

Investigation of the Effect of Wood Species on Strength Properties and Effluent Color Quality Resulting from Washing and Bleaching of Chemi-Mechanical Pulp

Mojtaba Goli^{1*}, Ghasem Asdpour², Hasan Sharifi³, Javad Chaichi⁴,
Shaban Ghodbanan⁵

- 1- Corresponding author, PhD Student, in Wood & Cellulose Products Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Iran. Email: goli.me2020@gmail.com
- 2- Associate Professor, Faculty of Natural Resources, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Iran
- 3- Assistant Professor Faculty of Natural Resources, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Iran
- 4- Assistant Professor of Faculty of chemistry Department, University of Mazandaran - Babolsar- Iran
- 5- Mazandaran Wood and Paper Industries

Received: Febreoury 2026

Accepted: May 2026

Abstract

Problem definition and objectives: The shortage of domestic cellulosic resources, combined with environmental restrictions, the ban on raw wood imports, and the prohibition of foreign long-fiber pulp procurement to prevent currency outflow, have posed serious challenges to the supply of raw materials for paper mills. Wastewater pollution in the papermaking industry primarily originates from the natural constituents and extractives of wood; therefore, a thorough understanding of wood chemical structure is essential. Wood components are released into the effluent during the pulping and bleaching processes, thereby increasing the wastewater color intensity. At the Mazandaran Wood and Paper Industries, the furnish composition for chemi-mechanical pulp (CMP) production was originally designed as a mixture of 75% hornbeam and 25% poplar and beech. However, the mill currently faces a critical shortage of these raw materials. The present study, therefore, investigated the effect of alternative hardwood species, including forest hardwoods such as oak, maple, alder and persimmon, as well as non-forest (plantation) hardwoods including willow and eastern cottonwood), both individually and in blends with poplar, as potential substitutes for the original furnish. Additionally, the impact of the produced pulps on the properties of printing-writing paper and on effluent color generation was evaluated.

Methodology: In this study, the effect of eight hardwood species (forest species including oak, maple, alder, persimmon, hornbeam, and beech, as well as non-forest/plantation species including willow and eastern cottonwood) was investigated. Initially, random sampling was conducted from the mill yard. Fiber morphological characteristics (length, wall thickness, diameter, and lumen diameter) were measured using the Franklin method on 300 fibers from each wood species. For chemical analysis, wood chips were ground into powder and sieved using 60-mesh and 80-mesh screens (60-mesh for extractives and ash content, and 80-mesh for lignin and cellulose determination). The chemi-mechanical pulping (CMP) process was carried out using 14% sodium sulfite, a temperature of 170°C, a liquid-to-wood ratio of 7:1, a target yield of approximately 85%, cooking times ranging from 25 to 50 minutes, and poplar mixing ratios of 32%, 49%, and 64%.

After refining the pulps to a freeness of 325 ± 25 mL CSF (Canadian Standard Freeness), laboratory handsheets were prepared. Bleaching was performed using 2% hydrogen peroxide (based on oven-dry weight) in the presence of 0.2% DTPA to chelate transition metal ions, under acidic pH conditions. Paper properties were measured according to TAPPI standards. Effluent samples included those derived from chip washing and bleaching stages, which were prepared by stirring in water at 55°C for 10 minutes, and subsequently, color parameters of the effluents were measured.

Results: The results showed that hornbeam had the highest fiber length, and among non-forest species, poplar was superior to willow in terms of both fiber length and yield. Chemical analysis of the species revealed that poplar contained the lowest extractive content and the highest cellulose percentage. The lowest and highest lignin contents were observed in hornbeam and oak, respectively. The highest acetone-soluble extractives and ash content belonged to oak, while the lowest values for both were obtained from poplar. With increasing poplar ratio attributed to its high cellulose and low lignin content significant differences were observed in the mean properties of chemi-mechanical pulp, including brightness, tensile strength, burst strength, and tear strength. Overall, the findings indicate that the optimal furnish in terms of strength and optical properties (both before and after bleaching) was achieved in treatments containing higher proportions of poplar.

Conclusion: In this study, the effect of substituting poplar wood with a mixture of native hardwood forest species and willow on the optical properties and strength properties of sulfite chemi-mechanical pulp was investigated. With increasing the mixing ratio of poplar wood from 32% to 64%, the mechanical strengths showed an increasing trend. Based on the optical properties and strength properties of the resulting paper, it is feasible to replace poplar with a portion of the two native forest species used. Oak and beech species in these treatments contained the highest amounts of extractives, which are released during chip washing and can have the greatest impact on effluent color. In terms of bleaching, alder and oak species, which have the highest lignin content in the wood, released lignin during pulping and bleaching processes, which can significantly affect effluent color. Treatments containing a high percentage of poplar (64%) exhibited relatively high biodegradability.

Keywords: Poplar, Willow, Hardwood, Chemi-Mechanical Pulp, Effluent Color.

بررسی تأثیر نوع گونه‌های چوبی بر ویژگی مقاومتی و کیفیت رنگ پساب حاصل از شستشو و رنگبری خمیر کاغذ شیمیایی - مکانیکی

مجتبی گلی^{۱*}، قاسم اسدپور^۲، حسن شریفی^۳، جواد چایچی^۴، شعبان قدبنان^۵

۱- نویسنده مسئول، دانشجوی دکتری گروه مهندسی چوب و کاغذ، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، دانشکده منابع طبیعی ساری، ایران: رایانامه:

goli.mc2020@gmail.com

۲- دانشیار گروه مهندسی چوب و کاغذ، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، دانشکده منابع طبیعی، ساری، ایران

۳- استاد یار گروه مهندسی چوب و کاغذ، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، دانشکده منابع طبیعی، ساری، ایران

۴- استادیار گروه شیمی، دانشگاه مازندران، دانشکده شیمی، ایران

۵- صنایع چوب و کاغذ مازندران

تاریخ دریافت: بهمن ۱۴۰۴

تاریخ پذیرش: خرداد ۱۴۰۵

چکیده

بیان مساله و اهداف: کمبود منابع سلولزی داخلی، محدودیت‌های زیستمحیطی و ممنوعیت واردات چوب خام و خمیر الیاف بلند، تأمین مواد اولیه کارخانه‌ها را با چالش مواجه کرده است. پساب کاغذسازی عمدتاً از ترکیبات طبیعی چوب آلوده می‌شود، بنابراین شناخت ساختمان چوب ضروری است. ترکیبات چوب در فرایند تولید و رنگ‌بری وارد پساب شده و رنگ آن را افزایش می‌دهند. در کارخانه چوب و کاغذ مازندران، ترکیب ۷۵٪ ممز و ۲۵٪ صنوبر و راش برای تولید خمیر CMP طراحی شد، اما اکنون با کمبود مواد اولیه مواجه است. این تحقیق اثر گونه‌های پهن‌برگ جنگلی (بلوط، افرا، توسکا، کلهو) و غیرجنگلی (بید و صنوبر دلتوئیدس) را به‌صورت مجزا و مخلوط با صنوبر برای جایگزینی ترکیب قبلی، و نیز تأثیر خمیر تولیدی بر ویژگی‌های کاغذ و رنگ پساب بررسی کرده است.

مواد و روش‌ها: در این پژوهش، اثر ۸ گونه پهن‌برگ (جنگلی: بلوط، افرا، توسکا، کلهو، ممز، راش و غیرجنگلی: بید و صنوبر دلتوئیدس) بررسی شد. ابتدا نمونه‌برداری تصادفی از یارد کارخانه انجام گرفت. ویژگی‌های ریخت‌شناسی الیاف (طول، قطر، ضخامت دیواره و قطر حفره) با روش فرانکلین روی ۳۰۰ الیاف از هر گونه اندازه‌گیری شد. برای آنالیز شیمیایی، خرده‌چوب‌ها پودر و با الک‌های مش ۶۰ و ۸۰ دانه‌بندی شدند (مش ۶۰ برای مواد استخراجی و خاکستر، مش ۸۰ برای لیگنین و سلولز). پخت شیمیایی-مکانیکی (CMP) با ۱۴٪ سدیم سولفیت، دمای ۱۷۰ درجه، نسبت مایع به چوب ۷:۱، بازده ۸۵٪، زمان‌های ۲۵ تا ۵۰ دقیقه و نسبت‌های اختلاط صنوبر (۳۲، ۴۹ و ۶۴٪) انجام شد. خمیرها تا روانی ۲۵±۳۲۵ میلی‌لیتر CSF پالایش و کاغذهای دست‌ساز تهیه شدند. رنگ‌بری با ۲٪ پراکسید هیدروژن و ۰.۲٪ DTPA در pH اسیدی صورت گرفت. ویژگی‌های کاغذ بر اساس استاندارد TAPPI سنجیده شد. پساب‌ها شامل نمونه‌های حاصل از خرده‌چوب و رنگ‌بری بودند که در دمای ۵۵ درجه به مدت ۱۰ دقیقه در آب تهیه و سپس پارامترهای رنگ آن‌ها اندازه‌گیری شد.

نتایج: نتایج نشان داد بیشترین طول الیاف مربوط به ممز و در بین گونه‌های غیرجنگلی، صنوبر از نظر طول فیبر و بازده الیاف بر بید برتری داشت. آنالیز شیمیایی گونه‌ها بیانگر آن بود که صنوبر دارای کمترین میزان مواد استخراجی و بیشترین درصد سلولز است. کمترین و بیشترین مقدار لیگنین به ترتیب در ممز و بلوط مشاهده شد. بیشترین مواد استخراجی محلول در استون مربوط به بلوط و کمترین آن به صنوبر تعلق داشت. همچنین بیشترین و کمترین میزان خاکستر به ترتیب در بلوط و صنوبر به‌دست آمد. با افزایش نسبت صنوبر، به علت سلولز زیاد و لیگنین کم، تفاوت معنی‌داری در میانگین ویژگی‌های خمیر شیمیایی - مکانیکی شامل (درجه روشنی، مقاومت کششی، ترکیدن و پاره شدن کاغذ) مشاهده شد. در نهایت، نتایج حاکی از آن است که بهترین ترکیب از نظر ویژگی‌های مقاومتی و نوری (پیش و پس از رنگبری) مربوط به تیمارهایی است که در آن‌ها صنوبر با درصد بالاتری مورد استفاده قرار گرفته است.

نتیجه‌گیری: در این مطالعه، اثر جایگزینی چوب صنوبر با مخلوط گونه جنگلی بومی پهن‌برگ و بید بر ویژگی‌های نوری و مقاومت‌های خمیر کاغذ شیمیایی- مکانیکی سولفیت مورد بررسی قرار گرفت. با افزایش نسبت اختلاط چوب صنوبر از ۳۲ تا ۶۴ درصد، مقاومت‌های مکانیکی، روند افزایشی داشتند. بر اساس ویژگی‌های نوری و مقاومت‌های کاغذ حاصله، امکان جایگزینی صنوبر با بخشی از دو گونه بومی جنگلی مورد استفاده وجود دارد. گونه‌های بلوط و راش در این تیمارها دارای بیشترین میزان مواد استخراجی هستند که در هنگام شستشو چپیس خارج شده و می‌توانند بیشترین تأثیر را در رنگ پساب داشته باشند. در رنگبری گونه‌های توسکا و بلوط که دارای بیشترین میزان لیگنین در چوب درون هستند، هنگام پخت و همراه مواد رنگبر از چوب خارج شده که می‌توانند تأثیر زیادی در رنگ پساب داشته باشند. تیمارهای دارای درصد بالای صنوبر (۶۴ درصد) از قابلیت تجزیه زیستی به نسبت بالایی برخوردار هستند.

واژه‌های کلیدی: صنوبر، بید، پهن‌برگ، خمیر کاغذ شیمیایی - مکانیکی، رنگ پساب

مقدمه

یکی از مهم‌ترین مسائل زیست محیطی مورد بحث طی چند سال گذشته، بهره‌برداری از جنگل‌ها برای تهیه چوب و کاغذ بوده است. طی سالیان گذشته، چوب مهم-ترین منبع تأمین الیاف برای تولید خمیر کاغذ در سطح جهان بوده است. مصرف جهانی چوب از سال ۱۹۵۰ بیش از دو برابر افزایش یافته است و بر اساس پیش‌بینی‌های فائو (FAO)، تا سال ۲۰۳۰ مصرف جهانی گرده‌بینه صنعتی ۶۰ درصد نسبت به سطح فعلی افزایش می‌یابد و به حدود ۲۴۰۰ میلیون مترمکعب می‌رسد. افزایش جمعیت و نیاز به چوب و فرآورده‌های چوبی از جمله کاغذ باعث شده که جنگل به تنهایی قادر به تأمین نیاز چوب نباشد، از این رو استفاده از گیاهان باغی به عنوان ماده اولیه لیفی در ساخت کاغذ مورد توجه می‌باشد [۱]. امروزه با افزایش جمعیت، افزایش تقاضای مصرف کاغذ و محدودیت بیشتر مواد اولیه مصرفی، تولید خمیر کاغذ از خمیر کاغذهای پر بازده و مکانیکی جایگاه ویژه‌ای دارد. این خمیر کاغذها بازدهی بالایی دارند (بیش از ۸۵ درصد) و مقدار ماده چوبی حل شده در آنها کمتر از خمیرهای شیمیایی و نیمه شیمیایی است. خمیر کاغذهای CMP در مقایسه با خمیر کاغذهای شیمیایی به دلیل تخریب بیشتر در الیاف، متوسط طول الیاف کمتر، نرمه‌های بیشتر و ماندگاری کمتر نرمه‌ها و پرکننده‌ها، لیگنین باقیمانده بیشتر و ویژگی‌های مقاومتی کمتر، در ساخت کاغذهای با کیفیت و با دوام از مطلوبیت کمتری برخوردار هستند؛ اما به دلیل بازدهی بیشتر و خصوصیات چاپ‌پذیری بهتر، از این خمیر کاغذها معمولاً برای تولید کاغذهای روزنامه و چاپ و تحریر استفاده می‌گردد. در این ارتباط، در ایران

سالانه حدود ۵۲۰۰۰ تن کاغذ چاپ و تحریر (سفارشی) در صنایع چوب و کاغذ مازندران، از خمیر کاغذ CMP و از ۷۵ درصد ممرز و ۲۵ درصد صنوبر و راش تولید می‌گردد، اما با عنایت به طرح تنفس جنگل در سال‌های اخیر، برای تولید کاغذ چاپ و تحریر با مشکلات مواد اولیه روبرو شده است. برای بهبود قابلیت عبور کاغذ در هنگام تولید و چاپ، نیاز به به کارگیری حدود ۱۵ درصد الیاف بلند وارداتی است [۲]. در پژوهشی، تأثیر استفاده از چوب شاخه گونه‌های ممرز و راش با نسبت اختلاط ۳ به ۱ در تولید خمیر کاغذ CMP مخلوط پهن‌برگان شرکت چوب و کاغذ مازندران مورد بررسی قرار گرفت. درصدهای مصرف چوب شاخه در ترکیب نهایی مخلوط تنه پهن‌برگان با حفظ مقدار ثابت ۲۰ درصد برای چوب گونه غان، ۰، ۱۶، ۴۰، ۵۶ و ۸۰ درصد در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد که در شرایط پخت ثابت، زمان پخت برای رسیدن به بازده حدود ۸۵ درصد با افزایش درصد مصرف چوب شاخه، کاهش یافت. به علاوه، با افزایش چوب شاخه در مخلوط تنه پهن‌برگان، ویژگی‌های نوری و مقاومتی کاغذ حاصل اندکی کاهش یافت. پژوهش‌گران استفاده از چوب شاخه تا حدود ۴۰ درصد در ترکیب نهایی ماده اولیه مصرفی برای ساخت خمیر کاغذ CMP را توصیه نمودند [۳]. در پژوهشی با هدف امکان‌سنجی جایگزینی بخشی از چوب-های راش و ممرز مصرفی در کارخانه چوب و کاغذ مازندران برای تولید خمیر کاغذ CMP، استفاده از صنوبر لرزان مورد بررسی قرار گرفت، نتایج نشان داد که افزایش مقدار مصرف صنوبر در اختلاط با گونه راش و ممرز، سبب افزایش درجه روشنی کاغذ و ویژگی‌های مقاومتی (کشش، ترک‌کندن و پاره شدن کاغذ) و کاهش پشت‌نمایش کاغذ

نتایج به دست آمده را در راستای استفاده کارخانه از این گونه‌های چوبی تعمیم داد. این تحقیق سه هدف اصلی را دنبال می‌کند. ۱- بهره‌گیری از دیگر گونه‌های جنگلی پهن‌برگ و گونه‌های باغی به صورت مجزا و مختلط با گونه صنوبر و افزایش سهم چوب صنوبر به عنوان گونه سریع‌الرشد، برای کاهش استفاده از دو گونه محدود جنگلی راش و ممرز، ۲- ارزیابی مقایسه‌ای ویژگی‌های کاغذ چاپ و تحریر ساخته شده برای تعیین ترکیب چوبی بهینه که تا الان در صنعت کاغذسازی کشور مورد استفاده قرار نگرفت. ۳- ارزیابی اثر اختلاط گونه بر کیفیت رنگ پساب حاصل از شستشو و رنگبری.

در سال‌های اخیر صنعت کاغذ سازی به دلیل محدودیت بهره برداری جنگل‌ها، افزایش هزینه واردات الیاف بلند و کمبود مواد اولیه مناسب، با چالش جدی در تامین پایدار چوب مواجه شده است، با توجه به مشکلات ارئه شده در بالا این موضوع مستقیماً "بر کیفیت محصول و هزینه‌های تولید تاثیرگذار بوده است، گونه‌های جنگلی سنتی، افزایش آلودگی پساب ناشی از ترکیبات لیگنین و مواد استخراجی، و نیاز به بهبود خواص مکانیکی و نوری کاغذ، استفاده از گونه‌های جایگزین به ویژه گونه‌های سریع‌الرشد مانند صنوبر ضروری به نظر می‌رسد. باین حال کارایی این گونه‌ها در ترکیب با سایر گونه‌های جنگلی و باغی مشخص نیست. بنابراین هدف از این تحقیق، بررسی و تاثیر آن‌ها بر کیفیت کاغذ و پساب به طور کامل و امکان جایگزینی گونه‌های چوب و تعیین ترکیب بهینه با در نظر گرفتن ویژگی مقاومتی، نوری و زیست محیطی می‌باشد.

مواد روشها

تهیه نمونه

گونه‌های چوبی مورد استفاده در این پژوهش، شامل ۶ گونه پهن‌برگ جنگلی شامل راش، ممرز، بلوط، افرا، توسکا، کلهو و ۲ گونه پهن‌برگ غیر جنگلی (باغی) مانند بید و صنوبر دلتوئیدس و مخلوط این گونه‌ها با درصد‌های مختلف صنوبر، از یارد کارخانه به صورت تصادفی تهیه شده و به‌طور جداگانه توسط خردکن صنعتی موجود در کارخانه چوب و کاغذ مازندران به اندازه مورد استفاده جهت پخت تبدیل شدند. سپس برای تهیه خرده‌چوب با

تولید شده از صنوبر لرزان خالص دارای پشت نماییبایی نسبت به سایر تیمارها بود و در خط تولید روزنامه به عنوان ماده اولیه خالص قابل استفاده نبود [۴]. اثر اختلاط گونه توس سفید با خمیر کاغذ CMP (ممرز-راش) کارخانه چوب و کاغذ مازندران را مطالعه کرده‌اند. گونه توس وارداتی با درصد‌های ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ به مخلوط خمیر کاغذ ممرز و راش اضافه شد. نتایج نشان داد که با افزودن ۱۰ تا ۴۰ درصد گونه توس، میزان خمیر کاغذ پخت نشده و نرمه (۹/۸ درصد) کاهش یافت. به علاوه، افزودن گونه توس در درصد‌های اختلاط متفاوت به ترکیب خمیر کاغذ شیمیایی/ مکانیکی کارخانه، خواص مقاومتی کاغذ ساخته شده شامل شاخص مقاومت کششی، ترک‌پدن و پاره شدن کاغذ را در مقایسه با خمیر کاغذ CMP کارخانه بهبود بخشید [۵]. اثر گونه غان با درصد اختلاط ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۱۰۰ با دو گونه جنگلی راش و ممرز در تولید خمیر کاغذ CMP مورد بررسی قرار گرفت، نتایج نشان داد که با افزایش گونه غان خصوصیات فیزیکی، مکانیکی و درجه روشنی افزایش می‌یابد، اما پشت نماییکاغذ کاهش پیدا می‌کند، افزایش غان سبب افزایش درجه روشنی شد و مصرف پراکسید و حجم پساب تولید شده کاهش یافت. با توجه به موارد اشاره شده، مصرف الیاف بلند وارداتی کاهش پیدا کرد که از نظر اقتصادی برای واردات چوب غان نیز قابل توجه است [۶]. فرآیند خمیرسازی شیمیایی - زیستی، میزان مواد شیمیایی پخت و رنگبری را کاهش می‌دهد و در نتیجه باعث افزایش حذف لیگنین در خمیر کاغذ می‌شود که باعث صرفه‌جویی در انرژی و کاهش بار آلودگی پساب کارخانه خمیرسازی می‌گردد. این نتایج نشان می‌دهد که خمیرسازی زیستی یک فرآیند سازگار با محیط زیست است [۷].

طراحی اولیه خط تولید خمیر کاغذ شیمیایی- مکانیکی (PM1) شرکت چوب و کاغذ مازندران به عنوان بزرگ‌ترین تولیدکننده کاغذ از چوب در ایران، بر مبنای استفاده از ۷۵ درصد گونه چوبی ممرز و درصد گونه راش بوده است. به علت کمبود این دو گونه جنگلی، این شرکت ناگزیر به استفاده از دیگر گونه‌های پهن‌برگ جنگلی شامل بلوط، افرا، توسکا و کلهو و گونه‌های پهن‌برگ غیر جنگلی (باغی) شامل بید و صنوبر دلتوئیدس است. در این پژوهش، اثر گونه‌های ذکر شده مورد بررسی قرار گرفت تا بتوان

اندازه‌گیری ابعاد الیاف و تعیین ضرایب

بیومتریک

آماده‌سازی و جداسازی الیاف با استفاده از روش فرانکلین (۱۹۵۴) انجام شده و سپس طول، ضخامت دیواره، قطر و قطر حفره سلولی ۳۰۰ عدد لیف از هر گونه چوبی اندازه‌گیری شدند [۸]. در ادامه برای محاسبه ضرایب کاغذسازی از روابط زیر استفاده شد (جدول ۱).

جدول ۱. ضرایب بیومتریک

ضریب	فرمول
در هم رفتگی (ضریب لاغری)	L/d
نرمش (انعطاف پذیری)	$C/d \times 100$
مقاومت به پارگی (رانکل)	$\frac{ZW}{C} \times 100$

L = طول الیاف، C = قطر حفره سلولی، P = ضخامت دیواره سلولی، d = قطر الیاف

ابعاد استاندارد از یک الک آزمایشگاهی L&w مدل FI117 ساخت کشور سوئد استفاده شد. به منظور تعیین ترکیب شیمیایی چوب ۸ گونه مورد بررسی، آماده‌سازی نمونه طبق استاندارد TAPPI, T264 تهیه شد. اندازه‌گیری ترکیب شیمیایی گونه‌ها شامل سلولز نیز طبق روش رول و یونگ (۱۹۹۷) به کمک اسید نیتریک انجام گرفت. برای اندازه‌گیری میزان لیگنین، خاکستر و مواد استخراجی به ترتیب با استفاده از استاندارد TAPPI, T222، T211 و T204 استفاده شد.

تهیه خمیر کاغذ شیمیایی - مکانیکی

پخت خرده‌چوب‌ها با روش شیمیایی- مکانیکی با نسبت‌های اختلاط مختلف در ۱۱ تیمار توسط دیگ پخت از نوع Haoto ساخت شرکت L&w کشور فنلاند انجام شد. شرایط پخت شامل ۱۴ درصد سدیم سولفیت، دمای ۱۷۰ درجه سانتی‌گراد، نسبت مایع به خرده‌چوب ۷ به ۱ (مایع پخت مورد استفاده در این پژوهش، مایع پخت مورد استفاده در چوب و کاغذ مازندران برای پخت می‌باشد) و بازه زمانی ۲۵ تا ۶۵ دقیقه به منظور دستیابی به بازده حدود ۸۵ درصد (بازده مورد نظر در کارخانه چوب و کاغذ مازندران)، با سه تکرار پخت شدند (جدول ۲). در ادامه پس از پخت، خرده‌چوب‌های پیش تیمار شده شستشو داده شده و جداسازی الیاف خرده‌چوب‌ها توسط یک دفیبراتور آزمایشگاهی از نوع دیسکی انجام شد. سپس خمیر کاغذ بر اساس استاندارد TAPPI شماره T248 sp-00 و با دستگاه PFI mil تا درجه روانی حدود 325 ± 25 میلی‌لیتر پالایش شده و از آن‌ها کاغذ دست‌ساز آزمایشگاهی (۶۰ گرم بر مترمربع) ساخته شد.

اندازه‌گیری ویژگی‌های نوری و مقاومتی کاغذ

آزمون ویژگی کیفی کاغذ شامل ویژگی نوری و مقاومتی طبق دستورالعمل‌های آئین‌نامه TAPPI به ترتیب، درجه روشنی (02 - T452 om)، ماتی (T425 om-01)، مقاومت کششی (T404 om-92)، مقاومت ترکیبدن (T403om-02)، مقاومت پاره شدن کاغذ (T414 om-04) انجام شد.

تعیین رنگ

نمونه‌های پساب حاصل از شستشوی خرده‌چوب‌ها و پساب حاصل از رنگبری خمیر کاغذها به مدت حدود نیم

رنگبری

رنگبری خمیر کاغذ با استفاده از هیدروژن پراکسید انجام شد. خمیر کاغذهای حاصل از تیمارهای مختلف با

¹ Diethylenetriamine pentaacetic acid

² Chelating

مربوط به گونه کلهو و کمترین آن مربوط به گونه راش است. در بین دو گونه غیر جنگلی نیز طول فیبر و بازده الیاف صنوبر بیشتر از بید است. هم چنین جدول ۲ ضرایب کاغذسازی الیاف هشت گونه مورد استفاده در این تحقیق را نشان می‌دهد. گونه افرا بیشترین ضریب درهم-رفتگی را در بین هشت گونه دارد و گونه صنوبر کمترین مقدار را به خود اختصاص داد و برای گونه توسکا و بلوط به ترتیب بالاترین و کمترین ضریب انعطاف‌پذیری محاسبه شد و همچنین گونه توسکا کمترین ضریب رانکل را داشت. با توجه به جدول ۲ می‌توان دریافت گونه صنوبر و بلوط به ترتیب دارای بیشترین و کمترین مقدار سلولز می‌باشند. کمترین مقدار لیگنین در گونه ممرز و بیشترین آن در گونه بلوط اندازه‌گیری شد. در بین گونه های مورد مطالعه بیشترین مقدار مواد استخراجی محلول در استون مربوط به گونه بلوط و کمترین آن مربوط به گونه صنوبر است. بیشترین و کمترین مقدار خاکستر به ترتیب برای گونه بلوط و گونه صنوبر به دست آمد.

ساعت سانتیفریوژ و با کاغذ صافی ۰/۸ میکرومتر صاف شدند تا مواد جامد معلق حذف شود. با استفاده از هیدروکسید سدیم pH نمونه در $7/6 \pm 1/1$ تنظیم شد و با اسپکترو فتومتر مدل DR۲۰۰۰ رنگ حقیقی پساب با واحد Pt-Co اندازه‌گیری شد.

تجزیه تحلیل آماری

برای ارزیابی اثر اختلاط چوب صنوبر بر ویژگی‌های مکانیکی و نوری خمیرکاغذهای شیمیایی مکانیکی تهیه شده، از آزمون تجزیه واریانس یک‌طرفه استفاده شد. در صورت معنی‌دار بودن، آزمون دانکن برای گروه‌بندی میانگین‌ها استفاده شد.

نتایج و بحث

ضرایب بیومتری و ترکیبات شیمیایی الیاف

جدول ۲ میانگین ابعاد و بازده الیاف را برای هر گونه چوبی نشان می‌دهد. گونه ممرز دارای بیشترین و گونه افرا دارای کوتاه‌ترین طول فیبر می‌باشد. بالاترین بازده الیاف

جدول ۲. ویژگی‌های الیاف و ترکیبات شیمیایی گونه‌های مختلف

ویژگی‌های الیاف و ترکیب شیمیایی	راش	توسکا	افرا	ممرز	کلهو	بلوط	صنوبر	بید
ضخامت دیواره (μm)	۶/۳۴	۵/۳۷	۴/۲۴	۵/۹۸	۵/۲۴	۶/۷۰	۵/۱۴	۳/۸۳
قطر حفره (μm)	۷/۲۲	۲۷/۲۶	۱۵/۷۱	۱۱/۶۶	۱۲/۷۴	۵/۱۴	۱۵/۴۰	۱۴/۲۶
قطر کلی (μm)	۱۹/۹۰	۳۸	۲۴/۱۹	۲۳/۶۲	۲۳/۲۲	۱۸/۵۴	۲۵/۶۸	۲۱/۹۲
طول الیاف (mm)	۱/۴۵	۱/۴۸	۰/۹۰	۱/۵۴	۱/۱۶	۱/۲۶	۱/۰۷	۰/۹۲
بازده الیاف (درصد)	۴۴/۸	۵۴/۵۷	۵۷/۸۷	۵۵/۳۵	۵۹/۱۲	۵۰/۶۹	۵۶/۰۷	۵۴/۹۹
ضریب رانکل	۶۳/۷۵	۳۹/۴۱	۵۳/۸۹	۱۰۲/۶۶	۸۲/۳۱	۲۶۰/۷۱	۶۷/۲۹	۵۳/۶۸
ضریب انعطاف‌پذیری	۳۶/۲۵	۷۱/۷۳	۶۴/۹۸	۴۴/۸۹	۵۴/۶۵	۲۷/۷۲	۵۹/۷۷	۶۵/۰۷
ضریب در هم رفتگی	۷۳/۰۳	۳۹/۰۶	۱۰۵/۹۴	۵۹/۱۹	۴۹/۷۰	۶۸/۰۴	۴۰/۶۷	۴۲/۲۴
خاکستر (درصد)	۱/۲۹	۰/۶۷	۰/۶۶	۰/۷۵	۱	۱/۶۷	۰/۴۸	۱/۳۱
مواد استخراجی (درصد)	۱۰/۶۶	۳/۵۰	۴/۶۶	۴/۵۲	۴/۸۳	۱۲/۱۶	۳/۳۳	۵
لیگنین (درصد)	۲۲/۴۶	۲۷/۵۰	۲۵/۶۰	۱۹/۳۰	۲۲/۲۰	۲۸/۴۰	۲۲/۷۰	۲۵/۵۰
سلولز (درصد)	۴۲/۵۸	۴۸/۰۳	۴۶/۰۸	۴۶	۴۷/۴۶	۴۰/۹۵	۵۱/۵۶	۴۵/۶۱

جدول ۳: کد تیمارها و نسبت زمان پخت گونه‌ها به صورت مجزا و اختلاط گونه‌ها برای تولید خمیر کاغذ CMP

تیمار	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
گونه	صنوبر	کلهو	ممرز	افرا	توسکا	راش	بید	بلوط	صنوبر ۳۲	صنوبر ۴۹	صنوبر ۶۴
زمان	۶۰	۲۵	۲۵	۲۵	۶۵	۳۰	۴۰	۲۵	۳۰	۴۰	۴۵
									مخلوط ۶۸	مخلوط ۵۱	مخلوط ۳۶

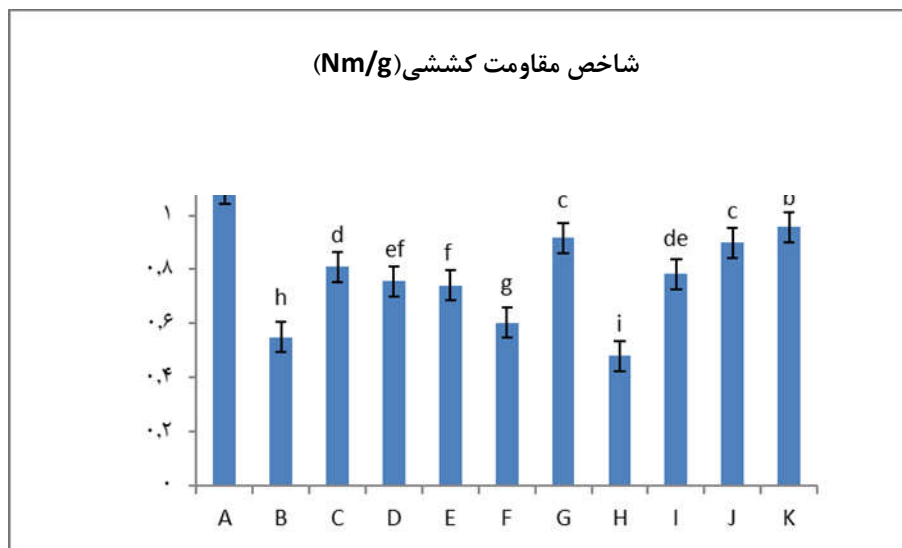
ویژگیهای مقاومتی کاغذ

شاخص مقاومت کششی کاغذ

یکی از مهم‌ترین مقاومت‌های کاغذ مقاومت کششی است، کاغذ باید بتواند در مقابل تنش کششی وارد شده مقاوم باشد، عواملی مانند طول الیاف، گراماژ، افزایش پالایش و فشار پرس تر بر این مقاومت تأثیر دارند. اثر تمامی موارد ذکر شده بر مقدار مقاومت کششی به صورت سطح نسبی پیونددار^۱ (RBA) بیان می‌شود و هر عاملی که بتواند سطح پیوند بین الیاف را محکم‌تر کند باعث افزایش مقاومت‌های کششی کاغذ خواهد شد [۹]. همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود بیشترین مقاومت کششی مربوط به گونه صنوبر است، که علت آن زیاد بودن مقدار سلولز و کم بودن مقدار لیگنین است که سبب افزایش ضریب نرمش الیاف و در نتیجه افزایش سطح اتصال بین الیاف خمیرکاغذ می‌شود (جدول ۲). همچنین کمترین مقاومت مربوط به گونه بلوط می‌باشد که الیاف آن دارای بیشترین مواد استخراجی و لیگنین هستند. در نتیجه میزان نرمش الیاف این گونه از دیگر موارد کمتر می‌باشد، این ویژگی سطح و میزان اتصال الیاف را کاهش داده و در نتیجه مقاومت کششی را کاهش

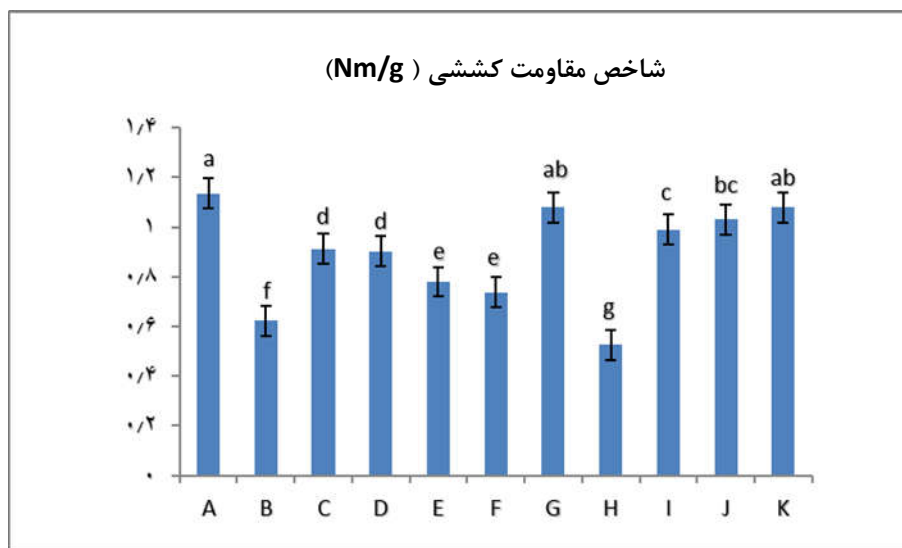
می‌دهد [۱۰]. شکل ۱ نشان می‌دهد که بیشترین شاخص مقاومت کششی مربوط به گونه صنوبر خالص (تیمار A) می‌باشد، در تیمار K با افزایش گونه صنوبر شاخص مقاومت کششی افزایش یافت. کمترین مقدار شاخص مقاومت کششی مربوط به تیمار H می‌باشد. بقیه تیمارها در گروه‌های مختلف وجود دارند و اختلاف معناداری بین آن‌ها مشاهده شد. با توجه به موارد ذکر شده در بالا تیمارهایی که بیشتر از گونه صنوبر و کمتر از گونه بلوط در ترکیب خود استفاده نمایند شاهد افزایش مقاومت کششی در خمیر کاغذ حاصل هستند.

همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، بعد از عمل رنگبری نیز مشابه قبل از رنگبری، افزایش سهم گونه صنوبر (۶۴ درصد)، با درصد سلولز بالا باعث افزایش مقاومت کششی خمیر کاغذ حاصل می‌شود [۱۰]. شاخص مقاومت کششی خمیرکاغذهای رنگبری شده در مقایسه با خمیرکاغذ رنگبری نشده افزایش یافته که احتمالاً دلیل آن انحلال قلیایی لیگنین است که باعث افزایش آب‌دوستی، انعطاف‌پذیری و پیوند بین الیاف می‌شود [۱۱]. تیمار G و K بعد از رنگبری بیشترین بهبود در این ویژگی را نشان دادند.



شکل ۱: تأثیر گونه‌ها به صورت مجزا و در ترکیب با صنوبر بر شاخص مقاومت کششی کاغذ قبل از رنگبری

¹ Relative Bonded Area

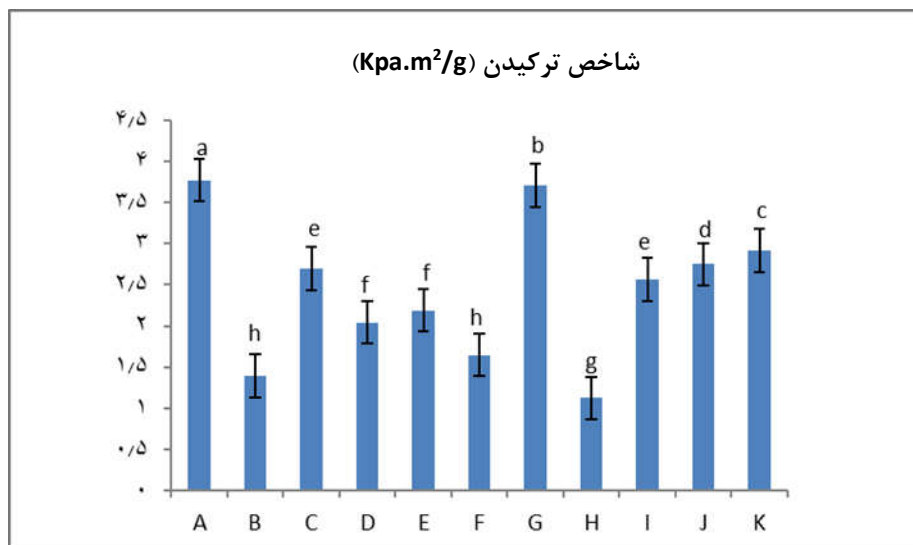


شکل ۲: تأثیر گونه‌ها به صورت مجزا و در ترکیب با صنوبر بر شاخص مقاومت کششی کاغذ بعد از رنگبری

شاخص مقاومت ترکیدن کاغذ

جایگزینی ۳۲ تا ۶۴ درصد چوب صنوبر با چوب گونه‌های جنگلی بومی و بید برای تولید خمیر کاغذ شیمیایی مکانیکی، افزایش معناداری در شاخص ترکیدن کاغذ در مقایسه با نمونه‌های دیگر نشان داد. میانگین‌های شاخص ترکیدن کاغذ براساس گروه‌بندی دانکن در ۱۱ گروه مستقل مشابه شاخص کششی قرار گرفتند. الیاف صنوبر و بید با دیواره نازک‌تر نسبت به بقیه گونه‌ها، قادر به ایجاد پیوندهای قوی‌تر هستند. با افزایش ضخامت الیاف و صلبیت گونه‌های بلوط و راش، پیوندها ضعیف‌تر می‌شوند.

اما در مقابل الیاف با دیواره نازک پس از کوبیدن به خوبی فشرده شده ۱ و در نهایت پیوندهای بین لیفی افزایش می‌یابد [۱۲ و ۱۳]. لذا بیشترین مقاومت به ترکیدن برای خمیر کاغذ تهیه شده از ۱۰۰ درصد چوب صنوبر و بید به دست آمده است. همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، بیشترین و کمترین مقدار شاخص مقاومت ترکیدن کاغذ به ترتیب مربوط به تیمارهای A و تیمار H است و در تمام تیمارها مشابه شاخص مقاومت کششی، با افزایش درصد صنوبر، این ویژگی نیز به صورت معناداری افزایش می‌یابد.

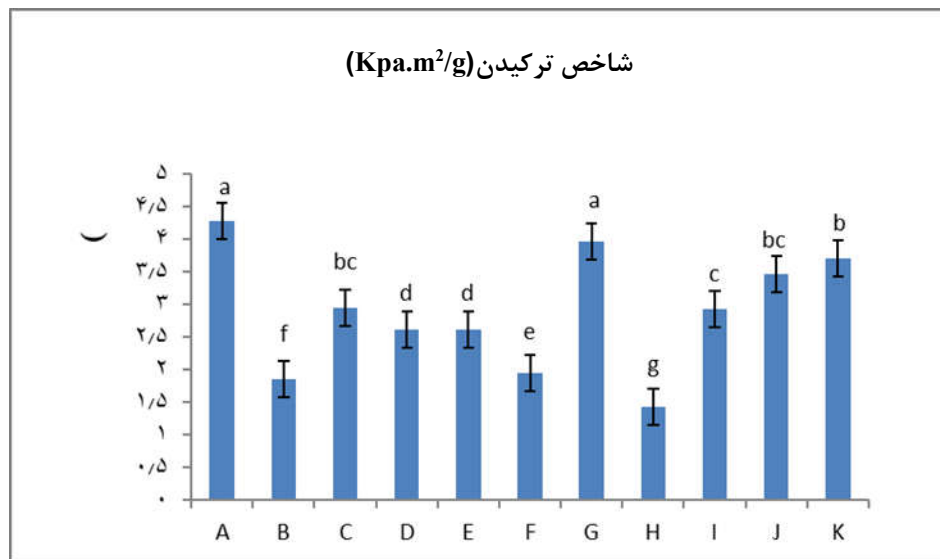


شکل ۳: تأثیر گونه‌ها به صورت مجزا و در ترکیب با صنوبر بر شاخص مقاومت ترکیدن کاغذ قبل از رنگبری

¹ Collapsation

رنگبری بیشترین مقدار شاخص مقاومت در برابر ترک‌کندن برای تیمارهای A و G به دست آمد. بعد از عمل رنگبری نیز مشابه قبل از رنگبری، با افزایش سهم گونه صنوبر تا ۶۴ درصد در تمام تیمارها، مقدار شاخص مقاومت در برابر کشش سیر صعودی دارد. تیمار G بعد از رنگبری بیشترین بهبود در این ویژگی را نشان داد. به‌طوری که تیمار G بعد از رنگبری با تیمار A که بالاترین مقدار این ویژگی را در بین تیمارها دارد، از نظر میانگین شاخص مقاومت کششی در یک گروه قرار می‌گیرد.

میانگین مقاومت ترک‌کندن کاغذ در خمیرکاغذهای تهیه شده از اختلاط درصد چوب صنوبر، مشابه با میانگین مقاومت کششی، اختلاف معناداری بین گونه‌ها داشت. مقاومت به ترک‌کندن از جمله مقاومت‌هایی است که به میزان پیوند الیاف بستگی دارد. به این معنی که هر چقدر الیاف انعطاف‌پذیرتر باشند، به دلیل ایجاد اتصالات هیدروژنی بیشتر، پیوند بین الیاف افزایش یافته و در نتیجه مقاومت کاغذ در برابر ترک‌کندن افزایش می‌یابد [۱۴]. همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود بعد از

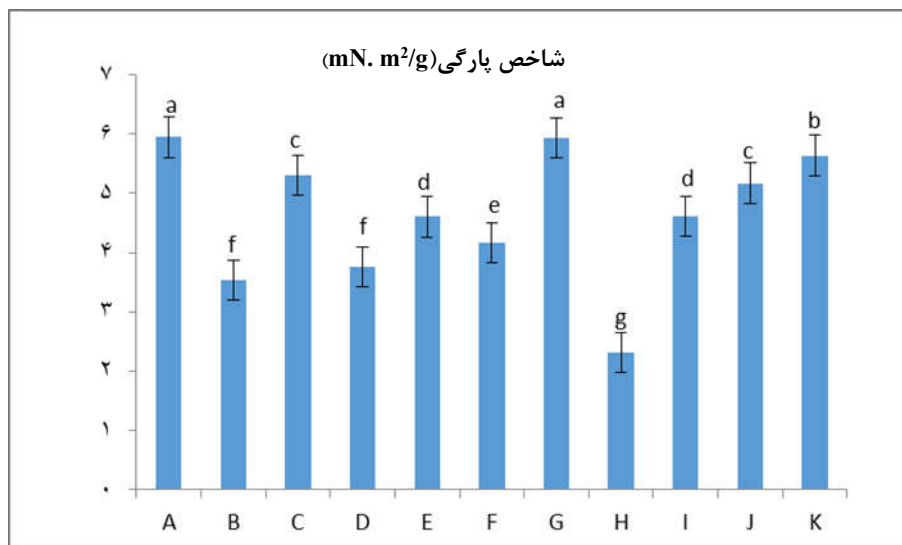


شکل ۴: تأثیر گونه‌ها به صورت مجزا و در ترکیب با صنوبر بر شاخص مقاومت ترک‌کندن کاغذ بعد از رنگبری

بودن میزان لیگنین و زیاد بودن میزان سلولز صنوبر در مقایسه با گونه‌های دیگر است (جدول ۲)، زیرا این ویژگی‌ها می‌تواند با افزایش سطح و میزان پیوند بین الیاف، شاخص مقاومت به پاره شدن خمیرکاغذهای حاصل را افزایش دهد. لذا بیشترین مقاومت به پارگی برای خمیرکاغذ تهیه شده از ۱۰۰ درصد چوب صنوبر و بید به دست آمده است [۱۰]. بیشترین مقدار شاخص مقاومت پارگی کاغذ قبل از رنگبری در تیمار A و G و کمترین آن در تیمار H مشاهده شد. تیمارهای B و D در یک گروه و از نظر این ویژگی در رتبه پنجم قرار می‌گیرند.

شاخص مقاومت پاره شدن کاغذ

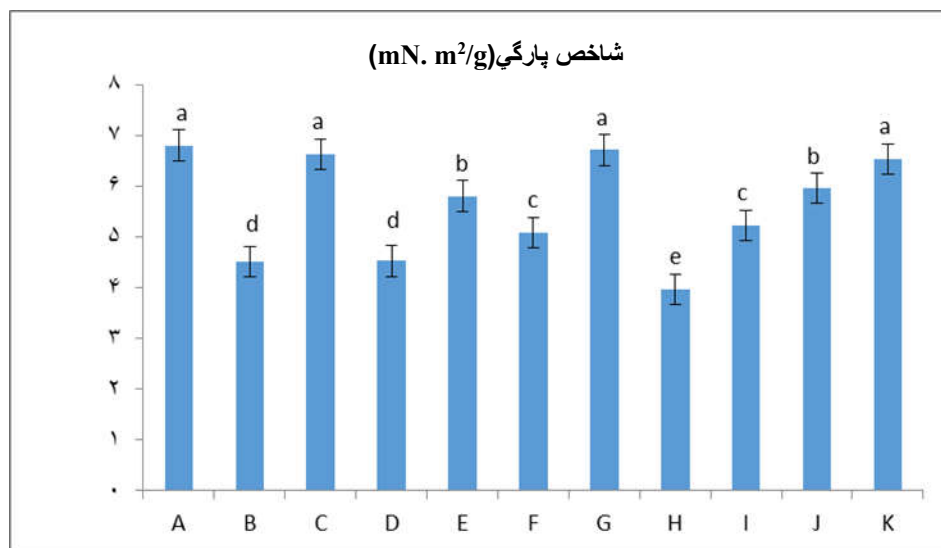
مقاومت پاره شدن الیاف کاغذ وابسته به دو عامل اصلی طول الیاف و تعداد پیوند بین الیاف می‌باشد. از آنجایی که صنوبر و بید دارای دیواره نازکی هستند، پس از پالایش الیاف و متورم شدن به خوبی روی هم فشرده می‌شوند در نتیجه تعداد پیوند بین الیاف افزایش می‌یابد که این عامل باعث افزایش مقاومت به پاره شدن کاغذ می‌شود [۱۵]. در تیمارهای آزمایش با افزایش درصد مصرف صنوبر میزان شاخص مقاومت در برابر پاره شدن خمیرکاغذهای حاصل افزایش می‌یابد که احتمالاً دلیل آن ضریب انعطاف‌پذیری زیاد صنوبر و بید و همچنین کم



شکل ۵: بررسی گونه‌ها به صورت مجزا و در ترکیب با صنوبر بر شاخص مقاومت پارگی کاغذ قبل از رنگبری

پارگی کاغذ ضخامت دیواره الیاف است [۱۴]. از آنجایی که در این تیمارها، کاغذ ۶۰ گرمی دست‌ساز ساخته شده که فاقد جهت‌گیری بودند پس عملاً "جهت‌گیری الیاف در مقاومت پارگی نقشی نداشت، بعد از رنگبری خمیرکاغذ، بیشترین شاخص مقاومت پارگی کاغذ در تیمار (C, A و G) به جهت دارا بودن ضخامت دیواره نازکتر، طول الیاف بلندتر همچنین میزان وجود سهم زیاد الیاف انعطاف‌پذیر و درصد بالای سلولز می‌باشد.

در مقایسه خمیرکاغذ رنگبری شده نسبت به رنگبری نشده، شاخص مقاومت به پارگی خمیرکاغذهای رنگبری شده افزایش یافت که مهم‌ترین دلایل آن می‌تواند خروج بیشتر لیگنین همراه با افزایش انعطاف-پذیری الیاف باشد [۱۱ و ۱۶]. مقاومت پارگی کاغذ بیشتر تحت تأثیر الیاف بلند و جهت‌گیری آنها است و در خلاف جهت غالب الیاف و ماشین ۱ به حداکثر میزان خود می‌رسد [۱۷]. شکل ۶ مقاومت به پاره شدن کاغذ بعد از رنگبری را نشان می‌دهد که مهم‌ترین عاملی در مقاومت



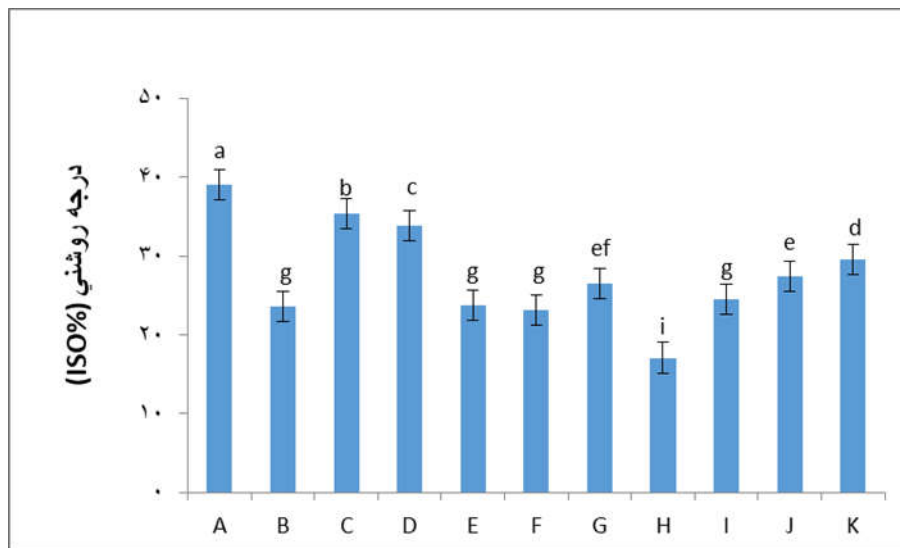
شکل ۶: بررسی گونه‌ها به صورت مجزا و در ترکیب با صنوبر بر شاخص مقاومت پارگی کاغذ بعد از رنگبری

¹ Cross direction (CD)

درجه روشنی

میانگین اعداد حاصل از آزمون درجه روشنی خمیرکاغذ بر اساس گروه‌بندی دانکن در ۱۱ گروه مستقل قرار گرفت. نتایج حاصله نشان داد که بیشترین درجه روشنی مربوط به گونه صنوبر و کمترین آن مربوط به گونه افرا و ممرز بعد از رنگبری وجود ندارد و میانگین روشنی هر دو خمیرکاغذ خالص در گروه b قرار می‌گیرد. این در حالی است که بین میانگین روشنی قبل از رنگبری این دو گونه اختلاف معنادار است، به این معنی که رنگبری گونه افرا با شرایط ثابت اعمال شده برای همه خمیرها نسبت به گونه افرا آسان‌تر است. کاهش روشنی خمیرکاغذ تهیه شده از مخلوط گونه‌ها با توجه به حد روشنی قابل قبول برای کاغذ چاپ و تحریر (حدود ۶۸ درصد ایزو)، نشان‌دهنده لزوم افزودن خمیرکاغذ الیاف بلند سفید می‌باشد. با توجه به نتایج به‌دست آمده، تفاوت در درجه روشنی می‌تواند به عواملی مانند مقدار لیگنین و سلولز مرتبط باشد؛ مثلاً گونه بلوط میزان لیگنین بیشتر و سلولز کمتری نسبت به گونه‌های دیگر دارد و این امر موجب کاهش درجه روشنی شده است. می‌توان دریافت که پراکسید هیدروژن علاوه بر رنگبری بیش‌تر خمیرکاغذ

سبب جلوگیری از واکنش‌های زرد شدن در فرآیند شده است [۱۸]. درجه روشنی این خمیرکاغذها نیز با افزایش درصد اختلاط چوب صنوبر از ۳۲ تا ۶۴ درصد افزایش یافت. در سطح اطمینان ۹۵ درصد اختلاف معناداری وجود دارد که بیشترین مقدار مربوط به استفاده از ۱۰۰ درصد چوب صنوبر بود. از جمله دلایل این روند افزایشی را می‌توان سفیدی اولیه بیشتر در گونه صنوبر در مقایسه با بقیه گونه جنگلی تیره‌تر نسبت داد. انتظار می‌رود که بیشتر بودن درجه روشنی اولیه خمیرکاغذهای تهیه شده از اختلاط چوب صنوبر، به استفاده از پراکسید هیدروژن کمتری برای رنگبری خمیرکاغذ چاپ و تحریر با درجه روشنی نهایی حدود ۶۸٪ در کارخانه چوب و کاغذ مازندران منجر شود. از طرف دیگر، می‌توان کاهش بار پساب و در نتیجه کاهش عملیات تصفیه پساب را در این خصوص انتظار داشت [۱۹]. در شکل ۷ مشاهده می‌شود که قبل از رنگبری خمیرکاغذ، بالاترین درجه روشنی مربوط به تیمارهای حاوی تیمار A با درجه روشنی ۵۵/۰ $\pm$ ۳۹/۹۲ درصد دیده می‌شود. تیمارهای B، E و F از نظر این ویژگی در یک گروه و در رتبه ششم قرار می‌گیرند.



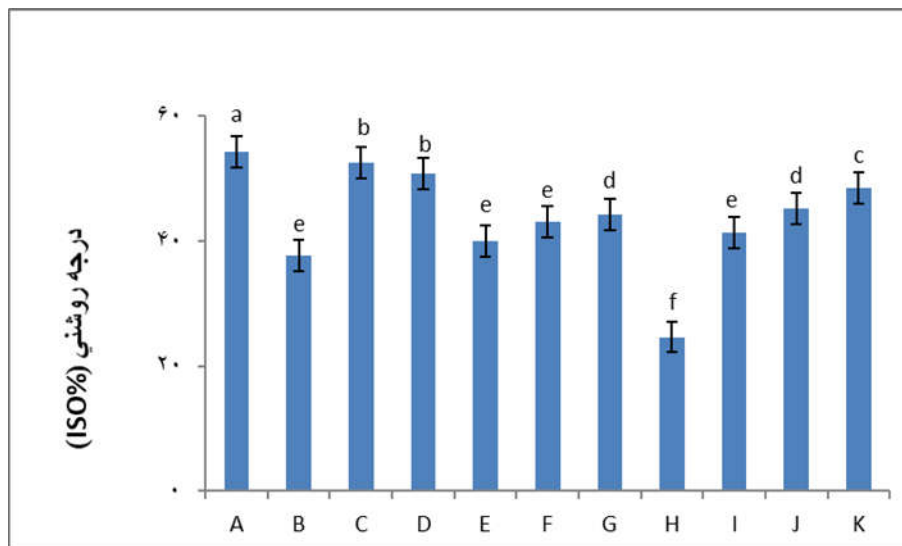
شکل ۷: تأثیر گونه‌ها به صورت مجزا و در ترکیب با صنوبر بر روشنی کاغذ قبل از رنگبری

پراکسید به یون HOO تبدیل می‌شود و این یون به ساختار گروهای جاذب نور در لیگنین حمله می‌کند و سبب تخریب گروه‌های رنگساز موجود در ساختار لیگنین

درجه روشنی خمیرکاغذهای رنگبری شده در مقایسه با خمیرکاغذ رنگبری نشده افزایش یافته است. در عمل رنگبری در شرایط قلیایی،

میزان درجه روشنی با شرایط رنگبری کارخانه برای تیمار A با درجه روشنی $43 \pm 0/19$ درصد است. تیمار A و تیمار H به ترتیب دارای بیشترین و کمترین درجه روشنی بعد از رنگبری هستند.

می‌شود [۲۰]. در خط تولید خمیر کاغذ شیمیایی - مکانیکی کارخانه صنایع چوب و کاغذ مازندران سیستم تغذیه کننده مارپیچی باعث خروج درصد بالایی از مواد رنگ‌ساز مانند لیگنین و مواد استخراجی می‌شود. بالاترین



شکل ۸: تأثیر گونه‌ها به صورت مجزا و در ترکیب با صنوبر بر روشنی کاغذ بعد از رنگبری

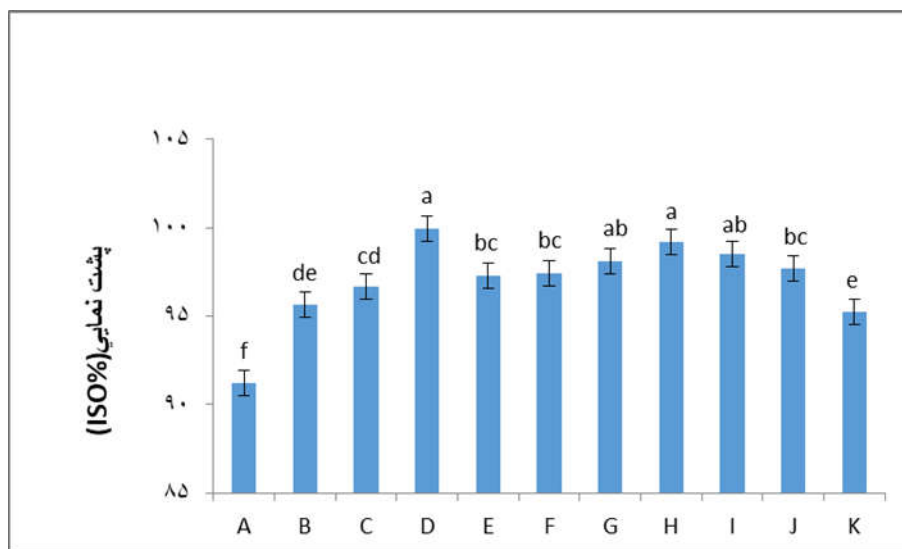
انعطاف‌پذیری الیاف بر ضریب پراکندگی نور اثرگذار است [۲۳]. مقایسه ماتی کاغذهای دست‌ساز نشان داد که ماتی کاغذ تیمارهای D و H از سایر تیمارها بیشتر است. این در حالی است که میانگین ماتی کاغذ تهیه شده از ۱۰۰ درصد صنوبر خالص به صورت معناداری از سایر تیمارها کمتر است و در گروه مستقل F قرار می‌گیرد، مشابه ویژگی‌های قبلی، بین کاغذ متشکل ۳۲ درصد الیاف چوب صنوبر با ۶۴ درصد صنوبر اختلاف معناداری وجود دارد (شکل ۹). سه تیمار حاوی گونه‌های که درصد بیشتر صنوبر در ترکیب خود دارند دارای کمترین درصد ماتی هستند.

ماتی کاغذ

یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های کاغذ چاپ و تحریر ماتی آن است که به‌طور مستقیم به حجمی آن ارتباط دارد. ماتی بیشتر در کاغذ چاپ و تحریر موجب کاهش عبور مرکب به طرف دیگر کاغذ ۱ یا مشکل دیده شدن قسمت-های چاپ شده طرف دیگر ۲ می‌شود [۲۱]. مقایسه میانگین‌های ماتی کاغذ ساخته شده از ۳۲ تا ۶۴ درصد چوب صنوبر روندی کاهشی را نشان داد. در این تحقیق، میانگین ماتی اندازه‌گیری شده برای خمیر کاغذ شیمیایی - مکانیکی تهیه شده از صنوبر، نسبت به سایر تحقیقات منتشر شده (XU, 2009) بیشتر است. افزایش سطح اتصالات بین لیفی، اثر معکوسی بر ماتی کاغذ دارد [۲۲].

¹ Ink show through

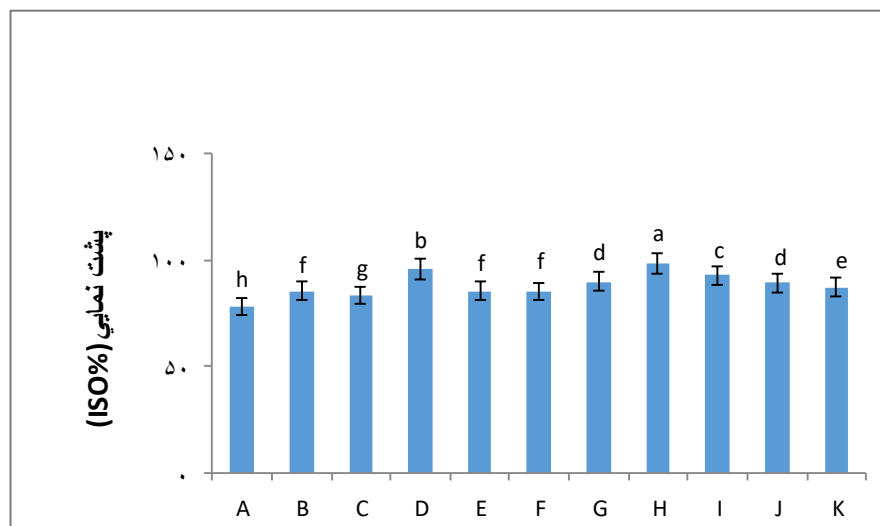
² Print-through



شکل ۹: تأثیر گونه‌ها به صورت مجزا و در ترکیب با صنوبر بر ماتی کاغذ قبل از رنگبری

در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، در کلیه تیمارها با رنگبری خمیر کاغذ، ماتی در مقایسه کاغذهای رنگبری شده کاهش می‌یابد. کاهش حجم کاغذ سبب کاهش تفرق و شکست نور در بین الیاف می‌شود.

قابلیت لهیدگی و ضریب انعطاف‌پذیری زیاد در صنوبرها موجب افت ضریب پخش نور^۱ شده که در نتیجه ماتی کاهش می‌یابد [۲۴]. نرمه‌های خمیر کاغذ شیمیایی-حرارتی- مکانیکی صنوبر دارای سطح ویژه کم و در نتیجه ضریب پراکندگی نور کمتری هستند [۲۵]. همان‌طور که



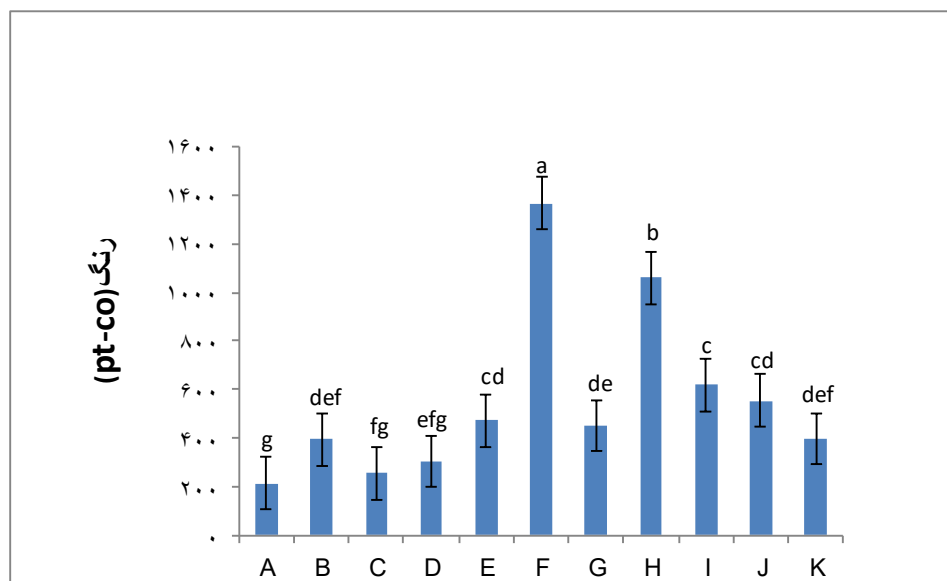
شکل ۱۰: تأثیر گونه‌ها به صورت مجزا و در ترکیب با صنوبر بر ماتی کاغذ بعد از رنگبری

^۱ Light-scattering coefficient

رنگ پساب شستشوی خرده چوب

ترکیبات رنگی، ترکیبات شیمیایی آلی یا معدنی هستند که در پساب یافت می‌شوند. این مواد به دلیل وجود زنجیره‌های طولانی پیوندهای کربن-کربن یک گانه و دوگانه می‌توانند طیف‌های نور مرئی را جذب کنند. پساب تازه ممکن است رنگ قهوه‌ای روشن یا خاکستری داشته باشد که با گذشت زمان تیره می‌شود [۲۶ و ۲۷]. کاهش رنگ پساب صنعتی و رعایت استانداردهای زیست‌محیطی برای تخلیه به آب‌های سطحی ضروری است. پساب رنگی بر خواص زیبایی‌شناختی آب تأثیر منفی می‌گذارد و غلظت اکسیژن محلول را کاهش می‌دهد و حیات آبریان را در معرض خطر قرار می‌دهد [۲۸].

پساب خمیر و کاغذ حاوی درصد بالایی از ترکیبات لیگنین و تانن و مشتقات آنها است. این ترکیبات باعث آلودگی و تغییر رنگ پساب می‌شوند [۲۹]. همان‌طور که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود، رنگ پساب شستشوی خرده چوب در تیمارهای H و F بیشترین مقدار را داشت. این ممکن است به دلیل معرفی گونه‌هایی با محتوای مواد استخراجی و تا حدودی لیگنین بالا باشد که می‌توانند بیشترین تأثیر را بر رنگ پساب داشته باشند (جدول ۱). با کاهش درصد این گونه‌ها و افزایش درصد صنوبر و مرز، رنگ کاهش یافت. در تیمارهای J، I و K، با کاهش مخلوط گونه‌های با محتوای استخراجی بالا و افزایش درصد صنوبر به ۶۴٪، رنگ پساب کاهش یافت [۲۸].

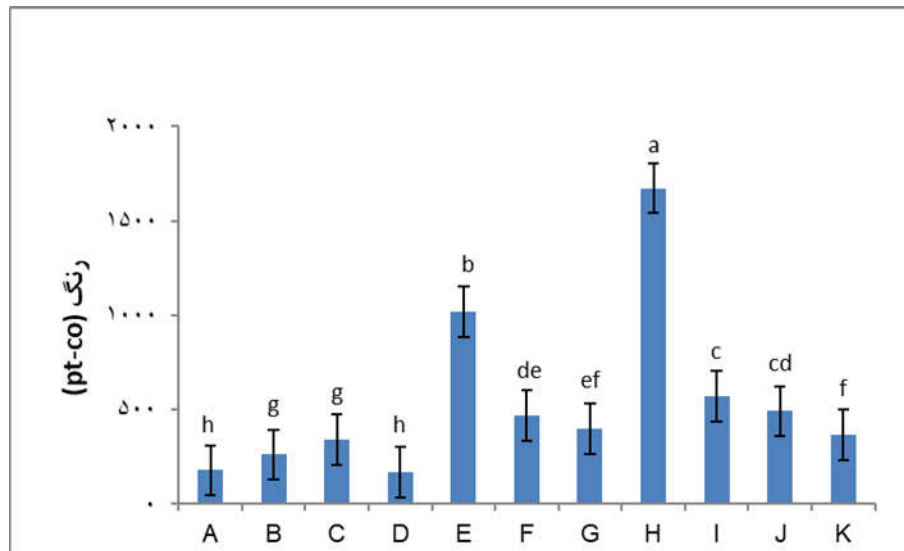


شکل ۱۱: بررسی رنگ پساب شستشوی گونه‌ها و در ترکیب با صنوبر به صورت مجزا

رنگ پساب رنگبری

پساب کارخانه چوب و کاغذ، در طول فرآیند خمیرسازی شیمیایی، به دلیل آزاد شدن لیگنین چوب، که ترکیبی مقاوم در برابر تجزیه بیولوژیکی و تصفیه است، رنگ بالایی دارد. علاوه بر این، وجود فلزات خاصی مانند آهن در پساب می‌تواند باعث تشکیل رنگ شود [۲۶ و ۲۷]. علاوه بر ترکیبات تانن و لیگنین که به عنوان آلاینده‌های اصلی در پساب‌ها شناخته می‌شوند، ترکیباتی مانند اسیدهای چرب، اسیدهای آروماتیک، مواد آلی طبیعی و غیره از جمله مواد استخراجی چوب هستند که نقش مهمی در آلودگی پساب دارند [۳۰]. رنگ پساب رنگبری برای هر تیمار در شکل ۱۱ نشان داده شده است.

ترکیبات رنگی، ترکیبات شیمیایی هستند که نور ماوراء بنفش و مرئی را جذب می‌کنند. بیشتر رنگ‌ها کمپلکس‌هایی از ترکیبات آلی هستند. مولکول‌های رنگی از دو بخش کلیدی تشکیل شده‌اند: کروموفور، که مسئول تولید رنگ است و معمولاً حاوی یک پیوند دوگانه مزدوج است و اگزوکروموفورها [۳۱]. بالاترین رنگ پساب رنگبری مربوط به تیمارهای E و H بود که دارای گروه‌های تشکیل‌دهنده رنگ در لیگنین و مواد استخراجی در ساختار دیواره الیاف خمیر کاغذ بودند. در طول پخت، این گروه‌های رنگ‌ساز و مواد استخراجی از دیواره فیبر آزاد می‌شوند و رنگ پساب را افزایش می‌دهند.



شکل ۱۲: بررسی رنگ پساب رنگبری گونه‌ها به صورت مجزا و در ترکیب با صنوبر

حدودی لیگنین بالا که می‌توانند بیشترین تأثیر را بر رنگ پساب داشته باشند و افزایش درصد صنوبر و ممرز، شاهد کاهش رنگ خواهیم بود. بنابراین، بر اساس ویژگی‌های نوری و مقاومت‌های کاغذ حاصله، امکان جایگزینی صنوبر با بخشی از دو گونه بومی جنگلی مورد استفاده وجود دارد.

منابع

- [1]. Abd El-Sayed, E.S., El-Sakhawy, M. and ElSakhawy, M.A.-M., 2020. Non-wood fibers as raw material for pulp and paper industry. *Nordic Pulp & Paper Research Journal*, 35, pp. 215–230
- [2]. Vaysi, R. and Ebadi, S.E., 2021. Thermal yellowing of hornbeam chemi-mechanical pulps bleached with hydrogen peroxide and sodium dithionite, *BioResources* 16, 7635-7647.
- [3]. Zeinaly, F Resalati, H. and Tasooji, M., 2011. Investigation Effect of Using Branch Woods of Hornbeam and Beech in compound of hardwoods Stems Wood Mixture on CMP Pulp Properties. *J. of Wood & Forest Science and Technology*, 18(1): 77-90 (In Persian).
- [4]. Goli, M., Asadpur, Gh., Mahdavi, S. and Barimani, A., 2015. Investigation on Combining Aspen Wood with two Native Hardwoods Species for Chemi-Mechanical Pulping, *Iranian Journal of Wood and Paper Science Research*, 30 (4): 662-673
- [5]. Soleimani, A., Resalati, H., Akbarpour, I. (2012). The effect of using white birch on mechanical properties and fiber length distribution of mixed hardwood cmp pulp. *Lignocellulose*, 1(2): 83-91.
- [6]. Goli, M Asadpour, G, and Saeid M. (2015). A Barimani Effect of birch wood mixing on optical and

نتیجه‌گیری

در این مطالعه، اثر جایگزینی چوب صنوبر با مخلوط گونه جنگلی بومی پهن‌برگ و بید بر ویژگی‌های نوری و مقاومت‌های خمیر کاغذ شیمیایی- مکانیکی سولفیت قلیایی به عنوان بخشی از ماده اولیه صنایع چوب و کاغذ مازندران در تولید خمیر کاغذ چاپ و تحریر با استفاده از روش CMP مورد بررسی قرار گرفت. با افزایش نسبت اختلاط چوب صنوبر از ۳۲ تا ۶۴ درصد، در اختلاط با گونه‌های دیگر، مقاومت‌های مکانیکی و درجه روشنی دارای روند افزایشی بود. این موضوع می‌تواند سبب کاهش هزینه از طریق کاهش مواد رنگبر و تیمار پساب شود. همچنین نتایج بیانگر این امر بوده است که استفاده از گونه‌های دیگر هر یک به دلیل ضعف مجزای مربوط به گونه خود همچون درصد لیگنین زیاد و ضریب انعطاف- پذیری کم الیاف بلوط و همچنین کم بودن طول الیاف افرا، میزان ویژگی‌های مقاومتی و درجه روشنی افت پیدا می‌کند، در حالی که میزان ماتی تا حدودی بهبود می‌یابد. بدیهی است که استفاده از خمیر الیاف بلند و نیز پرکننده‌های معدنی که به صورت متداول در خمیر کاغذ شیمیایی- مکانیکی مرسوم است نیز می‌تواند ویژگی‌های مکانیکی و نوری کاغذ ساخته شده را بهبود بخشیده و ویژگی‌های مورد نیاز کاغذ چاپ و تحریر را بر اساس مقادیر مجاز استاندارد ارتقاء بخشد. با کاهش گونه‌های مثل بلوط، راش و توسکا با محتوای مواد استخراجی و تا

- [20]. Gullichsen, J., Hanna, P. (2000). Recycle fiber and deinking. Book 7, Papermaking Science and Technology, Fapet Oy, Helsinki, Finland, 427p
- [21]. Xu, E.C., 2009. Chemical- mechanical pulping of eucalyptus - latest development and comparison, *Revista Celulosa y Papel*, 8, 6-17.
- [22]. Wood, J. R. and Karais, A., 1991. Future furnish requirements for newsprint and mechanical printing paper, *Pulp Pap. Canada* 9291): 72-75.
- [23]. Mark, R. E., Habeger, C.C., Borch, J. and Lyne, M.B., 2002. *Handbook of Physical Testing of Paper*, Vol. 1, CRC Press, 1027p
- [24]. Rasouli Garमारoudi, E., Resalati, H. and Mahdavi, S., 2008. Effect of wood raw material combination on the properties of chemi-mechanical pulp for making newsprint, *Pajouhesh & Sanzandegi*, 76(3): 69-72 (In Persian)
- [25]. Wu, M.R., Lanouette, R. and J.L. Valade, 2004. Understanding the fiber development during co-refining of white birch and black spruce mixtures. Part 1. Chemithermomechanical pulping, *Pulp Pap. Canada*, 105(12): 83-87
- [26]. Metcalf, T., & Eddy, I. (1991). *Wastewater Engineering: Treatment, Disposal, and Reuse*. McGraw-Hill Book Company, 3rd Edition, New York
- [27]. Hubbe, M.A., Metts, J.R., Hermosilla, D., Blanco, M.A., Yerushalmi, L., Haghighat, F., Lindholm-Lehto, P., Khodaparast, Z., Kamali, M.R., & Elliott, A. (2016). Wastewater treatment and reclamation: A review of pulp and paper industry practices and opportunities. *BioResources*, 11(3), 7953-8091.
- [28]. Zabihzadeh, S.M., & Asadpour, Q. (2008). The effect of wood species on the quality of the effluent of mechanical chemical paper pulp production unit. The Second National Conference of World Environment Day, 6 pp. (In Persian).
- [29]. Stephenson, R.J., & Duff, J.B. (1996). Coagulation and precipitation of mechanical pulping effluent: Toxicity removal and metal salt recovery. *Water Research*, 30(4), 793-798
- [30]. Bruce, C.L., & Kisling, K.D. (1996). Color removal from effluent water. Application for Canadian Patent, No. 2175128. (In Persian).
- [31]. Griffiths, J. (2003). *Development in the Chemistry and Technology of Organic Dyes*. Tehran: Jahad Daneshgahi, Amirkabir Industrial Unit Publications. 192 pages.
- mechanical properties of CMP pulp produced from forest species wood Iranian journal of sciences and technical natural resources), 30(4):662-673. (In Persian)
- [7]. Reid, I.D., Bourbonnais, R., & Paice, M.G. (2010). Biopulping and biobleaching. In: Heitner, C., Dimmel, D.R., & Schmidt, J.A. (Eds.), *Lignin and Lignans: Advances in Chemistry*. CRC Press, Boca Raton, 521-554.
- [8]. Hosseini, Z. (2000). Fiber morphology in wood and pulp, Gorgan University of Agricultural Sciences & Natural Resources Press, Gorgan.
- [9]. Wang, B., Li, R., He, B. and Li, J., 2011. Fiber lignin coverage vs. strength, *Bioresources*, 6(4): 4356-4369. Website of information cellulose industries of Iran 2014, <http://www.paperandwood.com>
- [10]. Sixta, H. (2006). *Handbook of Pulp*, Volume 1, Wiley-VCH publication. Austria
- [11]. Mirshokrai, A. (2000). *Handbook of Pulp and Paper Technology*. 2nd Ed., Aeij, Tehran, 520p (In Persian)
- [12]. Safdari, V., 2010. Morphological characteristics and chemical components of *Ulmus glabra*, *Ulmus campestris*, *Zelkova carpinifolia*, *Celtis australis* woods. *Iranian Journal of Wood and Paper Science Research*, 25 (2):248-259 (In Persian).
- [13]. Luostarinen, K... and Mottonen, V., 2010. Radial variation in the anatomy of *Betula pendula* wood from different growing sites. *Baltic forestry*, 16(2): 209-216.
- [14]. Afra, E. (2003). *Properties of Paper*. Agricultural Sciences Press, 392p. (In Persian).
- [15]. Scott, W. (2002). *Properties of Paper*, an Introduction, Aij Press, Tehran, 392 pages.
- [16]. Latibari, A., Khosravani, A., and Rahmaninia, M. (2007). *Tec hnology of Paper Recy cling*, Aeij Press, Tehran.
- [17]. Nazeri, A, M., Talaeepoor, M. and Mirshokraie, S, A., 2008. The Study of Fiber Fines and Its Effects on Mechanical Strength of Newsprint Paper from CMP Pulp. *Iranian Journal of Wood and Paper Science Research* 22 (2): 29-40. (In Persian)
- [18]. Bajpai, P. (2012). *Environmentally Benign Approaches for Pulp Bleaching* (Second Edition). ISBN: 978-0-444-59421-1, Elsevier, 400 pages.
- [19]. Vesterlind, E.L. and Höglund, H., 2006. Chemitermomechanical pulp made from birch at high temperature. *Nordic Pulp and Paper Research Journal*, 21(2): 216-221.