌های پلی‌اتیلنی ایجاد می‌کنند و ازاین‌رو می‌توانند در بسته‌بندی‌های سریع مواد غذایی مانند بسته‌بندی ساندویچ در رستوران‌ها مورد استفاده قرار گیرند.

افزون بر این، پوشش‌های زئین از نظر زیست‌محیطی مزایای قابل‌توجهی دارند، زیرا در فرآیند بازیافت کاغذ اختلال ایجاد نمی‌کنند و نیازی به جداسازی لایه پروتئینی از بستر کاغذ وجود ندارد.

این ویژگی، زئین را به گزینه‌ای مناسب برای جایگزینی پلی‌اولفین‌ها در کاربردهای بسته‌بندی سازگار با محیط‌زیست تبدیل کرده است (٦).

طبق پژوهش‌های انجام‌شده، از گرافن می‌توان برای تولید انواع کاغذهای عملکردی، از جمله کاغذهای ضدباکتری و مقاوم به رطوبت و حرارت استفاده کرد. گرافن از زمان کشف آن در سال ۲۰۰٤، به دلیل ویژگی‌های مکانیکی و فیزیکی استثنایی از جمله استحکام بالا، انعطاف‌پذیری و رسانایی حرارتی و الکتریکی، مورد توجه گسترده پژوهش‌گران قرار گرفته است. مطالعات نشان داده‌اند که مشتقات گرافن، مانند اکسید گرافن و اکسید گرافن احیاشده، دارای خواص ضدمیکروبی بوده و می‌توانند رشد باکتری‌ها را مهار کنند. افزودن نانوگرافن به ترکیب کاغذ می‌تواند موجب افزایش استحکام مکانیکی، کاهش وزن و بهبود مقاومت در برابر آب و آتش گردد (۷).

فلورین دارای خاصیت آب‌گریزی است و استفاده از آن در پوشش‌دهی کاغذ موجب کاهش تخلخل سطح و افزایش مقاومت در برابر نفوذ رطوبت می‌شود (۸). به‌کارگیری ترکیبات فلورینی در فرمولاسیون پوشش، علاوه بر بهبود خاصیت ضد لک و دوام در برابر عوامل محیطی، سبب افزایش مقاومت سطحی و پایداری ظاهری کاغذ می‌گردد. از نظر منابع معدنی، فلورین (CaF_2) یکی از کانی‌های نسبتاً فراوان در ایران است و در استان‌های شمالی به‌ویژه مازندران ذخایر قابل‌توجهی از آن گزارش شده است.

بررسی‌های انجام‌شده در این پژوهش نشان داد که کاغذ تحریر مورد استفاده، دارای رنگ متمایل به نخودی و ناهمگنی سطحی بوده است که این ویژگی‌ها می‌تواند در فرآیند چاپ تأثیر منفی بر کیفیت نهایی اثر بگذارد.

این مسائل باعث شده است که ناشران و چاپخانه‌ها تمایل کم‌تری به استفاده از کاغذهای داخلی داشته باشند و به دنبال جایگزین‌های بهتری باشند. بهبود ویژگی‌های چاپ‌پذیری کاغذ تحریر ایرانی با پوشش‌دهی به‌وسیله مواد زیست‌تخریب‌پذیر، می‌تواند به ارتقاء کیفیت کاغذ و کاهش اثرات منفی زیست‌محیطی ناشی از استفاده از مواد سنتزی منجر شود. این رویکرد می‌تواند به‌عنوان یک راهکار مؤثر در راستای دستیابی به مواد چاپی با کیفیت بالا و پایدار در نظر گرفته شود. بنابراین، پژوهش‌ها در این زمینه می‌تواند به توسعه کاغذهای تحریر با خواص بهبود یافته و اثرات مثبت بر محیط‌زیست منجر شود.

روش تحقیق

کاغذ پایه: کاغذ چاپ و تحریر مورد استفاده از شرکت چوب و کاغذ مازندران تهیه شد. جرم پایه این کاغذ ۷۰ گرم بر مترمربع بود.

نانو گرافن: نانوگرافن نوع AO-4 از شرکت گرافن سوپرمارکت (Graphene Supermarket) ایالات‌متحده آمریکا تهیه شد. برخی از مشخصات آن در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱- مشخصات نانو گرافن.

Table 1. Characteristics of nanographene.

ویژگی Feature	سطح ویژه (مترمربع بر گرم) Specific Surface Area (m^2/g)	رنگ Color	خلوص (درصد) Purity (%)	ضخامت میانگین (نانومتر) Average Thickness (nm)	قطر ذرات (نانومتر) Particle Diameter (nm)	مساحت سطح (مترمربع بر گرم) Surface Area (m^2/g)
	More than 15	Black	99.5	60	3-18	300

پروتئین زئین: پروتئین زئین (پروتئین ذرت) از شرکت سیگما آلدریچ تهیه شد. مشخصات آن در جدول ۲ ارائه شده است.

فلورین: فلورین از گروه تولیدی معدن کاوان تهیه شد. مشخصات فلورین در جدول ۳ نشان داده شده است.

جدول ۲- مشخصات پروتئین زئین.

Table 2. Characteristics of zein protein.

ویژگی Feature	رنگ Color	درصد پروتئین خام Crude Protein Percentage (%)	درصد فیبر خام Crude Fiber Percentage (%)	درصد خاکستر Ash Percentage (%)	میزان اوره (میلی‌گرم بر کیلوگرم) Urea Content (mg/kg)
	Yellow	55	10	3	Negative

جدول ۳- مشخصات فلورین.

Table 3. Characteristics of fluorine.

ویژگی Feature	دی‌اکسید تیتانیوم TiO_2	منیزیم Mg	اکسید سدیم Na_2O	اکسید آلومینیوم Al_2O_3	سیلیس SiO_2	فسفر P	اکسید آهن Fe_2O_3	کلسیم Ca	تری‌اکسید گوگرد SO_3	فلوئوریت CaF_2
	>0.01	0.2	0.1	0.1	0.65	0.01>	0.1	51	0.1	96.17

رزین آکریل آمید: رزین بر پایه آکریل آمید (SH-305) از شرکت سیماب رزین با مشخصات مندرج در جدول ٤ تهیه شد.

لاتکس پلی‌وینیل استات: چسب پلی‌وینیل استات شرکت چسب و رزین شمال که مشخصات آن در جدول ٤ خلاصه شده است.

پراکنده‌ساز: پراکنده‌ساز (D200) از شرکت سیماب رزین با پایه شیمیایی پلی‌کربوکسیلات و حلال آبی تهیه شد. این ماده به‌عنوان عامل پراکندگی ذرات در فرمول پوشش استفاده گردید، مشخصات در جدول ٤ آورده شده است.

نشاسته کاتیونی: نشاسته کاتیونی حاصل از گیاه تاپیوکا از کارخانه چوب و کاغذ مازندران با مشخصات مندرج در جدول ٤ تهیه شد.

مرکب چاپ: مرکب چاپ فلکسوگرافی S با رنگ ارغوانی در حلال‌های ایزوپروپانول و اتیل استات به نسبت ۱ به ۲ تا ۱ به ۳ از شرکت بهروفران تهیه گردید.

جدول ٤- مشخصات رزین آکریل آمید، پراکنده‌ساز، چسب پلی‌وینیل استات و نشاسته کاتیونی.

Table 4. Characteristics of acrylamide resin, Disperser, Polyvinyl acetate latex and Cationic Starch.

ویژگی Feature	رزین اکریلامید رزین اکریلیک (SH-305) Acrylic Resin (SH-305)	پراکنده‌ساز Disperser	چسب پلی‌ونیل استات Polyvinyl acetate latex	نشاسته کاتیونی Cationic Starch
رنگ Color	شیری‌رنگ Milky	نارنجی متمایل به زرد Orange Yellow	-	-
وضعیت ظاهری Appearance Status	مایع Liquid	-	-	-
نوع Type	خود- اتصال‌شونده Self-crosslink	-	-	-
ویژگی امولسیونی Emulsifying Property	آنیونی Anionic	-	-	کاتیونی Cationic
مقدار مواد جامد (درصد) Solid Content (%)	50	42	-	-
قلیاییّت pH	6-8	7.5	7	6
دمای انتقال شیشه‌ای (°C) Tg (°C)	-2	-	-	-
ویسکوزیته (سانتی‌پوآز) Viscosity (cp)	10000	-	-	-
چگالی (گرم بر سانتی‌مترمکعب) Density (g/cm^3)	-	-	0.96	-
نقطه اشتعال (°C) Flash Point (°C)	-	-	-8	-
نقطه ذوب (°C) Melting Point (°C)	-	-	-93	-
مقدار پروتئین (درصد) Protein content (%)	-	-	-	کم‌تر از ۱ less than 1
مقدار نیتروژن (درصد) Nitrogen content (%)	-	-	-	0.25

پوشش‌دهی کاغذ پایه: برای پوشش‌دهی، ابتدا نانوگرافن، زئین و فلورین با درصدهای وزنی مشخص به‌طور جداگانه توزین شدند. بسته به شرایط تیمار، هر یک از مواد پوشش‌دهی به‌صورت مجزا و ترکیبی به‌مدت ۳۰ دقیقه در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد با ۱۰۰ گرم آب مقطر مخلوط شدند. سپس با افزودن ۲/۵ گرم لاتکس استایرن بوتادین و ۰/۵ گرم پراکنده‌ساز D200 از شرکت سیماب رزین، به‌مدت ۲۰ دقیقه مجدداً در داخل دستگاه مخلوط‌کن با دور گردش ۱۵۰۰ rpm برای به‌دقت آوردن یک مخلوط همگن ترکیب شدند.

در مرحله بعد، نشاسته کاتیونی پخته‌شده با غلظت ۵ درصد (براساس وزن خشک) به‌عنوان کمک‌نگهدارنده برای افزایش پوشش و دستیابی به توزیع یکنواخت‌تر ذرات روی سطح کاغذ به این ترکیب‌ها اضافه شد و عمل هم‌زدن ادامه یافت. نشاسته پس از فرآیند پخت در شرایط استاندارد، دارای ویسکوزیته حدود ۵۰۰ سانتی‌پوآز بود که

مطابق با دامنه مطلوب برای کاربردهای پوشش سطحی کاغذ است. لازم به ذکر است که نشاسته خام معمولاً دارای گرانروی حدود ۱۰۰۰ تا ۲۰۰۰ سانتی‌پوآز است که پس از پخت (۵–۱۰ دقیقه بخاردهی)، ویسکوزیته آن به حدود ۵۰۰ سانتی‌پوآز کاهش می‌یابد و برای عملیات پوشش‌دهی مناسب‌تر می‌شود. این ویژگی نقش کلیدی در یکنواختی لایه پوششی و بهبود نگهداری ذرات دارد. هم زدن مخلوط با استفاده از همزن مغناطیسی در دمای ۹۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۳۰ دقیقه ادامه یافت تا یکنواختی کامل حاصل شود.

محلول‌های پوششی آماده‌شده با استفاده از دستگاه Auto Bar Coater (GBC - A4 GIST Co., Ltd)، روی ورق‌های کاغذ اعمال شد. حجم ۲۷ میلی‌لیتر از محلول پوشش ازیک‌طرف روی کاغذ ریخته شد و سپس میله اپلیکاتور بلافاصله در طول سطح کاغذ کشیده شد. سرعت پوشش روی ۲۵ میلی‌متر بر ثانیه تنظیم گردید. ورق‌های کاغذ پوشش داده‌شده در دمای اتاق به‌مدت ٢٤ ساعت در معرض هوا خشک شدند. کدها و درصدهای خاص ترکیبات مورد استفاده در پوشش‌ها و تیمارها در جدول ۵ خلاصه شده است.

قبل از تعیین مشخصات، همه نمونه‌ها در دمای ۲۷ درجه سانتی‌گراد با رطوبت نسبی ٦٥ درصد به‌مدت حداقل ٢٤ ساعت طبق استاندارد ISO 187 قرار گرفتند.

جدول ۵- ترکیب کدها و شرایط تیمارها.

Table 5. Combination of codes and treatment conditions.

Treatment number	Treatment code	توضیحات Descriptions
1	CWP	کاغذ چاپ و تحریر شاهد Control Printing and writing
2	WPG	کاغذ چاپ و تحریر پوشش‌دهی شده با نانوگرافن Printing and writing Coated with Nanographene
3	WPZ	کاغذ چاپ و تحریر پوشش‌دهی شده با زئین Printing and writing Coated with Zein
4	WPF	کاغذ چاپ و تحریر پوشش‌دهی شده با فلورین Printing and writing Coated with Fluorine
5	WPZG	کاغذ چاپ و تحریر پوشش‌دهی شده با نانوگرافن و زئین Printing and writing Coated with Nanographene and Zein
6	WPFG	کاغذ چاپ و تحریر پوشش‌دهی شده با نانوگرافن و فلورین Printing and writing Coated with Nanographene and Fluorine
7	WPFZ	کاغذ چاپ و تحریر پوشش‌دهی شده با فلورین و زئین Printing and writing Coated with Fluorine and Zein
8	WPZFG	کاغذ چاپ و تحریر پوشش‌دهی شده با نانوگرافن و زئین و فلورین Printing and writing Coated with Nanographene, Zein, and Fluorine

اندازه‌گیری خواص کاغذ: برای تعیین ویژگی‌های فیزیکی، نوری و چاپ‌پذیری کاغذها از حداقل ۱۰ تکرار برای هر نمونه مطابق با دستورالعمل‌های استانداردهای زیر استفاده شد:

خواص فیزیکی شامل ضخامت (T411-Om89)، خاکستر (T441-Om96)، زبری (T555 om-04) و مقاومت به عبور هوا (استاندارد ملی ایران شماره ١٤٢٥)؛ خواص نوری شامل روشنی و سفیدی (ASTM D523)، ماتی (ASTM D589-97) و خواص چاپ‌پذیری شامل چسبندگی (ASTM 2010S) اندازه‌گیری شد.

برای اندازه‌گیری براقیت از دستگاه براقیت‌سنج نوع Ihara S900 Xrite PANTONE I1 BYK Gardner-Micro TRI Gloss واقع در پژوهشگاه رنگ استفاده شد. لازم به ذکر است که به‌منظور بررسی میزان براقیت، ابتدا فیلمی با ضخامت ٦ میکرون از مرکب فلسوگرافی روی کاغذها تهیه شد و سپس به کمک دستگاه براقیت‌سنج، میزان براقیت نمونه‌ها اندازه‌گیری گردید.

برای اندازه‌گیری دانسیته نوری چاپ، از دستگاه اسپکترودنسیتومتر مدل S900 (Ihara، ایالات‌متحده آمریکا) استفاده شد. دانسیته نوری صرفاً برای کاغذهایی محاسبه می‌شود که سطح آن‌ها با مرکب پوشش داده شده است. این ویژگی به‌صورت نسبت شدت نور بازتاب‌شده از سطح سفید کاغذ به شدت نور بازتاب‌شده از سطح چاپ‌شده (مشکی) تعریف می‌شود. مقدار دانسیته نوری بیانگر ضخامت لایه مرکب و یکنواختی شبکه پوشش بر روی سطح کاغذ است و نشان‌دهنده پیوستگی و چسبندگی بهتر بین زیرآیند کاغذ و مرکب چاپ محسوب می‌شود. این ویژگی تأثیر قابل‌توجهی بر کیفیت نسخه چاپ‌شده دارد، به‌طوری‌که مقادیر بین ۱ تا ۲ به‌عنوان محدوده قابل‌قبول در نظر گرفته می‌شوند.

آزمون چاپ با کشیدن فیلم مرکب چاپ فلیکسو پایه حلّال توسط اعمال‌گر مرکب با میله شماره ۸ در مؤسسه پژوهشی علوم و فناوری رنگ و پوشش انجام شد. مرکب چاپ فلیکسوگرافی S با رنگ ارغوانی در حلال‌های ایزوپروپانول و اتیل استات به نسبت ۱ به ۲ تا ۱ به ۳ از شرکت بهرونفران تهیه گردید.

محاسبات آماری: طرح آزمایشی مورد استفاده در این پژوهش، از نوع کاملاً تصادفی بوده و جهت پردازش نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌ها از نرم‌افزار SPSS (نسخه ۲۳) استفاده شد. به‌منظور تجزیه‌وتحلیل داده‌ها، از تجزیه واریانس یک‌طرفه و جهت مقایسه میانگین‌ها از آزمون دانکن در سطح اعتماد ۹۵ درصد بهره‌برداری گردید.

نتایج و بحث

برای بررسی اختلاف آماری بین میانگین خواص مورد بررسی، از آزمون تجزیه واریانس استفاده شد. مقدار F به‌دست‌آمده از این آزمون و سطح معنی‌داری در جدول ٦ آورده شده است.

جدول ٦- تجزیه واریانس (مقدار F و سطح معنی‌داری) اثر متغیرهای ساخت بر ویژگی‌های فیزیکی و نوری و چاپ‌پذیری.

Table 6. Analysis of variance (F value and significance level) of the effect of manufacturing variables on physical and optical properties and printability.

متغیرها Variables	ویژگی Feature
40.086*	ضخامت (µ) Caliper (µ)
613263.006*	خاکستر (٪) Ash (%)
4436970.840*	مقاومت به عبور هوا (S) Air permeability (S)
93.976*	زبری (µm) Roughness (µm)
39664.286*	ماتی (٪) Opacity (%)
3782719.232*	سفیدی (٪) Whiteness (%)
37608383.143*	روشنی (٪) Brightness (%)
16431508.071*	زردی (٪) Yellowness (%)
137595.000*	براقیت (٪) Gloss (%)
10.693*	دانسیته نوری Optical density

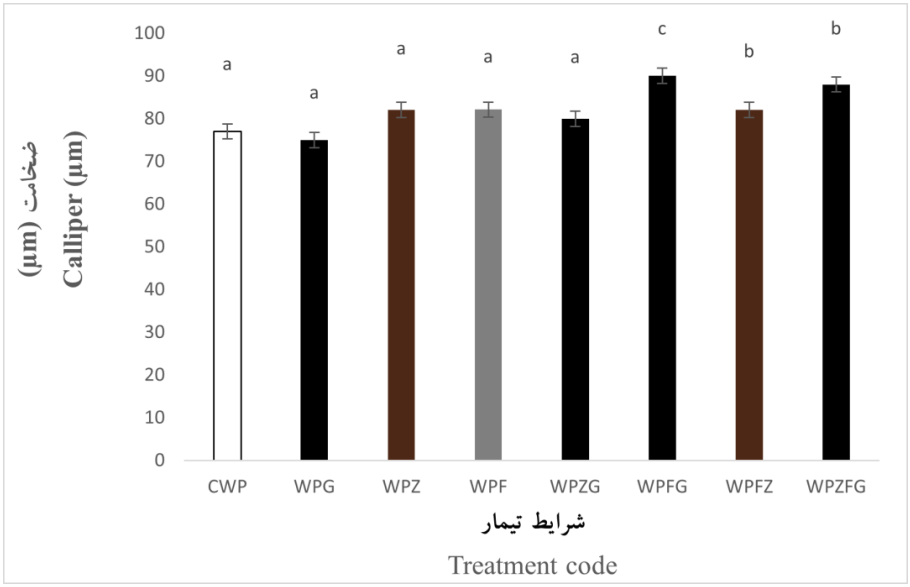
سطح معنی‌داری: * ۹۵٪، ns: عدم معنی‌داری

Significance Level: * 95% (P<0.05), ns: Not Significant

ضخامت: آنالیز واریانس یک‌طرفه نشان داد که بین مقادیر ضخامت ۸ نوع کاغذ مورد آزمون در سطح احتمال ٪۵ از نظر آماری اختلاف معنادار وجود دارد و مقادیر ضخامت در همه تیمارها در سه گروه قرار دارند. شکل ۱ میانگین تغییرات ضخامت را برای ۸ نوع کاغذ نشان می‌دهد.

شکل ۱ نشان می‌دهد که بیش‌ترین میزان ضخامت مربوط به کاغذ تحریر پوشش داده‌شده با نانوگرافن و فلورین است و کم‌ترین میزان آن متعلق به کاغذ تحریر پوشش داده‌شده با زئین و نمونه شاهد می‌باشد.

کاغذ به‌عنوان یک ساختار متخلخل با سطح ناصاف شناخته می‌شود. زمانی که از مواد پوششی به‌صورت مجزا استفاده می‌شود، نفوذ مواد به درون ساختار کاغذ محدود است و افزایش ضخامت قابل‌توجهی مشاهده نمی‌شود. اما هنگامی‌که از مواد پوششی به‌صورت ترکیبی استفاده می‌شود، فضاهای خالی داخلی و سطحی اشغال می‌گردد که در نتیجه ضخامت کاغذ بیش‌تر می‌شود. در ضخامت کاغذهای مورد بررسی تفاوت‌هایی ملاحظه شد که از دلایل آن می‌توان به تغییرات زیاد ضخامت کاغذ پایه در پروفیل عرضی آن اشاره کرد.

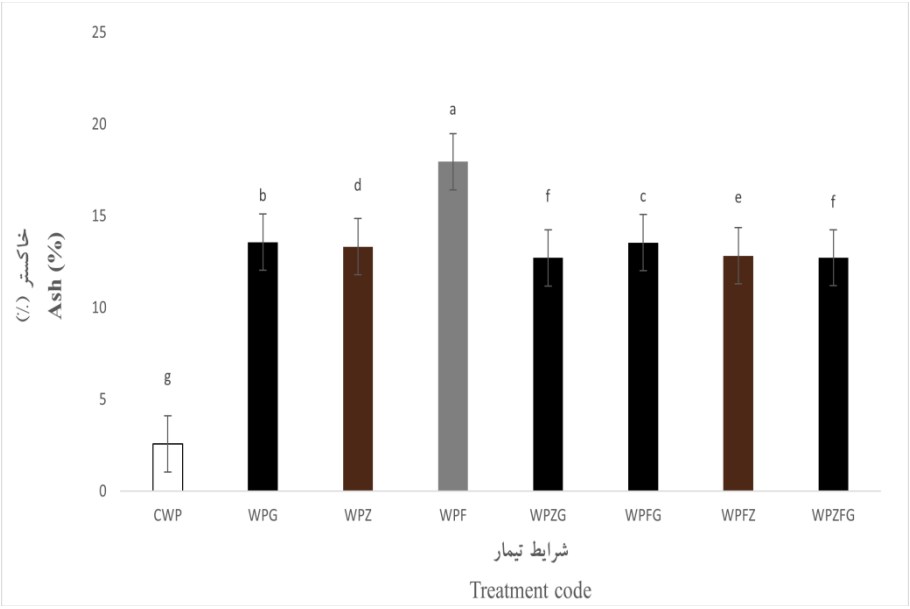


شکل ۱- مقایسه میانگین ضخامت کاغذهای مختلف.

Figure 1. Comparison of means caliper content of different papers.

خاکستر: آنالیز واریانس یک‌طرفه نشان داد که بین مقادیر خاکستر ۸ نوع کاغذ مورد آزمون در سطح احتمال ۵٪ از نظر آماری اختلاف معنادار وجود دارد و مقادیر خاکستر در هفت گروه قرار دارند. شکل ۲ میانگین تغییرات خاکستر را برای ۸ نوع کاغذ نشان می‌دهد.

شکل ۲ نشان می‌دهد که کم‌ترین میزان خاکستر مربوط به کاغذ تحریر شاهد است و بیش‌ترین میزان آن متعلق به کاغذ تحریر پوشش داده‌شده با فلورین است که این موضوع به دلیل ساختار این ماده معدنی می‌باشد.



شکل ۲- مقایسه میانگین خاکستر کاغذهای مختلف.

Figure 2. Comparison of means ash content of different papers.

مقاومت به عبور هوا: آنالیز واریانس یک‌طرفه نشان داد که بین مقادیر مقاومت به عبور هوا ۸ نوع کاغذ مورد آزمون در سطح احتمال ۵٪ از نظر آماری اختلاف معنادار وجود دارد و مقادیر مقاومت به عبور هوا در هشت گروه قرار دارند. شکل ۳ میانگین تغییرات مقاومت به عبور هوا را برای ۸ نوع کاغذ نشان می‌دهد.

شکل ۳ نشان می‌دهد که بیش‌ترین میزان مقاومت به عبور هوا مربوط به کاغذ تحریر پوشش داده‌شده با زئین، فلورین و نانوگرافن است و کم‌ترین میزان آن متعلق به نمونه شاهد می‌باشد.

آزمون تعیین مقاومت به عبور هوای کاغذها نشان داد که با پوشش‌دهی، این مقاومت به‌طور قابل‌توجهی افزایش می‌یابد، به‌طوری‌که برای کاغذهای تیمار شده، این مقاومت به‌اندازه‌ای افزایش یافت که توسط دستگاه مربوطه قابل‌اندازه‌گیری نبود. همان‌طور که قبلاً توضیح داده شد، ترشوندگی قسمت‌هایی از کاغذ که برای عدم جذب مرکب و چاپ با آب مرطوب می‌شوند (در چاپ افست) اهمیت زیادی در کیفیت چاپ و ثبات ابعادی کاغذ دارد. بنابراین این ویژگی نیز با عملیات پوشش‌دهی بهبود یافته است، ولی تعیین مقدار بهینه آن با توجه به نوع چاپ و هم‌چنین اندود صنعتی کاغذ میسر خواهد بود.

لازم به ذکر است که افزایش مقاومت به عبور هوا در نمونه پوشش داده‌شده با گرافن حدود ۳۵۸۷ درصد نسبت به نمونه شاهد افزایش نشان داد. افزایش مقاومت به عبور هوای کاغذهای پوشش‌دهی شده را می‌توان به عواملی مانند کاهش ابعاد الیاف از میکرو به نانو و افزایش سطح ویژه نانوالیاف مرتبط دانست. کاهش قطر و افزایش سطح ویژه نانوالیاف سبب تشکیل ساختاری متراکم‌تر و ایجاد سطح پیوند بسیار گسترده‌تر در ساختار کاغذ نسبت به نمونه شاهد می‌شود.

مظاهری موسوی و همکاران (۲۰۱۸) اثر نانوالیاف سلولز و کربوکسی متیل سلولز را به‌عنوان پوشش روی مقوا مورد مطالعه قرار دادند و گزارش کردند که مقاومت به عبور هوا پس از پوشش‌دهی افزایش می‌یابد (۹).

با افزایش مقدار نانومواد، مقاومت به عبور هوای کاغذ افزایش یافت که با نتایج تهمینلیوگلو و همکاران (۲۰۱۰) مطابقت داشت (۱۰) وجود نانوگرافن در محلول پوشش‌دهی سبب ایجاد مقاومت به عبور هوای بیش‌تر کاغذ شد. زیرا این ماده سبب پخش همگن مواد در سطح کاغذ می‌شود و در نتیجه با ایجاد یک فیلم یکنواخت، مقاومت به عبور هوای بهتری را در کاغذ ایجاد می‌کند که با نتایج (اصغر و همکاران، ۲۰۲۰) مطابقت دارد (۱۱).

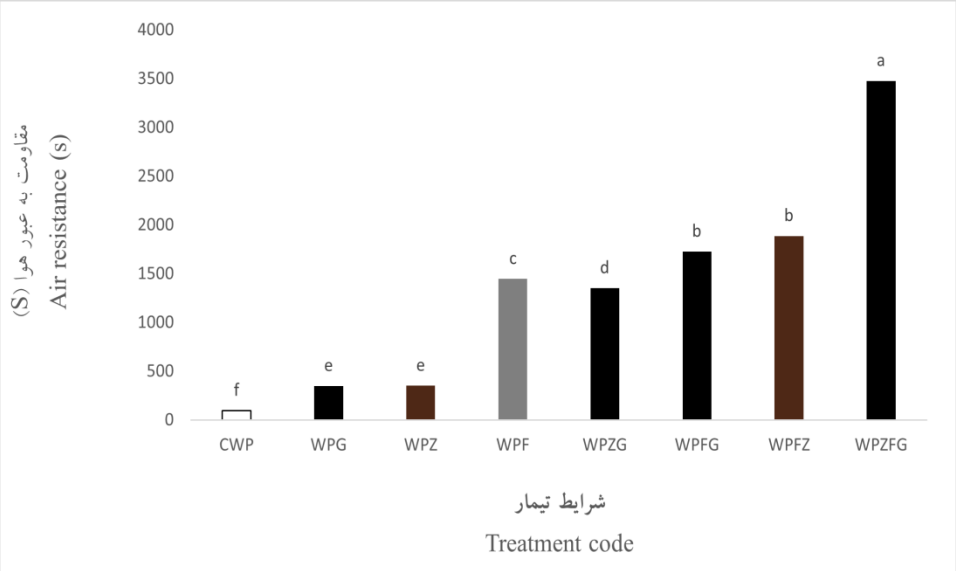
ترکیب مواد در فرایند پوشش‌دهی، به دلیل تشکیل یک لایه پلیمری در سطح کاغذ و ایجاد اتصال با الیاف سطح کاغذ و همچنین افزایش ضخامت کاغذ، منجر به افزایش مقاومت به عبور هوای کاغذها می‌گردد (۱۲).

علاوه بر درگیری مکانیکی بین پلیمرها با الیاف سلولزی که باعث افزایش مقاومت‌ها می‌گردد، امکان تشکیل پیوند هیدروژنی بین ترکیب‌های پوشش‌دهی با گروه‌های هیدروکسیل سطح و درون الیاف به دلیل وجود نانوگرافن افزایش می‌یابد؛ زیرا درهم‌رفتگی و پیوند شیمیایی بین سه ترکیب مورد استفاده در پوشش و هم‌چنین پیوند شیمیایی و درهم‌رفتگی مکانیکی آن‌ها با الیاف کاغذ، منجر به بهبود و افزایش مقاومت کاغذها گردیده است.

افزایش مقاومت به عبور هوای کاغذ پوشش داده‌شده به دلیل نفوذ مولکول‌های مواد پوششی به منافذ فیبری شبکه سلولزی است که منجر به تشکیل یک لایه نازک روی سطح مقوا می‌شود. این لایه با خواص مواد پوششی در ارتباط است تا ممانعت

مؤثری به عبور هوا فراهم کند (۱۳). استفاده از ترکیب مواد پوششی باعث نفوذ بیش‌تر محلول پوشش به بستر سلولزی می‌شود. با نفوذ بیش‌تر محلول پوشش، خلل و فرج بیش‌تری پر می‌شود (۱۱).

پس از خشک شدن کاغذ محلول پوشش، تشکیل فیلم یا لایه پلیمری یکنواختی سطح کاغذ را می‌پوشاند. این لایه پلیمری یکنواخت موجب افزایش مقاومت به عبور هوای کاغذ می‌شود. فرآیند پوشش‌دهی سبب می‌شود تا حفرات موجود در ساختار کاغذ پر شوند و یک لایه یکنواخت روی سطح کاغذ تشکیل شود. ازاین‌رو، پوشش‌دهی سطح کاغذ به‌عنوان یک سد ممانعتی در مقابل عبور هوا محسوب می‌شود (١٤).



شکل ۳- مقایسه میانگین مقاومت به عبور هوا کاغذهای مختلف.

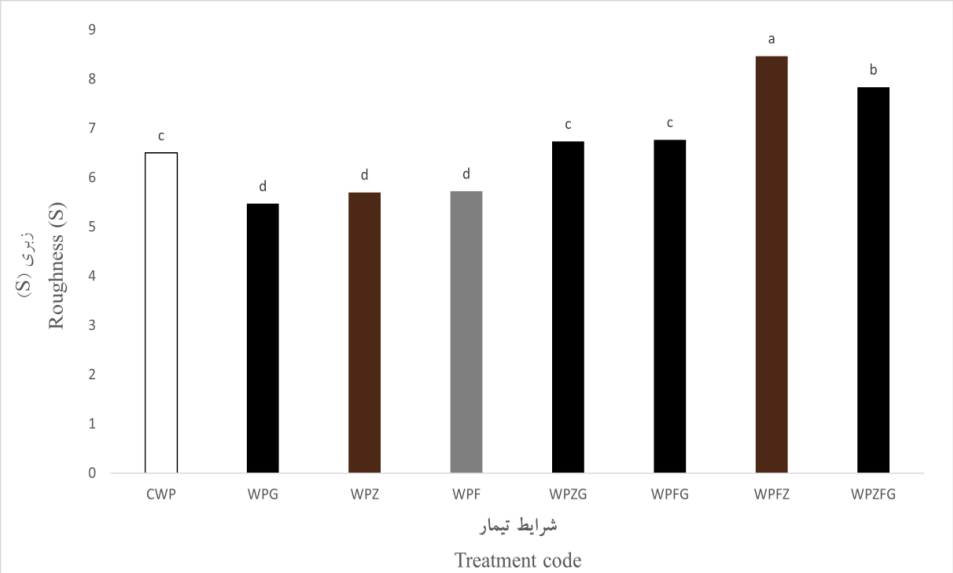
Figure 3. Comparison of means air resistance content of different papers.

زبری: آنالیز واریانس یک‌طرفه نشان داد که بین مقادیر زبری ۸ نوع کاغذ مورد آزمون در سطح احتمال ۵٪ از نظر آماری اختلاف معنادار وجود دارد و مقادیر زبری در همه تیمارها در پنج گروه قرار دارند. شکل ٤ میانگین تغییرات زبری را برای ۸ نوع کاغذ نشان می‌دهد.

شکل ٤ نشان می‌دهد که بیش‌ترین میزان زبری مربوط به کاغذ تحریر پوشش داده‌شده با فلورین است و کم‌ترین میزان آن متعلق به کاغذ تحریر پوشش داده‌شده با زئین و گرافن می‌باشد.

بین زبری سطح کاغذها که یکی از شاخص‌های چاپ‌پذیری کاغذ است، اختلاف معناداری وجود دارد. استفاده از پوشش‌دهی ترکیبی منجر به حداکثر زبری شده است، درحالی‌که استفاده از مواد پوششی به‌صورت مجزا منجر به صافی سطحی می‌شود. البته باید به این نکته که قبلاً اشاره شد، توجه داشت که به‌دلیل عدم انجام عملیات پرداخت سطح کاغذهای اندود شده، این موضوع طبیعی است و با انجام عملیات فوق‌اتوزنی، به‌طور یقین این ویژگی نسبت به نمونه شاهد نیز بهبود خواهد یافت (۱۵).

کاغذ شبکه‌ای از الیاف به هم چسبیده سلولزی است که با وجود عبور از غلتک‌های مختلف در قسمت پرس و خشک‌کن ماشین کاغذ، دارای خلل و فرج زیاد و در نتیجه زبری در سطح می‌باشد. پر کردن خلل و فرج سطح کاغذ اساساً سبب بهبود خواص فیزیکی آن می‌شود (١٦). مواد پوشش‌دهی در حفره‌های کوچک ورقه کاغذ قرار گرفته و موجب کاهش ناهماهنگی سطح کاغذ می‌شوند. از سویی، مواد پوشش‌دهی موجب کاهش زبری سطح کاغذ و کاهش تخلخل، یا به عبارتی افزایش مقاومت به عبور هوا می‌شود.



شکل ٤- مقایسه میانگین زبری کاغذهای مختلف.

Figure 4. Comparison of means roughness content of different papers.

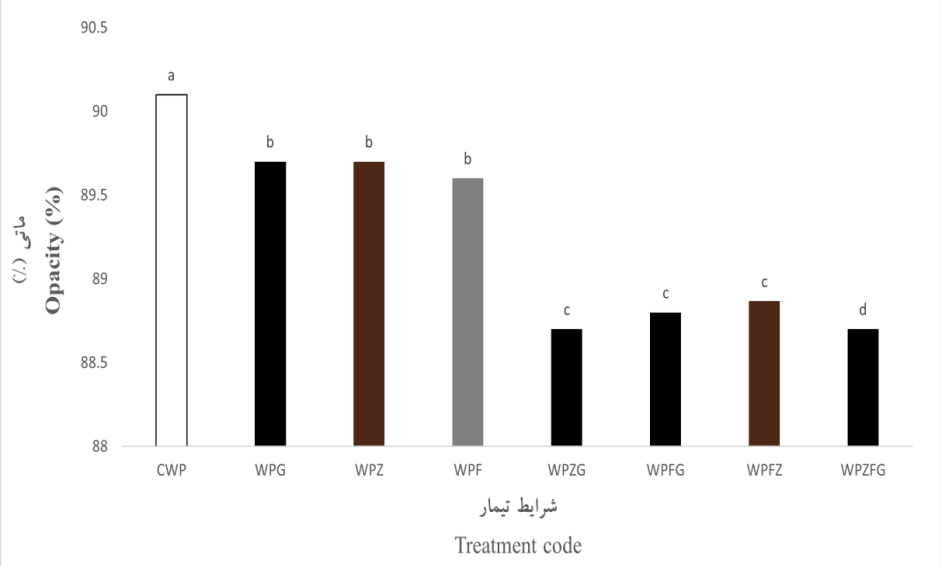
ماتی: نتایج آزمون واریانس یک‌طرفه نشان داد که بین مقادیر ماتی در هشت نوع کاغذ مورد بررسی در سطح احتمال ٥ درصد اختلاف معنادار وجود دارد و تیمارها در شش گروه آماری متمایز قرار گرفتند. مطابق شکل ٥، بیش‌ترین مقدار ماتی مربوط به نمونه شاهد و کم‌ترین مقدار به کاغذ پوشش داده‌شده با فلورین اختصاص دارد.

کاهش ماتی در نمونه‌های پوشش داده‌شده ناشی از پر شدن فضاهای خالی بین الیاف و کاهش تفرق نور در سطح کاغذ است. نوع و مقدار مواد پوششی بر ویژگی‌های نوری تأثیر مستقیم دارند و استفاده از ترکیباتی مانند زئین، نانوگرافن و فلورین موجب کاهش ناهمواری سطح و بهبود یکنواختی لایه پوشش می‌شود (١٦ و ١٧).

به‌کارگیری پرکننده‌های معدنی و مواد فیلم‌ساز منجر به تغییر و بهبود ویژگی‌های نوری کاغذ می‌گردد (١٨). در این پژوهش نیز افزودن مواد پوششی باعث افزایش ضریب پراکندگی نور و در نتیجه کاهش ماتی نمونه‌های پوشش داده‌شده شد. پراکندگی نور با ساختار سطحی و تماس الیاف با هوا مرتبط است، به‌طوری‌که کاهش فضاهای خالی میان الیاف باعث کاهش پراکندگی و کاهش ماتی می‌شود (١٩).

نتایج دانسیته نوری نیز نشان داد که پوشش‌دهی موجب افزایش جذب مرکب و بهبود چسبندگی میان

لایه چاپ و سطح کاغذ شده است. بیش‌ترین مقدار چگالی نوری در نمونه‌های پوشش داده‌شده با ترکیب زئین و نانوگرافن مشاهده گردید که بیانگر تشکیل شبکه‌ای یکنواخت‌تر و افزایش دانسیته مرکب بر روی سطح کاغذ است.



شکل ٥- مقایسه میانگین ماتی کاغذهای مختلف.

Figure 5. Comparison of means opacity content of different papers.

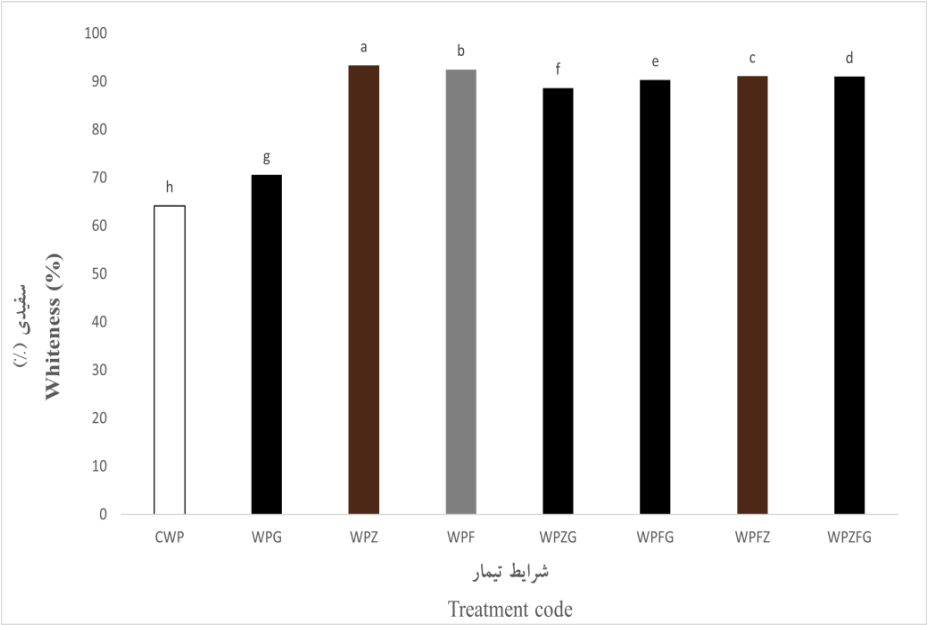
سفیدی: آنالیز واریانس یک‌طرفه نشان داد که بین مقادیر سفیدی ۸ نوع کاغذ مورد آزمون در سطح احتمال ٥٪ از نظر آماری اختلاف معنادار وجود دارد و مقادیر سفیدی در همه تیمارها در هشت گروه قرار دارند. شکل ٦ میانگین تغییرات سفیدی را برای ۸ نوع کاغذ نشان می‌دهد.

شکل ٦ نشان می‌دهد که بیش‌ترین میزان سفیدی مربوط به کاغذ تحریر پوشش داده‌شده با زئین است و کم‌ترین میزان آن متعلق به کاغذ تحریر شاهد می‌باشد.

سفیدی در واقع از انعکاس نور در تمام طول‌موج‌ها ناشی می‌شود. بررسی کومار و همکاران (۲۰۱۱) نشان داد که میزان انعکاس کلی نور هم به مقدار ضریب تفرق در کاغذ پایه و هم ساختار لایه پوشش بستگی دارد. میزان تفرق نور بالاتر در لایه پوشش تأثیر منفی تفرق پایین در کاغذ پایه را خنثی خواهد کرد و با افزایش وزن پوشش، این تأثیر بیش‌تر می‌شود (۲۰).

عواملی هم‌چون ساختار کاغذ، اندازه و سطح ویژه ذرات، توزیع اندازه ذرات و مورفولوژی ذرات نیز تأثیر زیادی در افزایش سفیدی کاغذهای پوشش‌دهی شده دارند.

بررسی سفیدی کاغذ نشان داد که پوشش‌دهی تأثیر چشم‌گیری در افزایش سفیدی کاغذ داشته است. در این پژوهش، افزودن مواد پوششی، ضریب پراکندگی نور در سطح کاغذ را افزایش داده و منجر به افزایش سفیدی کاغذ شده است. مقدار پراکندگی نور زمانی که نور از کاغذ عبور می‌کند با سطحی از الیاف که با هوا در تماس است، ارتباط مستقیمی دارد. البته هر چه سطح اتصال بین الیاف کم‌تر باشد، سطح در تماس با هوا بیش‌تر بوده و این سطح پیوند نیافته، درصد بیش‌تری از نور را پراکنده می‌سازد (۱۹).



شکل ٦- مقایسه میانگین سفیدی کاغذهای مختلف.

Figure 6. Comparison of means whiteness content of different papers.

روشنی: آنالیز واریانس یک‌طرفه نشان داد که بین مقادیر روشنی ۸ نوع کاغذ مورد آزمون در سطح احتمال ۵٪ از نظر آماری اختلاف معنادار وجود دارد و مقادیر روشنی در همه تیمارها در هشت گروه قرار دارند. شکل ۷ میانگین تغییرات روشنی را برای ۸ نوع کاغذ نشان می‌دهد.

شکل ۷ نشان می‌دهد که بیش‌ترین میزان روشنی مربوط به کاغذ تحریر شاهد است و کم‌ترین میزان آن متعلق به کاغذ تحریر پوشش داده‌شده با زئین می‌باشد.

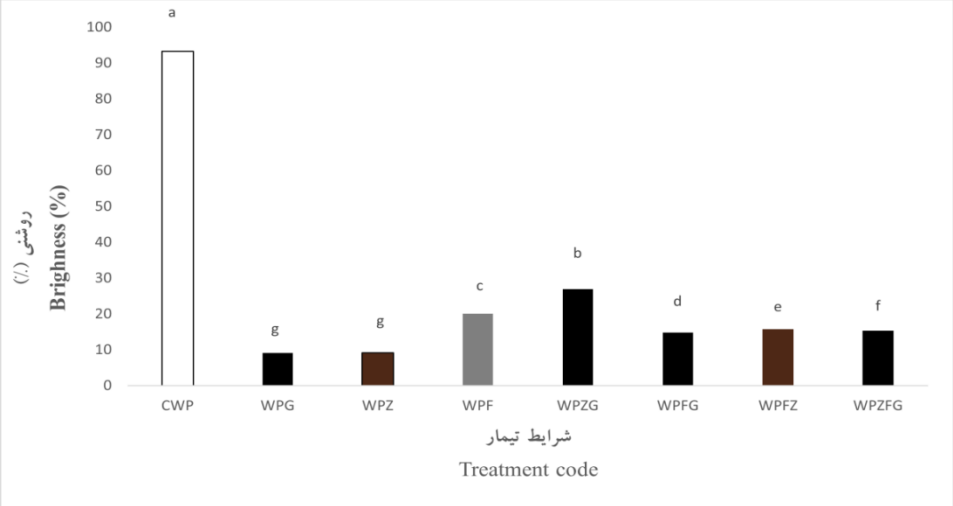
در فرآیند پوشش‌دهی، مواد پوششی بر روی سطح کاغذ اعمال می‌شوند که این امر می‌تواند بر ویژگی‌های نوری از جمله روشنایی تأثیر بگذارد. نوع و ترکیب مواد پوششی نقش مهمی در این تغییر دارد؛ به‌طوری‌که افزایش ضخامت لایه پوشش و پر شدن فضاهای خالی بین الیاف سبب افزایش جذب نور درون ساختار کاغذ و در نتیجه کاهش روشنایی می‌شود. علاوه بر این، ناهمواری‌های ایجادشده بر سطح کاغذ پس از پوشش‌دهی می‌توانند موجب پراکندگی و انعکاس نامناسب نور شوند که این امر نیز کاهش روشنایی را به دنبال دارد (۲۱).

در کل، افزایش ضخامت، ایجاد ناهمواری‌ها و جذب نور توسط پوشش محافظتی و رنگ، ممکن است باعث کاهش روشنایی کاغذ شود. بررسی خواص نوری کاغذ نشان داد که استفاده از مواد پوششی، چه به‌صورت مجزا و چه به‌صورت ترکیبی، باعث کاهش درجه روشنی کاغذ شده است. به‌کارگیری پرکننده‌های معدنی سبب تغییر و کاهش روشنی در انواع کاغذها می‌شود. البته میزان این تغییرات تحت‌تأثیر ساختار کاغذ، اندازه و سطح ویژه پرکننده است.

اندازه ذرات پرکننده در صنعت کاغذ از اهمیت زیادی برخوردار است. زیرا ذرات پرکننده در کاغذ بخشی از شکاف‌ها و درزهای بین الیاف سلولز را پر می‌کنند و اگر منافذ بین الیاف به‌خوبی پر نشود، بسیاری از نقاط ریز مرکب چاپ در این نقاط

به‌درستی قرار نخواهد گرفت و کیفیت کار چاپ کاهش می‌یابد. بنابراین این امر از جایگاه ویژه‌ای برخوردار است.

مهم‌ترین خواص رنگدانه‌ها که بر خصوصیات کاغذ تأثیرگذار می‌باشد، رنگ و روشنی است. به‌طوری‌که ذراتی با اندازه کوچک‌تر، شاخص انعکاس نور، ضریب پراکندگی نور و روشنی بیش‌تری دارند و هم‌چنین کارایی نوری بهتری ارائه می‌دهند. بنابراین می‌توان دلیل کاهش درصد روشنی را به‌اندازه ذرات، ضریب شکست نور و سطح ویژه بیش‌تر ذرات استفاده شده نسبت داد (۲۲).



شکل ۷- مقایسه میانگین روشنی کاغذهای مختلف.

Figure 7. Comparison of means brightness content of different papers.

براقیت: آنالیز واریانس یک‌طرفه نشان داد که بین مقادیر براقیت ۸ نوع کاغذ مورد آزمون در سطح احتمال ۵٪ از نظر آماری اختلاف معنادار وجود دارد و مقادیر براقیت سطح در همه تیمارها در هشت گروه قرار دارند. شکل ۸ میانگین تغییرات براقیت را برای ۸ نوع کاغذ نشان می‌دهد.

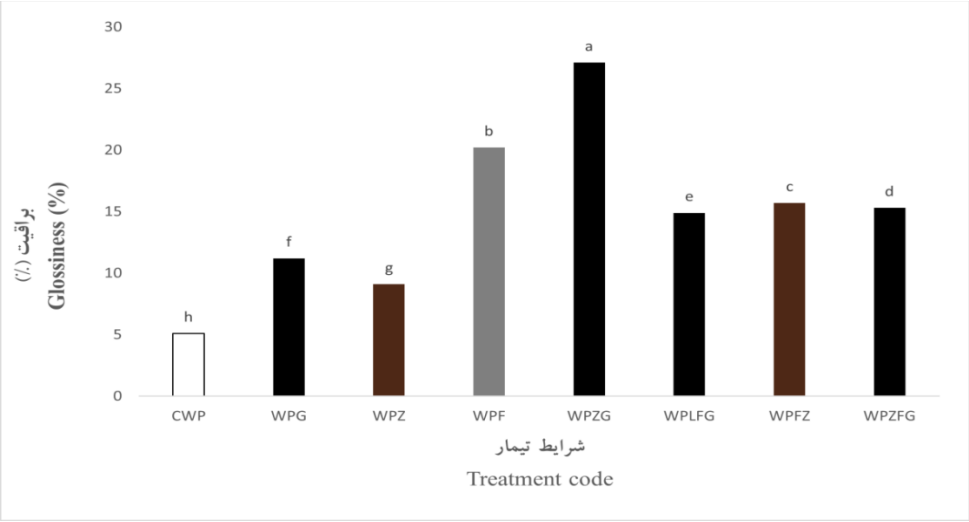
شکل ۸ نشان می‌دهد که بیش‌ترین میزان براقیت مربوط به کاغذ تحریر پوشش داده‌شده با زئین و نانوگرافن است و کم‌ترین میزان آن متعلق به کاغذ تحریر شاهد می‌باشد.

براقیت نمونه‌ها تحت زاویه ۸۵ درجه بررسی شده است. طبق استاندارد ASTM D523، براقیت نمونه تحت زاویه ٦٠ درجه و سه معیار مات، نیمه مات و براق سنجیده می‌شود. در صورت پایین بودن عدد نشان داده شده از مقدار ۱۰ که معیاری از مات بودن پوشش است، اندازه‌گیری تحت زاویه ۸۵ درجه انجام می‌گردد. به‌منظور بررسی میزان براقیت، ابتدا فیلمی با ضخامت ٦ میکرون از مرکب فلسوگرافی روی کاغذها تهیه‌شده و سپس به کمک دستگاه براقیت‌سنج، میزان براقیت نمونه‌ها اندازه‌گیری شده است. نمونه پوشش داده‌شده با زئین و نانوگرافن نسبت به نمونه شاهد ٤٣١ درصد افزایش براقیت را نشان داد.

به‌طورکلی، براقیت کاغذ تابع بی‌نظمی‌های سطح کاغذ و به ساختار و منافذ سطحی بستگی دارد. افزایش براقیت کاغذهای پوشش‌دهی شده نشان‌دهنده بهبود کیفیت چاپ‌پذیری این کاغذها می‌باشد. براقیت یک فیلم زمانی بیشینه است که زاویه تابش برابر با زاویه انعکاس باشد. به نظر می‌رسد مواد پوششی در

جای یک نرم‌کننده در داخل مرکب قرار گرفته و آن‌ها را پر می‌کنند و باعث چسبندگی بیش‌تر شده و پس‌ازآن‌که مرکب روی کاغذ قرار می‌گیرد، متراکم‌تر شده و یک سطح صاف بدون تخلخل به وجود می‌آورد.

هنگامی‌که مرکب حاوی مواد پوششی روی سطح کاغذ قرار می‌گیرد، با تبخیر آب، مولکول‌های مواد پوششی جانشین فضاهای خالی ناشی از تبخیر آب می‌شوند و فرورفتگی‌ها را پر می‌کنند و سطح براق تقریباً یکدست و یکنواختی به وجود می‌آید. اما مرکب بدون مواد پوششی این‌طور نیست و سریع سفت می‌شود و سطح جلای حاصل از آن به صافی سطح مواد پوششی نیست و این دلیل تفاوت براقیت کاغذهای پوشش‌دهی شده با نمونه شاهد بدون پوشش است. هم‌چنین لازم به ذکر است که مواد پوششی در بین مولکول‌های داخل مرکب قرار گرفته و آن‌ها را پر می‌کنند و باعث چسبندگی بیش‌تر شده و پس‌ازآن‌که مرکب روی کاغذ قرار می‌گیرد، متراکم‌تر شده و یک سطح بدون تخلخل به وجود می‌آورد و باعث افزایش براقیت می‌گردد (۲۳).



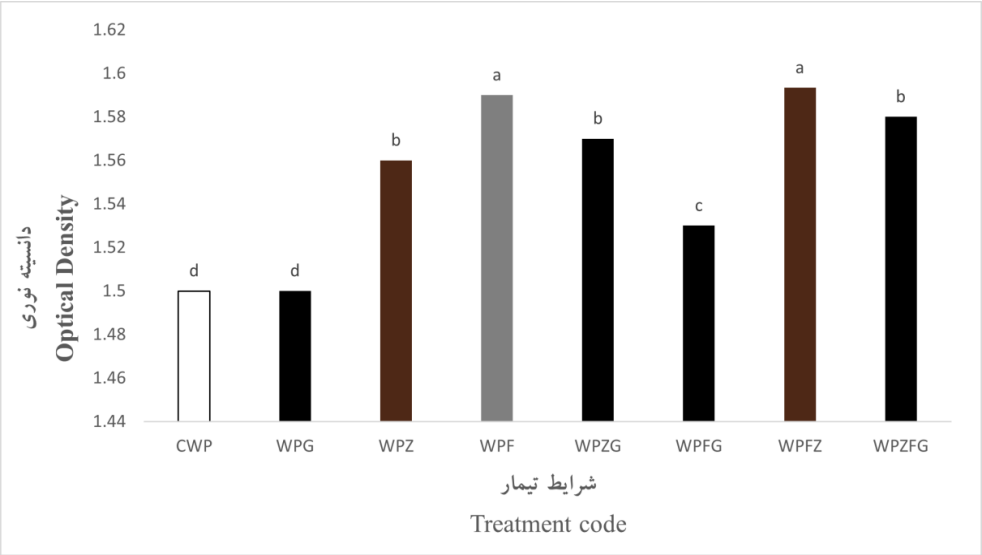
شکل ۸- مقایسه میانگین براقیت کاغذهای مختلف.

Figure 8. Comparison of means glossiness content of different papers.

دانسیته نوری: آنالیز واریانس یک‌طرفه نشان داد که بین مقادیر دانسیته نوری ۸ نوع کاغذ مورد آزمون در سطح احتمال ۵٪ از نظر آماری اختلاف معنادار وجود دارد و مقادیر دانسیته نوری در جهت ماشین در همه تیمارها در چهار گروه قرار دارند. شکل ۹ میانگین تغییرات دانسیته نوری را برای ۸ نوع کاغذ نشان می‌دهد.

شکل ۹ نشان می‌دهد که کم‌ترین میزان دانسیته نوری مربوط به کاغذ تحریر پوشش داده‌شده با زئین است و بیش‌ترین میزان آن متعلق به کاغذ تحریر پوشش داده‌شده با زئین و فلورین می‌باشد.

دانسیته نوری بیان‌کننده غلظت رنگزا در فیلم چاپ و یا ضخامت آن است. در واقع، معیاری است که شدت رنگ دریافت شده توسط چشم را می‌توان به‌صورت عددی گزارش کرد. اساس اندازه‌گیری آن مبتنی بر انعکاس و جذب است. در این آزمایش، دانسیته نوری معیاری از جذب است. به‌طورکلی، هرچه عدد دانسیته نوری بالاتر باشد، دانسیته نوری بیش‌تر، شدت جذب بیش‌تر و رنگی که چشم می‌بیند نیز بیش‌تر و بهتر است. در واقع، مطالب مشاهده شده به دلیل کیفیت بالاتر چاپ، دقیق‌تر صورت می‌گیرد.



شکل ۹- مقایسه میانگین دانسیته نوری کاغذهای مختلف.

Figure 9. Comparison of means optical density content of different papers.

چسبندگی: به‌منظور انجام آزمون چسبندگی، به میزان ۳ تا ۵ سانتی‌متر از چسب موردنظر روی سطح فیلم مرکب فلکسو چسبانده می‌شود و پس از گذشت ۵ ثانیه، از سطح فیلم با سرعت برداشته می‌شود. نتایج مشاهده شده از این آزمون نشان می‌دهد که میزان چسبندگی لایه پوشش داده‌شده و مرکب فلکسو اعمال‌شده عالی است، زیرا هر دو لایه همراه با سطح کاغذ (زیرآیند) توسط چسب به‌طور کامل کنده می‌شوند.

نتیجه‌گیری

پوشش‌دهی امکان تولید کاغذهایی با ویژگی‌های متنوع و متناسب با نیازهای مختلف را فراهم می‌کند. پوشش‌دهی به‌عنوان یک مرحله حیاتی در تولید کاغذ، نقشی اساسی در بهبود ویژگی‌های آن ایفا می‌کند. این فرایند شامل اعمال یک لایه نازک از مواد مختلف روی سطح کاغذ است که می‌تواند خواص فیزیکی و چاپ‌پذیری آن را به‌طور قابل‌توجهی تغییر دهد، از افزایش مقاومت به عبور هوا گرفته تا بهبود کیفیت چاپ. این پژوهش نیز با هدف بهبود خواص چاپ‌پذیری کاغذ تحریر کارخانه چوب و کاغذ مازندران انجام شد.

افزایش بالای ۱۰۰ درصدی مقاومت به عبور هوا در کاغذهای پوشش‌شده، نشان‌دهنده عدم تغییرات ابعاد رول کاغذ در سیستم چاپ افست با اعمال محلول رطوبت‌دهی است که باعث ارتقای کیفیت چاپ خواهد شد. افزایش براقیت کاغذهای پوشش‌شده، گواهی بر بهبود کیفیت چاپ‌پذیری این نوع کاغذ می‌باشد. هم‌چنین، افزایش دانسیته نوری نشان داد که مشاهده مطالب چاپ‌شده بهتر و بیش‌تر صورت می‌گیرد. آزمون چسبندگی کاغذها نشان داد که پوشش باعث افزایش چسبندگی مرکب و کاغذ شده و از مشکل پرزدگی روی نوردها (به‌خصوص نورد بلانکت افست) و کنده شدن سطح چاپ‌شده جلوگیری می‌کند. با وجود دامنه اختلاف ضخامت و زبری سطح، استفاده از فناوری‌های جدید پوشش‌دهی، مانند تغییر در سختی غلتک‌های بالا و پایین و نیز درصد ماده جامد پوشش، می‌تواند از بروز اختلافات رفتاری کاغذ در حین چاپ بکاهد.

این پژوهش به بررسی تأثیر پوشش‌دهی با استفاده از نانوگرافن، زئین و فلورین بر ویژگی‌های چاپ‌پذیری کاغذ تحریر ایرانی پرداخته است. نتایج نشان داد که پوشش‌دهی می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی ویژگی‌های فیزیکی و نوری کاغذ را بهبود بخشد و از جمله افزایش مقاومت به عبور هوا، براقیت، سفیدی و دانسیته نوری را به همراه دارد. افزایش بالای ۱۰۰ درصدی مقاومت به عبور هوا در کاغذهای پوشش‌دهی‌شده، نشان‌دهنده بهبود کیفیت چاپ و کاهش مشکلات مرتبط با پرزدگی و کنده شدن سطح چاپ شده است. هم‌چنین، آزمون چسبندگی نشان داد که لایه پوشش‌دهی به‌خوبی با مرکب فلکسو ترکیب شده و انسجام بالایی را در فرآیند چاپ فراهم می‌آورد. در مجموع، پوشش‌دهی کاغذ تحریر شرکت چوب و کاغذ مازندران نشان داد که ویژگی‌های چاپ‌پذیری کاغذ چاپ و تحریر پوشش داده‌شده نسبت به نمونه شاهد، علی‌رغم عدم انجام عملیات تکمیلی (مثل اتوزنی)، بهبود خواهد یافت.

این یافته‌ها تأکیدی بر اهمیت استفاده از مواد زیست‌تخریب‌پذیر در صنعت کاغذ و چاپ به‌عنوان یک راهکار پایدار و مؤثر برای بهبود کیفیت محصولات داخلی دارند. در نهایت، پوشش‌دهی کاغذ تحریر کارخانه چوب و کاغذ مازندران نشان‌دهنده قابلیت‌های بالای این نوع کاغذ در پاسخ به نیازهای بازار و تطابق با استانداردهای جهانی است. این پژوهش می‌تواند به‌عنوان مبنایی برای توسعه و تولید کاغذهای با کیفیت بالا و پایدار در صنعت کاغذ ایران محسوب شود.

منابع

1. Ataeefard, M. (2014). Influence of paper surface characteristics on digital printing quality. *Surface engineering*. 30(7), 529-534.
2. Altay, B. N., Huq, A., Aksoy, B., Hailstone, R., Demir, M., Aydemir, C., ... & Williams, S. (2023). Enhanced internal coating structure and light reflectance of coated papers: a sludge valorization process. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*. 11(13), 5303-5314.
3. Rastogi, V. K., & Samyn, P. (2015). Bio-based coatings for paper applications. *Coatings*. 5(4), 887-930.
4. Barikani, M. (2018). Biodegradable polymers and their role in sustainable development. *Polym Adv Technol*. 29(1), 47-58.
5. Jiang, T., Duan, Q., Zhu, J., Liu, H., & Yu, L. (2020). Starch-based biodegradable materials: Challenges and opportunities. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*. 3(1), 8-18.
6. Song, Z., Pan, Y., & Xiao, H. (2013). Effects of zein emulsion application on improving the water and water vapour barrier properties of paper. *Nordic Pulp & Paper Research Journal*. 28(3), 381-385.
7. Gadakh, D., Dashora, P., & Wadhankar, G. (2020). A review paper on graphene coated fibres. *Graphene*. 8(4), 53-74.
8. You, X., Wang, H., He, J., & Qi, K. (2025). Fluorine-free superhydrophobic breathable membranes with lotus-leaf/corncob-like composite structure for highly water-resistant fabrics. *Chemical Engineering Journal*. 506, 160214.
9. Mousavi, S. M. M., Afra, E., Tajvidi, M., Bousfield, D. W., & Dehghani-Firouzabadi, M. (2018). Application of cellulose nanofibril (CNF) as coating on paperboard at moderate solids content and high coating speed using blade coater. *Progress in Organic Coatings*. 122, 207-218.
10. Tihminlioglu, F., Atik, İ. D., & Özen, B. (2010). Water vapour and oxygen-barrier performance of corn–zein coated polypropylene films. *Journal of Food Engineering*. 96(3), 342-347.
11. Asgher, M., Qamar, S. A., Bilal, M., & Iqbal, H. M. (2020). Bio-based active

food packaging materials: Sustainable alternative to conventional petrochemical-based packaging materials. *Food Research International*. 137, 109625.

12. Wu, F., Misra, M., & Mohanty, A. K. (2021). Challenges and new opportunities in barrier performance of biodegradable polymers for sustainable packaging. *Progress in Polymer Science*. 117, 101395.
13. Mujtaba, M., Lipponen, J., Ojanen, M., Puttonen, S., & Vaittinen, H. (2022). Trends and challenges in the development of bio-based barrier coating materials for paper/cardboard food packaging; a review. *Science of The Total Environment*. 851, 158328.
14. Rastogi, V. K., & Samyn, P. (2015). Bio-based coatings for paper applications. *Coatings*. 5(4), 887-930.
15. Asadi Khansari, A., Dehghani Firouzabadi, M., & Resalati, H. (2017). Double coating effects of latex and MFC on barrier and printability properties in paper, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Faculty of Wood and Paper Engineering. 228p.
16. Ebrahimpour Kasmani, J., Mahdavi, S., & Samariha, S. (2014). Improvement of physical properties and printability of wood containing paper by light weight coating. *Journal of Color Science and Technology*. 7, 265-274.
17. Mohammadi, E., Rezanezhad, S., & Asadpour, G. (2021). Evaluation of strength, optical and antibacterial properties of treated papers by chitosan and nano zinc oxide. *Iranian Journal of Wood and Paper Industries*. 12(12), 145-162.
18. Zhang, M., Hao, N., Song, S., Wang, J., Wu, Y., & Li, L. (2014). Investigation of the mixed refining of a novel fly ash-based calcium Silicate filler with fiber. *Bioresources*. 9(3), 5175-5183.
19. Tayeb, A. H., Amini, E., Ghasemi, S., & Tajvidi, M. (2018). Cellulose nanomaterials-Binding properties and applications: A review. *Molecules*. 23(10), 2684.
20. Kumar, N., & Bhardwaj, N. (2011). Influence of particle size distribution of calsum carbonate pigments on coated paper whiteness. *Journal of Coatings Technology and Research*. 8(5), 613-618.
21. Çiçekler, M., Sozbir, T., & Tutus, A. (2023). Improving the optical properties and filler content of white top testliners by using a size press. *ACS omega*. 8(23), 21000-21007.
22. Liu, H., Shi, H., Wang, Y., Wu, W., & Ni, Y. (2014). Interactions of lignin with optical brightening agents and their effect on paper optical properties. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 53(8), 3091-3096.
23. Soltany, Z., Farahmand Borujeni, H., & Abed-Esfahani, A. (2016). Investigating the impact of honey additive on Iranian traditional ink. *Journal of Colour Science and Technology*. 10(1), 43-54.