Research Article

Iranian Journal of Wood and Paper Science Research
Vol. 40, No. 3, Page 263-279 (2025)
DOI: 10.22092/ijwpr.2025.369326.1803

The potential of using cotton linter as substitute for imported long fiber in newsprint production

Ramin Vaysi[1*], Hossine Resalati[2] and Rabi Behrooze[3]

1*- Corresponding author, Associate Prof., Dept. of Wood and Paper Science and Technology, Cha. C., Islamic Azad University, Chalous, Iran, Email:vaysi_r452@yahoo.com.
2-Retired Professor, Department of Pulp and Paper Industries, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources. Faculty of Wood and Paper Engineering - Department of Pulp and Paper Industries. Gorgan, Iran
3-Associate Prof., Dept. of Wood and Paper Science and Technology, Tarbiat-Modares University, Faculty of Natural Resources, Noor, Iran

Received: 01 May 2025 Revised: 22 May 2025 Accepted: 09 June 2025 Published online: 19 September 2025

Abstract

Background and aim: Currently, in Iran, CMP pulp for newsprint production is produced from a mixture of about 50% birch, 20% poplar, and 30% mixtures of other wood species. To improve the strength properties and runability of the papers during production and printing, it is necessary to use about 17% imported long fibers. This imported pulp, which is usually coniferous kraft pulp and is imported from other countries (Finland), creates dependency and causes large amounts of foreign exchange to be spent and withdrawn from the country annually. On the other hand, in the Behshahr Linter-Pak factory, which is located at a distance of about 50 kilometers from Mazandaran Wood and Paper industries (MWPI), more than 10,000 tons of purified cotton linter are produced annually. Which is of great importance due to its convenient availability, ease and low cost of transporting the material. For this purpose, this research was conducted with the aim of using cotton linter instead of imported long fiber pulp in newsprint.

Materials and methods: To conduct this research, test samples of purified cotton linter from the Behshahr Linter-Pak factory, imported long fiber pulp and CMP pulp from the MWPI were randomly selected. In the first stage, freeness, fiber classification and biometric properties of their fibers were measured. Then, using a PFI mill laboratory refiner, the imported long fiber pulp and cotton linter were refined to the freeness of 500, 450, and 400 CSF, and CMP pulp was refined to freeness of CSF450, 400, and 350 CSF. In the next step, the refined imported long fibers and cotton linters was mixed separately and in proportions of 10, 15, 20, and 25 percent with the CMP pulp of MWPI. The handsheets with the basis weight of 60 gr/m2 were prepared from selected samples and tested according to TAPPI test procedures. A spectrophotometer was used to measure the optical properties of the prepared papers, accordingly, the brightness, yellowness and opacity

of handsheets was determined. Then, the strength properties, especially the tear strength, burst, tensile and breaking length of the handsheets were measured and compared using standard TAPPI tests.

Results: The results of the fiber classification of cotton linter. and imported long pulp showed that the weight percentage of long fibers (14 and 48 meshes) of cotton linter and its dispersion were higher and its fine particles (fines) were lower than imported long fibers. Biometric characteristics of cotton linter fibers and imported long fibers showed that the average fiber length, felting and flexibility coefficients of cotton linter fibers were higher, and their total diameter, lumen diameter, double wall thickness, and Runkel coefficient were lower than those of imported long fibers. Also, with increasing refining revolutions (rpm), the freeness in long fibers and cotton linter showed a decreasing trend. By increasing the percentage of cotton linter and imported long fibers mixed from 10 to 25 percent, the brightness and yellowness of the handsheets improved and its opacity decreased. By adding long fibers and cotton linter and a mixture of cotton linter + long fibers from 10 to 25% to CMP pulp, tensile, burst, tear strengths, and breaking length increased. This increase is milder with the addition of cotton linter to CMP pulp. The paper made from adding cotton linter to CMP pulp has always had the lowest strength properties, and paper made from adding imported long fibers to CMP pulp has had the highest strength properties.

Discussion: Given that cotton linter does not respond well to refining due to its crystalline structure, beater may be more suitable due to its longer and gentle refining. In this regard, the strength properties of paper made from cotton linters have always been lower than those of imported long- fibers. However, the use of a mixture of cotton linter + long fibers, especially in freeness of 400 and 450 CSF, can replace a portion of imported long fibers in newsprint due to its suitable optical and strength properties comparable to imported long fibers.

Keywords: Cotton linter, imported long fibers, refining, fiber biometry, optical and strength properties.

ظرفیت استفاده از لینتر پنبه به عنوان خمیر الیاف بلند وارداتی در تولید کاغذ روزنامه

رامین ویسی[۱*]، حسین رسالتی[۲] و ربیع بهروز[۳]

۱*- نویسنده مسئول، دانشیار، گروه صنایع چوب و کاغذ، واحد چالوس، دانشگاه آزاد اسلامی، چالوس، ایران،

پست‌الکترونیک: mailto:vaysi_r452@yahoo.com

۲- استاد، گروه صنایع خمیر و کاغذ، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

۳- دانشیار، گروه صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۱۱ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۳/۰۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۱۹ تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۶/۲۸

چکیده

سابقه و هدف: در حال حاضر، در ایران خمیرکاغذ CMP و کاغذ روزنامه از حدود ۵۰ درصد غان، ۲۰ درصد صنوبر و حدود ۳۰ درصد مخلوط سایر گونه‌های چوبی تولید می‌شود. برای بهبود خصوصیات مقاومتی کاغذ حاصل و بهبود قابلیت حرکت‌پذیری کاغذ در هنگام تولید و چاپ، نیاز به به‌کارگیری حدود ۱۷ درصد الیاف بلند وارداتی است. این خمیرکاغذ وارداتی که معمولاً خمیرکاغذ کرافت سوزنی‌برگ است و از سایر کشورها وارد ایران می‌شود، ضمن ایجاد وابستگی، سالیانه باعث خروج مقادیر زیادی ارز از کشور نیز می‌گردد. از سوی دیگر، در کارخانه لینتر پاک بهشهر که در فاصله حدود ۵۰ کیلومتری چوب و کاغذ مازندران قرار دارد، سالیانه بیش از ۱۰۰۰۰ تن لینتر خالص‌سازی شده تولید می‌گردد که با توجه به قابلیت دسترسی مناسب، سهولت و هزینه پایین حمل‌ونقل مواد، بسیار حائز توجه و اهمیت است. به همین منظور، این تحقیق باهدف امکان استفاده از لینتر پنبه بجای خمیر الیاف بلند وارداتی در کاغذ روزنامه انجام شد.

مواد و روش‌ها: برای انجام این تحقیق، نمونه‌های آزمونی لینتر پنبه خالص‌سازی شده از کارخانه لینتر پاک بهشهر، خمیر الیاف بلند وارداتی و خمیرکاغذ CMP از کارخانه چوب و کاغذ مازندران به‌صورت تصادفی انتخاب گردید. در مرحله اول، درجه روانی، رده‌بندی الیاف و ویژگی‌های بیومتری الیاف آنها اندازه‌گیری شد. سپس با استفاده از دستگاه پالاینده آزمایشگاهی PFI mill خمیر الیاف بلند وارداتی و لینتر پنبه تا درجات روانی ۵۰۰، ۴۵۰ و ۴۰۰ میلی‌لیتر و خمیرکاغذ CMP تا درجات روانی ۴۵۰، ۴۰۰ و ۳۵۰ میلی‌لیتر پالایش گردید. در مرحله بعد، خمیر پالایش‌شده الیاف بلند وارداتی و لینتر پنبه به‌صورت مخلوط و جداگانه و با نسبت‌های ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ درصد با خمیرکاغذ CMP کارخانه چوب و کاغذ مازندران مخلوط شد. از نمونه‌های انتخابی و طبق آزمون‌های استاندارد TAPPI کاغذ دست‌ساز با وزن پایه ۶۰ g/m^2 تهیه گردید. سپس خواص نوری کاغذهای تهیه شده به‌ویژه درجه روشنی، زردی و ماتی و ویژگی‌های مقاومتی به‌ویژه مقاومت به پارگی، ترکیدن، کششی و طول پارگی کاغذهای حاصل با استفاده از آزمون‌های استاندارد TAPPI اندازه‌گیری و مقایسه گردید.

نتایج: نتایج رده‌بندی الیاف لینتر پنبه، الیاف بلند وارداتی و خمیرکاغذ CMP نشان داد که درصد وزنی الیاف بلند (مش‌های ۱۴ و ۴۸) لینتر پنبه و پراکنش آن بیشتر و ذرات ریز (نرمه‌ها) آن کمتر از الیاف بلند وارداتی است. ویژگی‌های بیومتری الیاف لینتر پنبه و الیاف بلند وارداتی نشان داد که متوسط طول الیاف، ضرایب درهم‌رفتگی، انعطاف‌پذیری الیاف لینتر پنبه بیشتر و قطر کلی، قطر حفره، ضخامت دو دیواره و ضریب رانکل آن کمتر از الیاف بلند وارداتی است. همچنین، با افزایش دورهای پالایش درجه روانی در الیاف بلند و لینتر پنبه روند کاهشی را نشان داد. با افزایش درصد اختلاط لینتر پنبه و الیاف بلند وارداتی و از ۱۰ تا ۲۵ درصد، روشنی و زردی کاغذ حاصل بهبود و ماتی آن کاهش یافت. با افزودن و اختلاط الیاف بلند، لینتر پنبه و مخلوط لینتر پنبه و الیاف بلند و از ۱۰ تا ۲۵٪ به خمیرکاغذ CMP، مقاومت کششی، مقاومت به ترکیدن، مقاومت به پارگی و طول پارگی افزایش را نشان داد. این افزایش با افزودن لینتر به خمیرکاغذ CMP، ملایم‌تر است. کاغذ حاصل از افزودن لینتر پنبه به خمیرکاغذ CMP همواره دارای کمترین ویژگی‌های مقاومتی

و کاغذ حاصل از افزودن الیاف بلند وارداتی به خمیرکاغذ CMP دارای بیشترین ویژگی‌های مقاومتی بوده است.

نتیجه‌گیری: با عنایت به اینکه لینتر پنبه به علت ساختار کریستالین به پالایش واکنش مطلوبی نشان نمی‌دهد، برای آماده‌سازی الیاف لینتر پنبه، بیتر (کوبنده) به علت پالایش طولانی‌تر و ملایم‌تر می‌تواند مناسب‌تر باشد. دراین‌ارتباط، ویژگی‌های مقاومتی کاغذ حاصل از لینتر پنبه همواره کمتر از الیاف بلند وارداتی بوده است. اما استفاده از مخلوط لینتر پنبه + الیاف بلند، به‌ویژه در درجات روانی ۴۰۰ و ۴۵۰ میلی‌لیتر به دلیل داشتن ویژگی‌های نوری و مقاومتی مناسب و قابل مقایسه با الیاف بلند وارداتی را می‌توان جایگزین بخشی از الیاف بلند وارداتی در کاغذ روزنامه کرد.

واژه‌های کلیدی: لینتر پنبه، الیاف بلند وارداتی، پالایش، بیومتری الیاف، خواص نوری و مقاومتی.

مقدمه

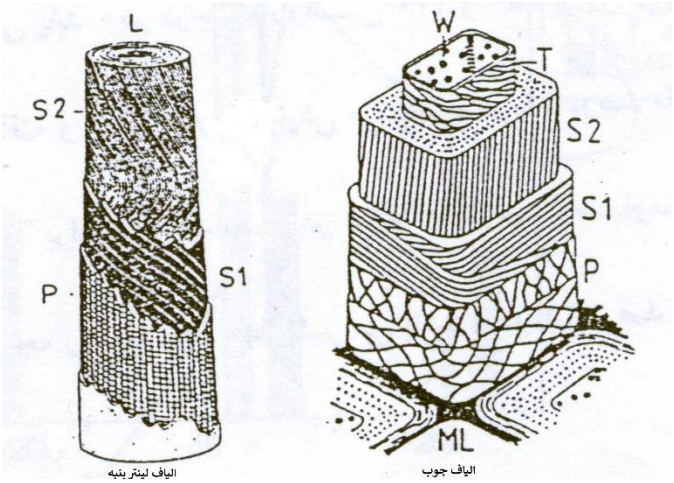
در شرایط متداول، کاغذ روزنامه عمدتاً از خمیرکاغذهای مکانیکی گراندوود و TMP و فرایندهای شیمیایی–مکانیکی CMP و CTMP تولید می‌گردد. این نوع خمیرکاغذها ارزان‌تر و دارای ویژگی‌های نوری و چاپ بهتری از خمیرکاغذهای شیمیایی هستند، ولی دوام طبیعی و نوری آنها پایین است. درنتیجه در طی ذخیره‌سازی و حتی در کوتاه‌مدت تغییر رنگ داده، زرد و شکننده می‌شوند، ازاین‌رو این نوع کاغذها برای موارد مصرف کوتاه‌مدت مورد استفاده قرار می‌گیرند. به دلیل اینکه در فرایند تولید خمیرکاغذ در این نوع کاغذها، عمدتاً و یا تماماً از انرژی مکانیکی استفاده می‌شود و الیاف صدمه و خسارت بیشتری می‌بینند، انعطاف‌پذیری آنها کم است و به دلیل حضور کل و یا عمده لیگنین چوب در الیاف خمیرکاغذ، سطح و مقاومت اتصال بین الیاف در کاغذ تولیدی بسیار ضعیف است (Vaysi, 2021; Mirshokraei, 2003). ازاین‌رو، کاغذهای مکانیکی ازجمله کاغذ روزنامه و چاپ و تحریر دارای مقاومت و استحکام خیلی پایینی هستند. در صورتی که از این نوع خمیرکاغذها به‌صورت ۱۰۰ درصد در تولید کاغذ روزنامه و چاپ و تحریر استفاده شود، پارگی کاغذ، یا به‌عبارت‌دیگر، قابلیت حرکت کاغذ (Runability) در هنگام ساخت و نیز در طی چاپ بیش از حد پایین آمده و غیرقابل‌قبول است (Rezazadeh, *et. al.*, 2022). برای بهبود استحکام و مقاومت نهایی کاغذ و نیز بهبود قابلیت حرکت این نوع کاغذها، از خمیر الیاف بلند سوزنی‌برگان نیمه رنگ‌بری شده و یا رنگ‌بری شده کرافت استفاده می‌شود. برای ساخت کاغذ روزنامه و چاپ و تحریر مکانیکی، چوب های سوزنی‌برگان مناسب‌تر از چوب‌های پهن‌برگان می‌باشد. از بین چوب‌های سوزنی‌برگان، چوب‌های با الیاف بلندتر، دانسیته پایین‌تر و رنگ روشن‌تر مانند نوئل (Spruce) ارجحیت دارند (Mirshokraei, 2002). از چوب‌های پهن‌برگان، به دلیل کوتاه‌تر بودن الیاف و نیز بالاتر بودن دانسیته و تیره‌گی بیشتر، رنگ چوب (به‌استثنای چوب صنوبر)، خمیر مکانیکی با خصوصیات مقاومتی ضعیف‌تر و با رنگ تیره‌تر و یا روشنی کمتر به دست می‌آید. با استفاده از تیمارهای شیمیایی محدود می‌توان مقاومت خمیر تولیدشده از پهن‌برگان را افزایش داد، ولی این عمل سبب کاهش ماتی کاغذ می‌گردد که برای کاغذهای روزنامه و چاپ و تحریر بسیار حائز اهمیت است (Vaysi, 2013).

از سوی دیگر، پنبه گیاهی گل‌دار از تیره پنیرکیان یا مالواسه (*Malvaceae*) است. میوه گیاه پنبه، غوزه نامیده می‌شود و در حقیقت تخمدان گیاه است که پس از تلقیح به‌سرعت رشد کرده و بزرگ می‌شود. در داخل غوزه پنبه، دانه پنبه وجود دارد که به شکل تخم‌مرغ یا گلابی است. سطح خارجی دانه اغلب واریته‌های پنبه از کرک‌های ریزی به نام لینتر (Fuzz) (طول حدود ۶–۲ میلی‌متر) و الیاف بلندتر پنبه (Staple)(طول حدود ۴۵–۱۵ میلی‌متر) که در نساجی استفاده می‌شود، پوشیده شده است. مدل‌های ساختاری الیاف لینتر و الیاف چوب کمی متفاوت است (شکل ۱) (Krassig, 1993). لینتر پنبه عموماً به رنگ سفید و گاهی به رنگ خاکستری، سبز تا قهوه‌ای است. لینتر پنبه به‌صورت درجه

یک و دو استفاده می‌شود.

لینتر پنبه به لحاظ شیمیایی متفاوت از خمیر شیمیایی سوزنی‌برگان است. لینتر پنبه خام حداقل دارای ۸۵ درصد سلولز و تنها کمتر از ۱۵ درصد مواد ناخالص و غیر سلولزی از قبیل چربی‌ها، پروتئین، موم‌ها، پکتین، مواد محلول در آب و خاکستر است و عاری از لیگنین و همی‌سلولزها است. لینتر پنبه پس از خالص‌سازی توسط تیمارهای شیمیایی که به‌مراتب کمتر و ملایم‌تر از چوب است، به سلولز تقریباً خالص (>۹۹٪) تبدیل می‌شود. در حالی که چوب سوزنی‌برگان حاوی کمتر از ۴۵ درصد سلولز و بیش از ۵۵ درصد مواد غیرسلولزی از قبیل لیگنین، همی‌سلولز، مواد استخراجی و خاکستر است. پس از تیمارهای شیمیایی و در شرایط نسبتاً شدید، چوب سوزنی‌برگان به خمیر شیمیایی الیاف بلند رنگبری شده تبدیل می‌شوند. بین لینتر پنبه و خمیر شیمیایی الیاف بلند به لحاظ سلول‌های تشکیل‌دهنده و مرفولوژی و ابعاد الیاف اختلاف کمتری وجود دارد. لینتر پنبه خالص‌سازی شده به لحاظ اینکه از سلولز خالص ساخته شده، در سطح جهانی عمدتاً برای تولید مشتقات سلولزی از قبیل ویسکوز، رایون، سلوفان، استات سلولز، نیترات سلولز و اترهای سلولز، با ارزش‌افزوده بسیار بالا مورد استفاده قرار می‌گیرد. بعلاوه، به دلیل استحکام، مرغوبیت و درجه خلوص بالا و نیز دوام طبیعی زیاد، لینتر پنبه خالص‌سازی شده برای تولید انواع کاغذهای ویژه از قبیل کاغذ اسکناس، اسناد بهادار، کاغذهای چاپ مرغوب و بادوام و کاغذ سیگار استفاده می‌شود. ولی به دلیل گران بودن قیمت لینتر پنبه، محدودیت تولید و نیز ارزش‌افزوده بیشتر تبدیل لینتر پنبه به مشتقات سلولزی و کاغذهای ویژه، استفاده از لینتر پنبه بجای الیاف بلند سوزنی‌برگان در مخلوط خمیرهای دیگر برای بهبود استحکام کاغذ تولیدی، در سطح جهانی عمل متداول و مرسوم نیست. مضافاً اینکه لینتر پنبه خالص‌سازی شده به دلیل اینکه تقریباً از سلولز خالص ساخته شده است، دارای قابلیت جذب آب کمتری است و پالایش‌پذیری آن کمتر و متفاوت از خمیر الیاف بلند است. ازاین‌رو، در سطح جهانی، هرگاه لینتر پنبه برای تبدیل به کاغذ مورد استفاده قرار می‌گیرد، به تجهیزات و تیمار ویژه‌ای نیاز است. به‌عنوان مثال، پالایش لینتر پنبه به دلایل ذکرشده در سیستم ناپیوسته(batch) و با استفاده از بیتر (beater)بجای ریفاینر (refiner) انجام می‌شود. از سویی، در کارخانه چوب و کاغذ مازندران در شمال ایران- ساری، سالیانه حدود ۵۲۰۰۰ تن کاغذ روزنامه و ۳۸۰۰۰ تن کاغذ چاپ و تحریر (سفارشی) و از خمیرکاغذ شیمیایی-مکانیکی (CMP) و از چوب‌های ممرز، راش و صنوبر تولید می‌گردید، اما با عنایت به طرح تنفس جنگل در سال‌های اخیر، در حال حاضر، خمیرکاغذ CMP در این شرکت از حدود ۵۰ درصد غان، ۲۰ درصد صنوبر و حدود ۳۰ درصد مخلوط سایر گونه-های چوبی تولید می‌شود. برای بهبود خصوصیات مقاومتی کاغذ حاصل، نیاز به به‌کارگیری حدود ۱۷ درصد الیاف بلند وارداتی است. به همین منظور، سالیانه به حدود ۱۸۰۰۰ تن خمیر الیاف بلند رنگبری شده که باید با صرف مقدار قابل‌ملاحظه‌ای ارز خارجی و از خارج خریداری و وارد گردد (Vaysi, 2023). از سوی دیگر، در کارخانه لینتر پاک بهشهر که در فاصله حدود ۵۰ کیلومتری چوب و کاغذ مازندران قرار دارد، سالیانه بیش از ۱۰۰۰۰ تن لینتر خالص‌سازی شده تولید می‌گردد که با توجه به قابلیت دسترسی مناسب، سهولت و هزینه پایین حمل‌ونقل مواد، بسیار حائز توجه و اهمیت است.

دراین‌ارتباط، ظرفیت استفاده از خمیرکاغذ ساقه گوجه‌فرنگی را به‌عنوان الیاف بلند در تقویت خمیرکاغذ تجاری سودای سرد کاه گندم بررسی کردند و گزارش دادند که شاخص‌های کشش، پارگی و ترکیدگی پس از اختلاط به ترتیب ۲۸، ۶۳ و ۳۶ درصد افزایش یافت. بارزترین اثر اختلاط ازنظر ویژگی‌های مکانیکی در افزایش شاخص پارگی مشاهده گردید. نتایج نشان داد که افزودن خمیرکاغذ رنگبری نشده سودا-آنتراکینون ساقه گوجه‌فرنگی به‌عنوان یک پسماند کشاورزی بلااستفاده به خمیرکاغذ رنگبری نشده سودای سرد کاه گندم، می‌تواند با کاهش نقاط ضعف خمیرکاغذ سودای سرد به بهبود و افزایش شاخص‌های مکانیکی و گسترش کاربرد و تقاضا برای این خمیرکاغذ منجر شود (Heidari Emamverdikhan, 2024).



شکل ۱- مدل‌های ساختاری الیاف لینتر پنبه (چپ) و الیاف چوب (راست) **(Krassig, 1993)**

Figure 1. Models of the cell wall structure of cotton linter fibers (left) and wood fibers (right) (Krassig, 1993).

تحقیقی باهدف جایگزینی خمیرکاغذ الیاف بلند وارداتی با نانو الیاف سلولزی و مواد کاتیونی در ساخت کاغذ بادوام انجام شد. به همین منظور، استفاده از نانو الیاف سلولزی و سیستم‌های دو ترکیبی نشاسته-نانو سلولز و پلی آکریل آمید-نانو سلولز برای جایگزینی با الیاف بلند شیمیایی وارداتی بررسی گردید. نتایج نشان داد که با افزایش نانو سلولز به‌صورت منفرد، در مقایسه با الیاف بلند وارداتی، صافی سطح، مقاومت به کشش، ترکیدن، پاره شدن کاغذ افزایش و نفوذپذیری در برابر هوا، مقاومت به تاه شدن و ماتی کاغذ کاهش یافت. با افزایش نانو سلولز در ترکیب با پلی آکریل آمید کاتیونی، در مقایسه با الیاف بلند وارداتی، نفوذپذیری در برابر هوا و ماتی کاغذ کاهش و صافی سطح، مقاومت به کشش، ترکیدن، پاره شدن و تاشدن کاغذ افزایش یافت. با افزایش نانو سلولز در ترکیب با نشاسته کاتیونی، در مقایسه با الیاف بلند وارداتی، صافی سطح، مقاومت به کشش، ترکیدن تاشدن افزایش ولی ماتی کاغذ کاهش یافت. نتایج FE-SEM نیز نشان داد با افزایش درصد نانوالیاف سلولزی خلل و فرج بسیار کم شد. به‌طوری‌که بر اثر افزودن ۵ درصد نانو الیاف سلولزی سطح کاغذ هموارتر شد و منافذ به‌طور نسبی پر شدند که نتایج صافی سطح و نفوذپذیری در برابر هوا این گفته را تأیید می‌کند (Ebrahimpour Kasmani, 2021).

امکان استفاده از نانو الیاف سلولزی (NFC) و پلی-آمیداپی‌کلروهیدرین (PAE) در مقایسه با خمیرکاغذ کرافت الیاف بلند وارداتی (LF) برای بهبود خواص استحکامی لایه‌تر و ورق خشک کاغذهای دست‌ساز حاصل از خمیرکاغذ شیمیایی- مکانیکی(CMP) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد افزودن NFC همراه PAE باعث بهبود در ویژگی-های استحکامی لایه‌تر و ورق خشک کاغذها می‌شود. در مورد لایه‌تر کاغذهای با ۳۵ درصد خشکی، تیمار مربوط به افزودن ۳ درصد NFC همراه ۱ درصد PAE انرژی جذب کششی (TEA) را ۸۵ درصد افزایش داد، اگرچه این مقدار در حد تأثیر استفاده از ۲۰ درصد LF نبود (۱۱۷ درصد). در مورد کاغذهای هوا خشک، تیمار مربوط به افزودن ۳ درصد NFC و ۱ درصد PAE انرژی جذب کششی و مقاومت کششی کاغذ را در مقایسه با تیمار ۲۰ درصد LF به ترتیب ۳۵ درصد و ۱۸ درصد بیشتر بهبود داد. به‌طورکلی، با توجه به افزایش عملکرد مثبت استفاده از NFC به همراه PAE با اعمال تیمارهای حرارتی، استفاده توأم از ۳ درصد NFC و ۱ درصد PAE با خمیرکاغذ CMP، قابلیت جایگزینی با ۱۵ درصد LF برای بهبود مقاومت لایه‌تر و ورق خشک کاغذ حاصل از خمیرکاغذ شیمیایی- مکانیکی را می‌تواند داشته باشد (Mousavi *et al.*, 2021).

امکان استفاده از خمیر سودای پوست کنف بجای خمیر الیاف بلند وارداتی در بهبود کیفیت کاغذ حاصل از خمیر سودای باگاس بررسی و گزارش شد که در درصدهای اختلاط یکسان، کاغذهای حاصل از اختلاط خمیر پوست کنف با خمیر باگاس ضخامت بیشتری از کاغذهای حاصل از اختلاط خمیر الیاف بلند وارداتی با خمیر باگاس داشتند. تفاوت در مقادیر شاخص مقاومت به ترکیدگی و طول پاره شدن کاغذهای حاصل از اختلاط ۳۰٪ خمیر سودای پوست کنف و خمیر سودای باگاس با کاغذهای حاصل از اختلاط ۳۰٪ خمیر کرافت الیاف بلند وارداتی و خمیر سودای باگاس معنی‌دار نبود. مقاومت به پارگی و ماتی کاغذهای حاصل از اختلاط ۳۰٪ خمیر سودای پوست کنف با ۷۰٪ خمیر سودای باگاس به‌مراتب از خمیرهای حاصل از خمیر الیاف بلند وارداتی و سودای باگاس با همان درصد اختلاط بیشتر بود (Dehghani Firouzabadi *et. al.*, 2008).

در تحقیقی امکان استفاده از خمیر کرافت بامبو بجای خمیر الیاف بلند وارداتی سفید نشده بررسی شد. نتایج نشان داد که بیشترین مقاومت به ترکیدن، طول پارگی، مقاومت کششی و شقی در کاغذ حاصل از خمیر الیاف بلند وارداتی و بیشترین مقاومت به پارگی و روشنی در کاغذ حاصل از خمیر کرافت بامبو مشاهده شد. همچنین نتایج نشان داد که در اثر اختلاط خمیرهای مذکور و پالایش، ویژگی‌های کاغذ حاصل افزایش قابل‌ملاحظه‌ای را نشان می‌دهد. به‌طوری‌که با توجه به مقاومت‌های کاغذ حاصل نتیجه گرفتند که می‌توان خمیر کرافت بامبو را جایگزین تمام یا بخشی از خمیر الیاف بلند وارداتی کرد (Vaysi, 2008).

با عنایت به موارد ذکرشده، هدف از این مطالعه، بررسی امکان استفاده از لینتر پنبه خالص‌سازی شده به‌عنوان خمیر الیاف بلند در تولید کاغذ روزنامه و چاپ و تحریر در چوب و کاغذ مازندران و در مقیاس آزمایشگاهی است. در صورت مثبت بودن نتیجه تحقیق، علاوه بر تأمین بخشی از خمیر الیاف بلند رنگ‌بری شده مورد نیاز از منابع داخلی که با قابلیت دسترسی آسان و هزینه حمل‌ونقل پایین به دست می‌آید، سالیانه از خروج مقدار قابل ملاحظه‌ای ارز خارجی نیز صرفه‌جویی به عمل خواهد آمد.

۲- مواد و روش‌ها

الف – تهیه نمونه

برای انجام این تحقیق، نمونه‌های لینتر پنبه خالص‌سازی شده از کارخانه لینتر پاک بهشهر، خمیرکاغذ CMP از خط تولید کارخانه چوب و کاغذ مازندران و خمیر الیاف بلند نیز از خمیرکاغذ وارداتی کارخانه چوب و کاغذ مازندران به‌صورت کاملاً تصادفی انتخاب شد. سپس نمونه‌های انتخابی به آزمایشگاه کارخانه چوب و کاغذ مازندران انتقال داده شد.

ب– پالایش خمیرکاغذ

ابتدا طبق آزمون‌های استاندارد TAPPI درجه روانی اولیه خمیرکاغذها اندازه‌گیری شد. سپس خمیر الیاف بلند وارداتی و لینتر پنبه توسط دستگاه پالاینده آزمایشگاهی PFI Mill تا درجات روانی ۵۰۰، ۴۵۰ و ۴۰۰ میلی‌لیتر و خمیرکاغذ CMP کارخانه چوب و کاغذ مازندران تا درجات روانی ۴۵۰، ۴۰۰ و ۳۵۰ میلی‌لیتر پالایش گردید (Barzan and Soraki, 2002).

ج – رده‌بندی الیاف و اندازه‌گیری ابعاد الیاف

بعد از پالایش و رسیدن به درجات روانی مورد نظر، خمیر الیاف بلند وارداتی، لینتر پنبه و خمیر CMP توسط دستگاه Fiber Classifier Type Mcnett رده‌بندی شد و بعد درصد وزنی الیاف و نرمه‌ها، طول الیاف، قطر کلی، قطر حفره و ضرایب بیومتری الیاف نیز اندازه‌گیری و محاسبه گردید (Barzan and Soraki, 2002). سپس با کمک میکروسکوپ نوری ابعاد الیاف هر نمونه اندازه‌گیری شد. برای تعیین ضرایب بیومتری الیاف نیز از روابط زیر استفاده شد: (L/d: ضریب درهم‌رفتگی، C/d *100: ضریب انعطاف‌پذیری، 100*2P/C: ضریب رانکل که در این روابط L: طول الیاف، d: قطر کلی الیاف، C: قطر حفره و p: ضخامت دیواره الیاف است) (Vaysi, 2017).

م – اختلاط و تهیه کاغذ دست‌ساز

بعد از پالایش و رده‌بندی الیاف، لینتر پنبه و الیاف بلند وارداتی با درجات روانی CSF ۵۰۰، ۴۵۰ و ۴۰۰ میلی‌لیتر

به‌صورت جداگانه و مخلوط و با درصدهای ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ درصد با خمیر CMP اختلاط گردید (Barzan and Soraki, 2002).

هـ - اندازه‌گیری ویژگی‌های نوری و مقاومتی کاغذهای دست‌ساز

برای اندازه‌گیری خواص نوری و مقاومتی کاغذهای حاصل از خمیرکاغذ مذکور، ابتدا طبق آزمون شماره ۸۸- T ۲۰۵ om استاندارد TAPPI، کاغذهای دست‌ساز با وزن پایه ۶۰ g/m^2 تهیه شد. برای اندازه‌گیری خواص نوری کاغذهای تهیه شده، از دستگاه طیف‌سنجی استفاده شد. این دستگاه در سیستم CIElab قادر به تشخیص رنگ فراورده‌های کاغذی است. عملکرد این سیستم براساس خاصیت انعکاس نور از سطح موردمطالعه استوار است. به‌طوری‌که بر این اساس درجه روشنی، زردی و ماتی کاغذها با استفاده از آزمون استاندارد ۰۲- T۴۵۲ om ،۹۴- T۴۲۴ om و ۰۱- T۴۲۵ om تعیین شد. سپس ویژگی‌های مقاومتی به‌ویژه مقاومت به پارگی، ترکیدن، کششی و طول پارگی کاغذهای حاصل به ترتیب با استفاده از آزمون‌های ۹۸- T ۴۱۴ om ،۰۲- T ۴۰۳ om ،۹۶- T ۴۹۴ om و ۹۱- T ۴۰۳ om استاندارد TAPPI اندازه‌گیری و مقایسه گردید (TAPPI, 2009).

ی - طرح آماری

از نرم‌افزار SPSS در محیط Windows برای تجزیه‌وتحلیل داده‌ها استفاده شد. برای بررسی اثر متقابل متغیرها و گروه‌بندی میانگین‌ها، از طرح کاملاً تصادفی و آزمون تجزیه واریانس یک‌طرفه (One -Way) و دانکن استفاده شد.

نتایج

مقایسه میانگین مشخصه‌های کمی در سطح متغیرها

آزمون تجزیه واریانس یک‌طرفه و آزمون دانکن برای مقایسه بین میانگین ویژگی‌های نوری و مقاومتی کاغذ حاصل اختلاط لینتر پنبه، الیاف بلند وارداتی و مخلوط آنها با خمیرکاغذ CMP نشان داد که به‌جز در درجه روشنی، بین میانگین سایر مشخصه‌های ماتی، زردی، مقاومت به پارگی، مقاومت کششی، مقاومت به ترکیدن و طول پارگی در سطح ۱٪ اختلاف معنی‌داری وجود دارد (جدول ۱).

جدول ۱- تجزیه واریانس یک‌طرفه بین ویژگی‌های کاغذ حاصل از اختلاط لینتر پنبه، الیاف بلند وارداتی و مخلوط آنها با خمیرکاغذ **CMP**

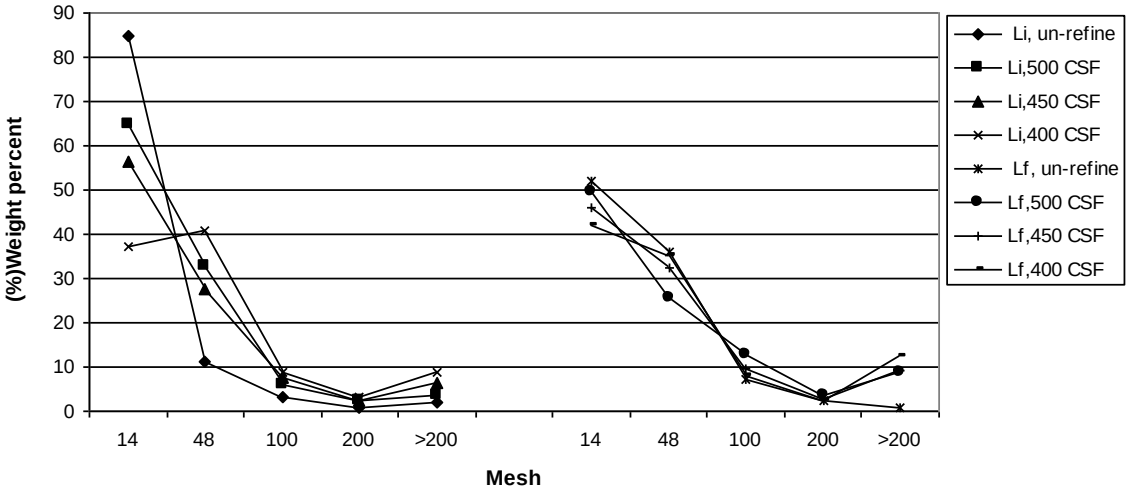
Table 1- One-way analysis of variance between paper properties from mixing cotton linter, long- fiber and their mixture with CMP pulp

Characteristic	Brigthness		breaking length		Tear strength		Tensile strength		Burst strength	
	F	Sig	F	Sig	F	Sig	F	Sig	F	Sig
Treatments	3.944	0.0223	42.9	0.0001	41.7	0.0001	19.4	0.0001	39.3	0.0001

۱- رده‌بندی الیاف

رده‌بندی الیاف لینتر پنبه، الیاف بلند وارداتی و خمیرکاغذ CMP نشان داد که درصد وزنی الیاف بلند (مش‌های ۱۴ و ۴۸) لینتر پنبه و پراکنش آن بیشتر و ذرات ریز (نرمه‌ها) آن کمتر از الیاف بلند وارداتی است. درصد وزنی الیاف بلند خمیر CMP و ذرات ریز آن نیز حدود ۴۰ درصد است. به‌عبارت‌دیگر، برای افزایش متوسط طول الیاف خمیر، ضروری است به خمیر CMP، خمیر الیاف بلند وارداتی یا لینتر پنبه افزوده شود تا متوسط طول الیاف خمیرکاغذ و مقاومت‌های کاغذ حاصل بهبود یابد. همچنین با افزایش

پالایش و کاهش درجه روانی از ۴۵۰ به ۴۰۰ میلی‌لیتر متوسط طول الیاف خمیر الیاف بلند وارداتی کاهش و ذرات ریز (نرمه‌های) آن افزایش یافته است. مقایسه تغییرات درصد وزنی الیاف نیز نشان داد که اثرهای اولیه پالایش بر لینتر پنبه و کاهش طول الیاف آن نامطلوب‌تر از الیاف بلند وارداتی بوده است، به‌عبارت‌دیگر تغییرات درصد وزنی الیاف در درجات روانی مختلف، در طی پالایش و در الیاف بلند وارداتی نسبت به لینتر پنبه همگن‌تر به نظر می‌رسد (شکل ۲).



شکل ۲- رده‌بندی الیاف لینتر پنبه و الیاف بلند وارداتی در درجات روانی ۴۰۰ و ۴۵۰ (CSF)

Fig. 2. Fiber classification of cotton linter and imported long-fiber in 400 and 450 (CSF) freeness

۲- بیومتری الیاف، ویژگی‌های بیومتری الیاف لینتر پنبه و الیاف بلند وارداتی نشان داد که متوسط طول الیاف، ضرایب درهم رفتگی، ضریب انعطاف‌پذیری الیاف لینتر پنبه بیشتر و قطر کلی، قطر حفره، ضخامت دو دیواره و ضریب رانکل آن کمتر از الیاف بلند وارداتی است (جدول ۲). در چوب سوزنی‌برگان ۸۵ تا ۹۵ درصد سلول‌های تشکیل دهنده از نوع تراکئیدها هستند که حدود ۲/۵ تا ۶ میلی‌متر طول دارند. تراکئیدها دارای قطر متوسط ۴۵ میکرون برای چوب بهاره و ۲۵ میکرون برای چوب تابستانه و نیز ضخامت دیواره سلولی حدود ۲ میکرون برای چوب بهاره و حدود ۵ میکرون برای چوب تابستانه هستند. در حالی که الیاف لینتر پنبه ضخامت یکنواخت‌تر از چوب سوزنی‌برگان بوده و دارای ۲-۶ میلی‌متر طول و ۱۴ تا ۲۰ میکرون متوسط قطر الیاف هستند.

۳- مقایسه درجات روانی لینتر پنبه و الیاف بلند وارداتی در طی پالایش

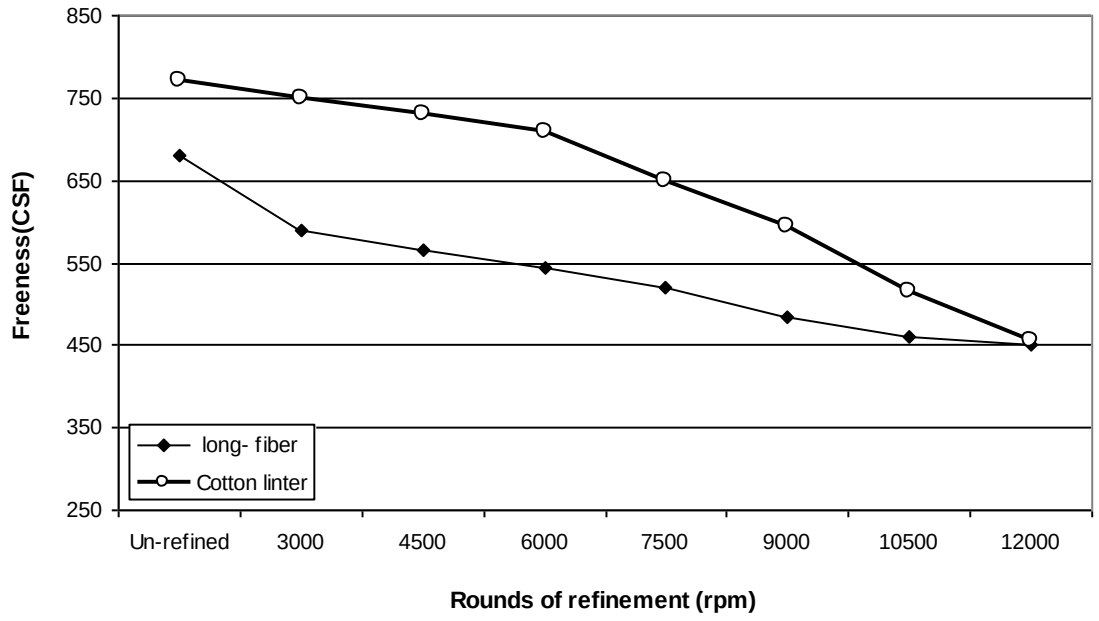
نتایج نشان داد که درجات روانی اولیه در الیاف بلند وارداتی و لینتر پنبه به ترتیب ۶۸۰ و ۷۷۰ میلی‌لیتر است. با افزایش دورهای پالایش درجه روانی در الیاف بلند و لینتر پنبه روند کاهشی را نشان می‌دهد. در الیاف لینتر پنبه، با افزایش دورهای پالایش، تغییر درجه روانی ابتدا با روند کاهشی ملایم و بعد از دور پالایش ۶۰۰۰، روند کاهشی شدید را از خود نشان داده و در دور پالایش ۱۲۰۰۰، به درجه روانی ۴۵۵ میلی‌لیتر رسیده است. در صورتی که تأثیر دورهای پالایش بر الیاف بلند وارداتی باعث کاهش درجه روانی ملایم‌تر از لینتر پنبه شده و درنهایت در دور پالایشی ۱۲۰۰۰، درجه روانی ۴۵۰ میلی‌لیتر را نشان داده است. با عنایت به اینکه لینتر پنبه به علت ساختار کریستالین به پالایش واکنش مطلوبی نشان نمی‌دهد، برای آماده‌سازی الیاف لینتر پنبه، بیتر (کوبنده) به علت پالایش طولانی‌تر و ملایم‌تر می‌تواند مناسب‌تر باشد (شکل ۳).

جدول ۲- میانگین ویژگی‌های الیاف لینتر پنبه، الیاف بلند وارداتی و برخی گونه‌های چوبی و غیرچوبی

(Vaysi, 2015, Vaysi, 2021, Vaysi *et al.*, 2016, Mehri, 2014))

Table 2- Average characteristics of cotton linter and imported long-fibers and some wood and non-wood species (Vaysi, 2015, Vaysi, 2021, Vaysi *et al.*, 2016, Mehri, 2014)

Fiber properties kind of Fiber	Fiber length (mm)	diameter (µm)	Cell-wall thickness (µm)	Felting ratio	Flexibility ratio *100	Rankel ratio*100
Cotton linter	2.87	19.7	5. 73	146.2	42	139.8 .8
Imported long-fiber	2.6	39.5	11.54	65.8	64.9	302.7
Horn beam	1.7	25.4	7. 12	66.96	28.2	107.3
Bamboo	1.08	15.4	5. 16	93.1	36.6	215.7
Reed	1.4	22.9	5. 13	60.9	27.98	257.4
Bagasse	1.6	20.98	5. 64	76.02	46.32	116



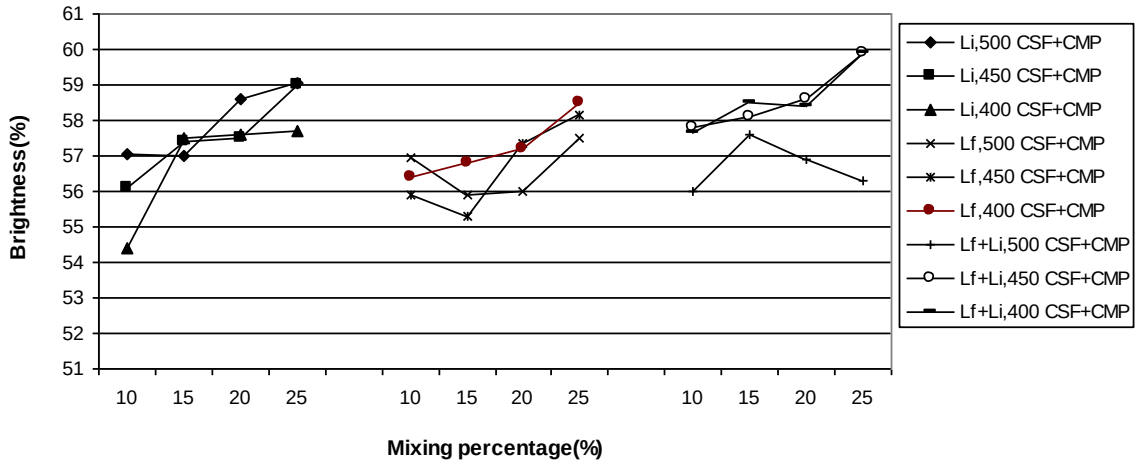
شکل ۳- تغییرات درجات روانی الیاف لینتر پنبه و الیاف بلند وارداتی طی دورهای مختلف پالایش (PFI mill)

Fig. 3. Changes in the freeness of cotton linter and imported long-fibers during different rounds of refining (PFI mill)

۴- مقایسه ویژگی‌های نوری کاغذ حاصل از لینتر پنبه و الیاف بلند وارداتی

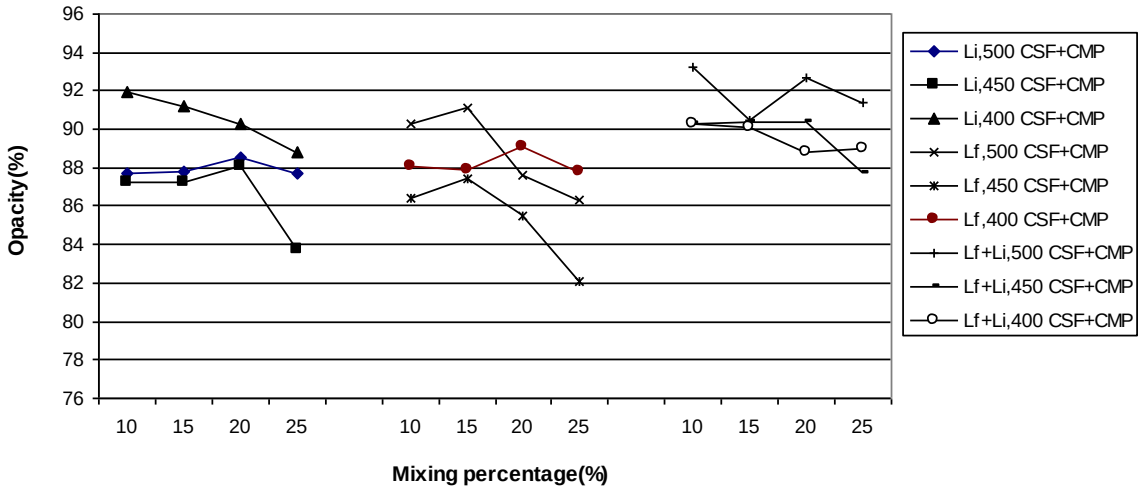
تغییرات روشنی نشان داد که با افزایش درصد اختلاط الیاف بلند وارداتی و لینتر پنبه به خمیر CMP و از ۱۰ تا ۲۵، روشنی کاغذ حاصل افزایش‌یافته است. به‌طوری‌که بیشترین روشنی در کاغذ حاصل از اختلاط لینتر پنبه + الیاف بلند + خمیر CMP، بخصوص در اختلاط ۲۵ درصد و در درجات روانی CSF ۴۰۰ و ۴۵۰ مشاهده گردید. کمترین روشنی در کاغذ حاصل از الیاف بلند + خمیر CMP، در اختلاط ۱۵ درصد و درجه روانی CSF ۴۵۰ و همچنین در کاغذ حاصل

از لینتر پنبه + خمیر CMP، در درصد اختلاط ۱۰ و درجه روانی ۴۰۰ CSF مشاهده گردید. کاغذ حاصل از افزودن لینتر پنبه به خمیر CMP، بخصوص در درصدهای اختلاط ۲۰ و ۲۵ و در درجات روانی ۴۵۰ CSF و ۵۰۰ روشنی مناسبی از خود نشان داده است. تجزیه‌وتحلیل آماری داده‌ها نیز نشان داد که بین میانگین روشنی نمونه‌های آزمونی و در سطح ۵ درصد تفاوت معنی‌داری وجود دارد (شکل ۴).



شکل ۴- روشنی کاغذ حاصل از افزودن لینتر پنبه، الیاف بلند وارداتی و مخلوط آنها به خمیرکاغذ CMP

Fig. 4. The brightness of paper from cotton linter, imported long fiber and their mixture to CMP pulp

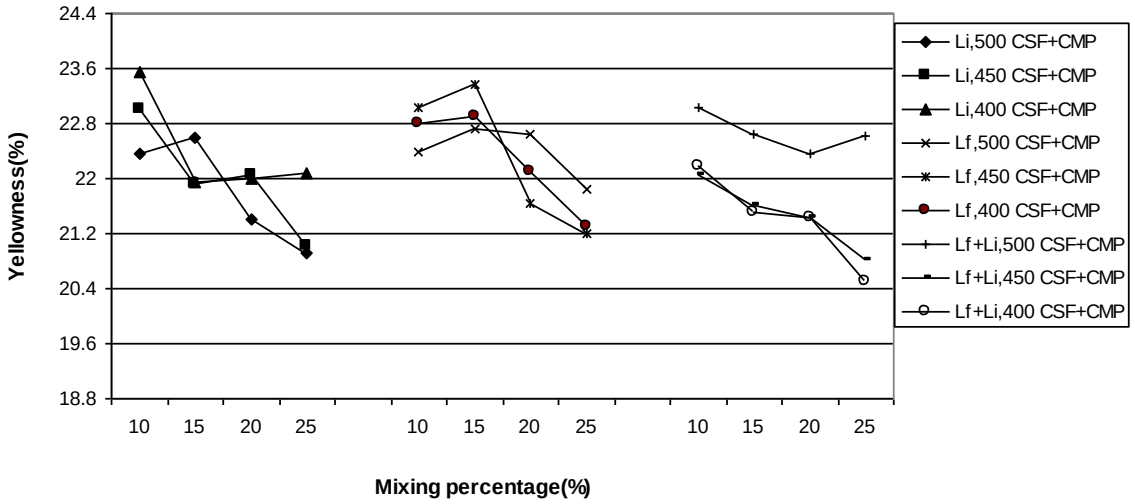


شکل ۵- ماتی کاغذ حاصل از افزودن لینتر پنبه، الیاف بلند وارداتی و مخلوط آنها به خمیرکاغذ CMP

Fig. 5. The opacity of paper from cotton linter, imported long fiber and their mixture to CMP pulp

– تغییرات ماتی نشان داد که با افزایش درصد اختلاط لینترپنبه و الیاف بلند به خمیرCMP ماتی کاغذ کاهش می‌یابد. به‌طوری‌که بیشترین ماتی در کاغذ حاصل از اختلاط لینتر پنبه + الیاف بلند + خمیر CMP، به‌ویژه در اختلاط ۱۰ درصد و درجه روانی CSF ۵۰۰ مشاهده گردید. کمترین ماتی در کاغذ حاصل از الیاف بلند + خمیر CMP، در اختلاط ۲۵ درصد و درجه روانی CSF ۴۵۰ مشاهده شد. تغییرات ماتی در کاغذ حاصل از اختلاط لینتر و الیاف بلند وارداتی به خمیر CMP تقریباً مشابه بوده، اما ماتی کاغذ حاصل از اختلاط لینتر پنبه + الیاف بلند + CMP مناسب‌تر از سایر کاغذها بوده است. تجزیه‌وتحلیل آماری داده‌ها نیز نشان داد که بین میانگین ماتی نمونه‌های آزمونی در سطح ۱ درصد تفاوت معنی‌داری وجود دارد (شکل ۵).

– تغییرات زردی نشان داد که با افزایش درصد اختلاط از ۱۰ تا ۲۵ درصد، زردی کاغذ حاصل کاهش می‌یابد. این تغییرات برای تمامی کاغذها تقریباً مشابه است. کمترین و مناسب‌ترین درصد زردی در کاغذ حاصل از اختلاط لینتر پنبه + الیاف بلند + خمیر CMP به‌ویژه در درجه روانی CSF ۴۰۰ و ۴۵۰ و در درصدهای اختلاط ۲۰ و ۲۵ درصد مشاهده گردید. تجزیه‌وتحلیل آماری داده‌ها نیز نشان داد که بین میانگین زردی نمونه‌های آزمونی در سطح ۱ درصد تفاوت معنی‌داری وجود دارد (شکل ۶).



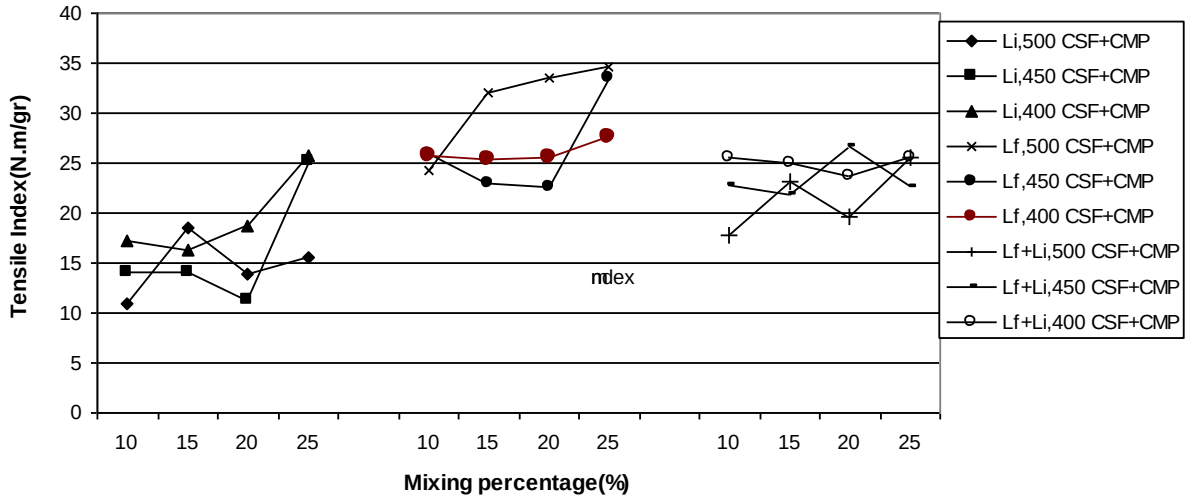
شکل ۶– زردی کاغذ حاصل از افزودن لینتر پنبه، الیاف بلند وارداتی و مخلوط آنها به خمیرکاغذ CMP

Fig. 6. The yellowness of paper from cotton linter, imported long fiber and their mixture to CMP pulp

۵– مقایسه خواص مقاومتی کاغذ حاصل از لینتر پنبه و الیاف بلند وارداتی

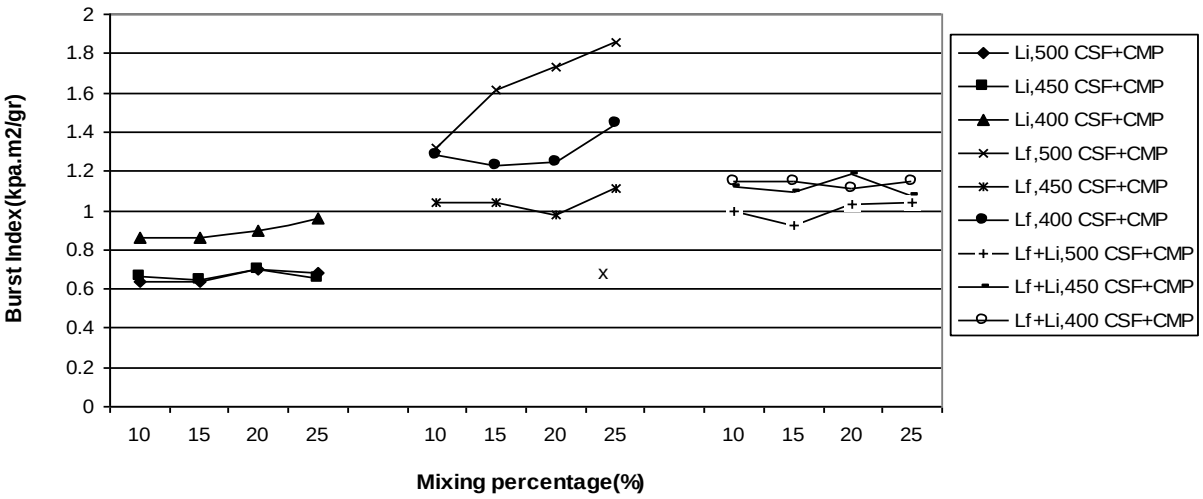
تغییرات مقاومت کششی در کاغذ حاصل از خمیر CMP، لینتر پنبه و الیاف بلند وارداتی نشان داد که با افزودن و اختلاط الیاف بلند و لینتر پنبه و لینتر پنبه + الیاف بلند و از ۱۰ تا ۲۵٪ به خمیر CMP، مقاومت کششی افزایش می‌یابد، این افزایش با افزودن لینتر و الیاف بلند به خمیر CMP، ملایم‌تر است. کاغذ حاصل از افزودن لینتر پنبه به خمیر CMP دارای کمترین مقاومت کششی و افزودن الیاف بلند وارداتی به خمیر CMP بیشترین مقاومت کششی را نشان داده است. در بین درجات روانی، کاغذ حاصل از افزودن الیاف بلند وارداتی به خمیر CMP درجات روانی CSF ۵۰۰ و ۴۵۰ و در اختلاط ۲۰ و ۲۵ درصد دارای مقاومت کششی مناسبی است. همچنین کاغذ حاصل از افزودن الیاف بلند وارداتی+ لینتر پنبه به خمیر

CMP در درجات روانی CSF ۴۰۰ و ۴۵۰ دارای مقاومت کششی خوبی است. تجزیه‌وتحلیل آماری داده‌ها نیز نشان داد که بین میانگین مقاومت کششی نمونه‌های آزمونی در سطح ۱ درصد تفاوت معنی‌داری وجود دارد (شکل ۷).



شکل ۷- شاخص مقاومت کششی کاغذ حاصل از افزودن لینتر پنبه، الیاف بلند وارداتی و مخلوط آنها به خمیرکاغذ CMP

Fig. 7. The tensile index of paper from cotton linter, imported long fiber and their mixture to CMP pulp



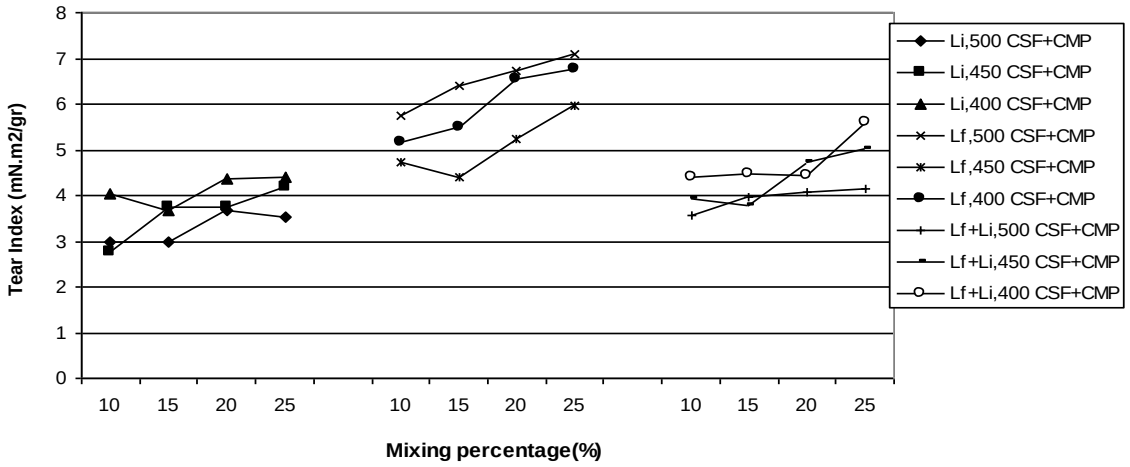
شکل ۸- شاخص مقاومت به ترکیدن کاغذ حاصل از افزودن لینتر پنبه، الیاف بلند وارداتی و مخلوط آنها به خمیرکاغذ CMP

Fig. 8. The burst index of paper from cotton linter, imported long fiber and their mixture to CMP pulp

- نتایج نشان داد که با افزایش درصد اختلاط الیاف بلند وارداتی و لینتر پنبه به خمیر CMP و از ۱۰ تا ۲۵، مقاومت به ترکیدن کاغذ حاصل افزایش جزئی و در الیاف بلند وارداتی و در درجه روانی CSF ۵۰۰ افزایش بیشتری داشته است. به‌طوری‌که بیشترین مقاومت به ترکیدن در کاغذ حاصل از اختلاط الیاف بلند + خمیر CMP، به‌ویژه در اختلاط ۲۵

درصد و در درجه روانی CSF ۵۰۰ مشاهده گردید. کمترین مقاومت به ترکیدن در کاغذ حاصل از لینترپنبه + خمیر CMP و درجات روانی CSF ۴۵۰ و ۵۰۰ مشاهده شد. همچنین کاغذ حاصل از اختلاط الیاف بلند وارداتی+ لینتر پنبه + خمیر CMP، به‌ویژه در درجات روانی CSF ۴۵۰ و ۴۰۰ مقاومت به ترکیدن مناسبی در مقایسه با الیاف بلند وارداتی از خود نشان داده است. تجزیه‌وتحلیل آماری داده‌ها نیز نشان داد که بین میانگین مقاومت به ترکیدن نمونه‌های آزمونی در سطح ۱ درصد تفاوت معنی‌داری وجود دارد (شکل ۸).

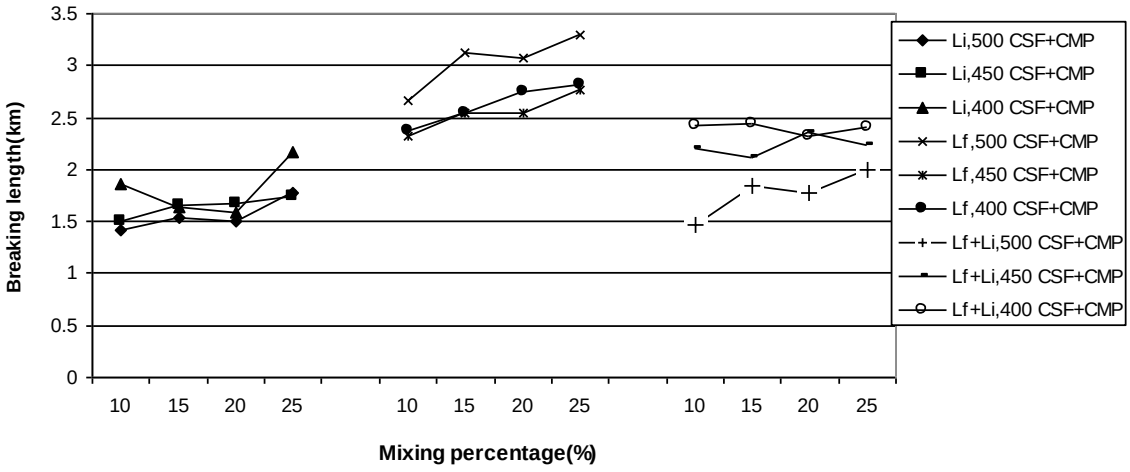
– نتایج نشان داد که با افزایش درصد اختلاط الیاف بلند وارداتی و لینتر پنبه به خمیر CMP و از ۱۰ تا ۲۵، مقاومت به پارگی کاغذ حاصل افزایش مناسبی داشته است. به‌طوری‌که بیشترین مقاومت به پارگی در کاغذ حاصل از اختلاط الیاف بلند + خمیر CMP، به‌ویژه در اختلاط ۲۵ درصد و در درجه روانی CSF ۵۰۰ مشاهده گردید. کمترین مقاومت به پارگی نیز در کاغذ حاصل از اختلاط ۱۰ درصدی لینترپنبه + خمیر CMP و درجات روانی CSF ۴۵۰ و ۵۰۰ مشاهده گردید. همچنین کاغذ حاصل از اختلاط ۲۵ درصدی الیاف بلند وارداتی+ لینتر پنبه + خمیر CMP، به‌ویژه در درجات روانی CSF ۴۵۰ و ۴۰۰ مقاومت به پارگی مناسبی در مقایسه با الیاف بلند وارداتی از خود نشان داده است. تجزیه‌وتحلیل آماری داده‌ها نیز نشان داد که بین میانگین مقاومت به پارگی نمونه‌های آزمونی در سطح ۱ درصد تفاوت معنی‌داری وجود دارد (شکل ۹).



شکل ۹– شاخص مقاومت به پارگی کاغذ حاصل از افزودن لینتر پنبه، الیاف بلند وارداتی و مخلوط آنها به خمیرکاغذ CMP

Fig. 9. The tear index of paper from cotton linter, imported long fiber and their mixture to CMP pulp

– نتایج نشان داد که با افزایش درصد اختلاط الیاف بلند وارداتی و لینتر پنبه به خمیر CMP و از ۱۰ تا ۲۵، طول پارگی کاغذ حاصل افزایش مناسبی داشته است. به‌طوری‌که بیشترین طول پارگی در کاغذ حاصل از اختلاط الیاف بلند + خمیر CMP، به‌ویژه در اختلاط ۲۵ درصد و در درجه روانی CSF ۵۰۰ مشاهده گردید. کمترین طول پارگی نیز در کاغذ حاصل از اختلاط ۱۰ درصدی لینترپنبه + خمیر CMP و درجات روانی CSF ۵۰۰ مشاهده شد. همچنین کاغذ حاصل از اختلاط الیاف بلند وارداتی+ لینتر پنبه + خمیر CMP، به‌ویژه در درجات روانی CSF ۴۵۰ و ۴۰۰ طول پارگی مناسبی در مقایسه با الیاف بلند وارداتی از خود نشان داده است. تجزیه‌وتحلیل آماری داده‌ها نیز نشان داد که بین میانگین طول پارگی نمونه‌های آزمونی در سطح ۱ درصد تفاوت معنی‌داری وجود دارد (شکل ۱۰).



شکل ۱۰- طول پارگی کاغذ حاصل از افزودن لینتر پنبه، الیاف بلند وارداتی و مخلوط آنها به خمیرکاغذ CMP

Fig. 10. The breaking length of paper from cotton linter, imported long fiber and their mixture to CMP pulp

بحث

در این تحقیق سعی شد امکان استفاده از لینتر پنبه بجای تمام یا بخشی از الیاف بلند وارداتی در کاغذ روزنامه مورد بررسی قرار گیرد. نتایج نشان داد که با توجه به رده‌بندی الیاف، لینتر پنبه دارای طول الیاف و ضرایب بیومتری مناسب است، اما ضریب رانکل آن کمتر از الیاف بلند است. ازاین‌رو، کاغذ حاصل در بعضی از ویژگی‌ها مانند مقاومت به پارگی که ارتباط نزدیکی به دانسیته خطی الیاف و ضریب رانکل دارند در لینتر پنبه به‌مراتب کمتر از الیاف بلند وارداتی بوده است (Vaysi, 2015; Seth, 1995). همچنین با افزایش درصد اختلاط لینتر پنبه به خمیر CMP و از ۱۰ تا ۲۵ درصد، روشنی، زردی و ماتی کاغذ حاصل بهبود یافته است. با افزایش درصد اختلاط از ۱۰ تا ۲۵ درصد خواص مقاومتی کاغذ افزایش را نشان می‌دهد، بیشترین مقاومت کششی، مقاومت به پارگی، مقاومت به ترکیدن و طول پارگی در کاغذ حاصل از اختلاط الیاف بلند وارداتی و خمیر CMP مشاهده گردید. به‌طورکلی، الیاف بلند وارداتی به علت طول زیاد و افزایش ضریب درهم‌رفتگی سبب افزایش پیوند بین الیاف شده و مقاومت‌ها را افزایش می‌دهد (Larsson, *et al.*, 2018). دراین‌ارتباط، افزودن خمیرکاغذ رنگبری نشده سودا- آنتراکینون ساقه گوجه‌فرنگی به‌عنوان الیاف بلند در تقویت خمیرکاغذ رنگبری نشده سودای سرد کاه گندم در تمام سطوح اختلاط منجر به بهبود و افزایش قابل‌ملاحظه مقادیر شاخص-های کشش، پارگی و ترکیدن کاغذهای حاصل شده است (Heidari Emamverdikhan, 2024). کاغذ حاصل از اختلاط لینتر پنبه و خمیر CMP دارای کمترین خواص مقاومتی بوده است، به دلیل ساختمان کریستالین در لینتر پنبه، جذب آب و واکشیدگی الیاف آن کم بوده و به پالایش واکنش مطلوبی نشان نمی‌دهد، درنتیجه ویژگی‌ها در کاغذ حاصل مانند مقاومت به ترکیدن، مقاومت کششی و طول پارگی که به سطح اتصال و مقاومت اتصال بستگی دارند، نیز در لینتر پنبه به‌مراتب کمتر از الیاف بلند بوده است. دراین‌ارتباط، برای آماده‌سازی الیاف لینتر پنبه، بیتر (کوبنده) به علت پالایش طولانی‌تر و ملایم‌تر، بهتر است مورد استفاده قرار گیرد. نتایج نشان داد که کاغذ حاصل از لینتر پنبه + الیاف بلند وارداتی به‌ویژه در درجات روانی CSF ۴۰۰ و ۴۵۰ دارای خواص نوری و مقاومتی مناسب‌تری است و امکان جایگزینی بخشی از لینتر پنبه، به‌صورت مخلوط ۵۰ درصدی لینتر پنبه + الیاف بلند بجای بخشی از الیاف بلند وارداتی در کاغذ روزنامه وجود دارد. مناسب‌ترین شرایط اختلاط برای خمیر CMP،

لینتر پنبه و الیاف بلند وارداتی به ترتیب ۸۰، ۱۰ و ۱۰ درصد پیشنهاد می‌گردد. این امکان اختلاط برای لینتر پنبه خالص به همراه خمیر CMP وجود ندارد. دراین‌ارتباط، ویژگی‌های مقاومتی خمیرکاغذ کرافت کاج الداریکا و خمیر الیاف بلند وارداتی بررسی شد و گزارش گردید که با توجه به آنالیز آماری و عدم وجود اختلاف در برخی مقاومت‌ها در اثر افزودن ۱۵ و ۲۰ درصد خمیر الیاف بلند وارداتی با خمیر کرافت کاج الداریکا، می‌توان با افزودن ۱۵ درصد خمیر کرافت کاج الداریکا، به مقاومت‌های قابل مقایسه با مخلوط کردن خمیرکاغذ وارداتی در حدود ۱۵ تا ۲۰ درصد با خمیر پهن‌برگان دست یافت (Golbabaie *et. al.*, 2006). نتایج تحقیقات قبلی نیز نشان داد که در مقیاس آزمایشگاهی، استفاده توأم از نانو الیاف سلولزی (NFC) و پلی‌آمیداپی‌کلروهیدرین (PAE) برای جایگزینی ۱۵ درصد الیاف بلند وارداتی با حفظ مقاومت تر ورق کاغذ وجود دارد و برای ویژگی‌های استحکامی خشک کاغذ، این شرایط حتی قابل‌جایگزینی به‌جای استفاده ۱۵ درصد الیاف بلند وارداتی نیز است (Mousavi *et. al.*, 2021). با عنایت به بیشتر بودن ضخامت دیواره الیاف پوست کنف و ضریب رانکل آن نسبت به الیاف بلند وارداتی و افزایش مقاومت کاغذ به پاره شدن، خمیر سودای پوست کنف می‌تواند جایگزین مناسبی برای خمیر الیاف بلند وارداتی برای بهبود ویژگی‌های فیزیکی و مقاومتی کاغذهای حاصل از خمیر سودای باگاس باشد (Dehghani Firouzabadi *et. al.*, 2008)

References

-Barzan, A. and Soraki, S., 2002. Procedure of experimental for pulp and paper, Mazandaran Wood and Paper Industries, Sari, Iran, 111-121, (in Persian).

-Dehghani Firouzabadi, M., Tvasoli, A. and Mahdavi, S., 2008. Replacing imported long fiber pulp with kenaf bast fiber soda pulp to improve quality of paper made from bagasse soda pulp, Iranian Journal of Wood, Paper Sci., and Technology 23(2), 157-168. https://doi.org/10.1007/bf02933598

-Ebrahimpour Kasmani, J., Samariha, A. and Khakifirooz, A., 2021. Investigation of replacement of imported long fiber pulp with cellulose nanofibers and cationic materials in the production of durable paper, Iranian Journal of Wood, Paper Sci., and Technology 36(2), 157-169. https://doi.org/10.22092/ijwpr.2021.342727.1608

-Heidari Emamverdikhan, H., Hedjazi, S. and Aryaie Monfared, M.H., 2024.The potential of using tomato stalk pulp as long fibers in reinforcement of wheat straw commercial cold soda pulp, Iranian Journal of Wood and Paper Industries, 14(4), 433-444. https://doi.org/10.22034/ijwp.2024.2010071.1626

-Krassig, H.A.,1993. Cellulose: structure, accessibility, and reactivity, Gordon and Breach Science, Yverdon, 14-15.

-Larsson, P.T., Lindström, T., Carlsson, L.A. and Fellers, C., 2018. Fiber length and bonding effects on tensile strength and toughness of kraft paper. Journal of Materials Science, 53(4): 3006-3015. https://doi.org/10.1007/s10853-017-1683-4

-Mehri, E. and Ghasemian, A., 2014. Fiber dimensions and chemical properties of bamboo phyllostachys pubescens, Iranian Journal of Wood and Paper Science Research, 29 (2), 335-345.

-Golbabaie, F., Jahan Latibari, A., Hossinzadeh A., Karkar-far, A. and Habibi, M.R., 2006, Study and possibility of replacing Eldar pine kraft paper pulp with imported long fiber pulp, Research and Construction Journal, No.34,6-12.

-Mirshokraei, S.A., 2003. Pulp and Paper technologists. Aieg edition.Tehran, press. 53-77. (In Persian)

-Mirshokraei, S.A., 2002. Wood chemistry. Aieg edition.Tehran, press. 88-89. (In Persian)

-Mousavi, S.F., Rezayati Charani, P., Moradian, M.H. and Asadpour. Gh., 2021. Improvement of wet and dry layer strengths of paper from chemi-mechanical pulp using polyamide epichlorohydrin and cellulose nanofibers vs imported long fiber Kraft pulp, Iranian Journal of Wood and Paper Industries, 11(4), 627-643.

-Rezazadeh, E.,Vaysi, R., Ebadi, S.E., Soltani, M. and Najafi, A., 2022. Comparison of the internal functionalization and surface modification methods of chemi-mechanical pulp handsheets using cellulose-chitosan nano-biopolymers and DTPA. BioResources, 17: 2810-2826. https://doi.org/10.15376/biores.17.2.2810-2826

-Seth, R.S., 1995. The effects of fiber length & coarseness on the tensile strength of webs, TAPPI J., N0:3, 25-28.

-Tappi, 2009. Technical association of pulp and paper

industry, 2009. Standard test methods. Tappi press, Atlanta. GA. USA.

-Vaysi, R., 2008. Investigation and comparative of the paper properties from imported long-fiber and bamboo kraft pulps, international conference, and tropical forestry change in a changing world, Bangkok, Thailand, 76-94.

-Vaysi, R. and Amani -Bishegah, N., 2023. The effect of DTPA and complementally bleaching on the optical properties of hornbeam and beech CMP pulps, Journal of Forest and Wood Products,75 (4),365-375. http//doi.org/ 10.22059/jfwp.2022.346580.1218

-Vaysi, R. and Ebadi, S.E., 2021. Thermal yellowing of hornbeam chemi-mechanical pulps bleached with hydrogen peroxide and sodium dithionite, BioResources, 16(4), 7635-7647. https://doi.org/10.15376/biores.16.4.7635-7647

-Vaysi, R. and Kord, B., 2013.The effects of H_2O_2 bleaching and DTPA spraying on the brightness stability of hornbeam CMP pulp following accelerated irradiation aging, BioResource Journal,8(2),1909-1917. https://doi.org/10.15376/biores.8.2.1909-1917

-Vaysi, R., 2015. An investigation and comparison of newsprint properties from bamboo and reed CMP pulps, Iranian Journal of Wood and Paper Science Research, 30 (2), 256-265. https://doi.org/10.22092/ijwpr.2015.10782

-Vaysi, R., Behroz, R. and Iman Khajeh Ali, I., 2016. The effect of ECF bleaching on optical and mechanical properties of bagasse soda pulp, Iranian Journal of Wood and Paper Science Research,31 (2),349-361. https://doi.org/10.22092/ijwpr.2016.105981