

(OPEN ACCESS)

Effect of binary and ternary Nano-Zeolite-based flocculation systems on the properties of OCC recycled pulp and paper

Saeide Zare Bidoki¹, Hossein Jalali Torshizi^{*2}, Hamidreza Rudi³

1. M.Sc. in Biorefinery Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. E-mail: saida_zare@yahoo.com
2. Corresponding Author, Associate Prof., Dept. of Biorefinery Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. E-mail: h_jalali@sbu.ac.ir
3. Associate Prof., Dept. of Biorefinery Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. E-mail: h_rudi@sbu.ac.ir

Article Info	ABSTRACT
<p>Article type: Full Length Research Paper</p> <p>Article history: Received: 01.05.2026 Revised: 02.05.2026 Accepted: 02.05.2026</p> <p>Keywords: Cationic starch, CPAM, Flocculation systems, Nano zeolite, Recycled pulp and paper</p>	<p>Background and Objectives: The effective use of chemical additives as retention-drainage aids in papermaking processes containing high levels of fiber fines is essential from product quality, economic, process efficiency, and environmental perspectives. Numerous complex systems have been developed for this purpose. In recent years, the application of nanoparticles at the wet end of papermaking, and their interaction with cationic polyelectrolytes in multi-component flocculation systems, has attracted significant attention due to their potential to enhance both paper quality and process performance. Among the most widely used polyelectrolytes in the paper industry are cationic starch (CS) and cationic polyacrylamide (CPAM). Zeolites, naturally occurring, abundant, low-cost, and pH-stable minerals, have seen growing use across various industrial applications. They have also demonstrated benefits as fillers in papermaking. Owing to their high specific surface area and strong anionic charge, zeolites hold promise as anionic nanoparticles in complex wet-end flocculation systems.</p> <p>Materials and Methods: Old Corrugated Container (OCC) recycled pulp (Canadian Standard Freeness \approx 315 mL) was obtained from a local mill without any additives. Nano-zeolite (NZ) with an average particle size of 38 nm (Pishgaman Mohit Zist Pak Co.), cationic starch with a degree of substitution (D.S.) of 0.03 (Boyakhsaz Co.), and cationic polyacrylamide with a viscosity of 5500 cP (from the inventory of MWPI) were used. Two addition strategies including i) a binary system: CS followed by NZ and ii) a ternary system: CS, then CPAM, followed by NZ were evaluated. Both systems were compared with each other and with an untreated control sample. The dosages applied (based on oven-dry pulp weight) were: CS at 1%, CPAM at 0.2% or 0%, and nano-zeolite at 0%, 0.1%, 0.2%, and 0.3%. Pulp properties, including total retention, drainage time during laboratory handsheet formation, and drained water volume measured using a Dynamic Drainage Jar (DDJ), were assessed. Additionally, key paper properties of the handsheets, thickness, tensile index, burst index, and tear index, were evaluated according to TAPPI standards.</p>

Results: In the ternary system, nano-zeolite significantly improved pulp performance compared to the control: drainage time decreased by up to 16%, drained water volume increased by up to 8.5%, and total retention rose by up to 15%. Similar, though less pronounced, improvements were observed in the binary system: drainage time reduced by up to 11%, drained volume increased by up to 7%, and retention improved by up to 12%. Paper properties also showed marked enhancement. In the ternary system, thickness increased by up to 18%, tensile index by 55%, burst index by 101%, and tear index by 20% relative to the control. The binary system yielded more modest gains: thickness (+8%), tensile index (+17%), burst index (+37%), and tear index (+6%). In both systems, increasing NZ dosage generally enhanced performance, with 0.2% NZ delivering the best overall results.

Conclusion: Thanks to its porosity, high anionic charge, and exceptionally large specific surface area, nano-zeolite significantly enhanced the performance of cationic starch and CPAM in OCC recycled pulp and paper. The improved micro-flocculation of pulp components led to better retention, faster drainage, and superior structural and strength properties in the final paper. The ternary system (CS + CPAM + NZ) consistently outperformed the binary system (CS + NZ), demonstrating the synergistic effect of combining two polymers with nano-zeolite. Beyond these technical benefits, the local availability, low cost, wide pH stability, and pollutant adsorption capacity of nano-zeolite further support its practical application in OCC recycling mills.

Cite this article: Zare Bidoki, Saeide, Jalali Torshizi, Hossein, Rudi, Hamidreza. 2026. Effect of binary and ternary Nano-Zeolite-based flocculation systems on the properties of OCC recycled pulp and paper. *Journal of Wood and Forest Science and Technology*, 32 (4), 67-85.



© The Author(s).

DOI: 10.22069/jwfst.2026.24473.2145

Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

تأثیر سامانه‌های دلمه‌سازی دو جزئی و سه جزئی مبتنی بر نانوذرات بر ویژگی‌های کاغذ و خمیر کاغذ بازیافتی از OCC

سعیده زارع بیدکی^۱، حسین جلالی ترشیزی^{۲*}، حمیدرضا رودی^۳

۱. کارشناسی ارشد مهندسی پالایش زیستی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران. رایانامه: saida_zare@yahoo.com

۲. نویسنده مسئول، دانشیار گروه مهندسی پالایش زیستی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران. رایانامه: h_jalali@sbu.ac.ir

۳. دانشیار گروه مهندسی پالایش زیستی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران. رایانامه: h_rudi@sbu.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله کامل علمی- پژوهشی	سابقه و هدف: به‌کارگیری مؤثر سامانه‌های شیمیایی کمکی ماندگاری-آبگیری در فرایندهای کاغذسازی حاوی نرمه فراوان؛ از جنبه‌های مختلف فرآورده‌ای، اقتصادی، فرایندی و زیست‌محیطی، اجتناب‌ناپذیر است و سامانه‌های مرکب متعددی مطرح شده‌اند. استفاده از ذرات نانو در پایانه تر کاغذسازی و برهمکنش این ذرات با پلی‌الکترولیت‌های کاتیونی در قالب سامانه‌های چندجزئی دلمه‌سازی به‌منظور بهبود کیفیت کاغذ و ویژگی‌های فرایندی تولید آن، به‌طور گسترده‌ای در سال‌های اخیر مورد توجه بوده است. نشاسته کاتیونی و پلی‌اکریلامید کاتیونی از پرکاربردترین پلی‌الکترولیت‌های مصرفی صنایع کاغذسازی است. زئولیت‌ها که مواد معدنی بومی، فراوان، ارزان و پایداری در pHهای مختلف آب هستند، کاربردهای گسترده و روزافزونی در مصارف مختلف یافته‌اند. به‌عنوان پرکننده در کاغذسازی نیز نقش‌های مفیدی برای آن گزارش شده است. این ماده به دلیل سطح ویژه و بار آنیونی زیاد از استعداد کاربرد به‌عنوان نانوذره آنیونی در سامانه‌های مرکب پایانه تر کاغذسازی نیز برخوردار است.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۰/۱۵ تاریخ ویرایش: ۱۴۰۴/۱۱/۱۶ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۱۶	مواد و روش‌ها: خمیر کاغذ بازیافتی از کارتن‌های کهنه قهوه‌ای (OCC) از کارخانه‌های داخلی و بدون هرگونه افزودنی و با درجه روانی ۳۱۵ میلی‌لیتر تهیه شد. نانوذرات با میانگین اندازه ذرات ۳۸ نانومتر از شرکت پیشگامان محیط زیست پاک، نشاسته کاتیونی با درجه استخلاف ۰/۰۳ از شرکت بوباخ‌ساز و پلی‌اکریلامید کاتیونی با گرانشی ۵۵۰۰ سانتی پوآز از انبار مصرفی شرکت چوب و کاغذ مازندران تهیه شد. سامانه‌های افزودنی دو جزئی شامل به‌ترتیب افزودن نشاسته کاتیونی/نانوذرات و سه جزئی شامل به‌ترتیب افزودن نشاسته کاتیونی/پلی‌اکریلامید کاتیونی/نانوذرات با مقادیر کاربرد نشاسته کاتیونی در سطح ۱٪، پلی‌اکریلامید کاتیونی در سطوح ۰/۲٪ و ۰/۳٪ و نیز نانوذرات زئولیت در سطوح صفر، ۰/۳،
واژه‌های کلیدی: خمیر کاغذ و کاغذ بازیافتی، سامانه‌های دلمه‌سازی، نانوذرات، نشاسته کاتیونی، CPAM	

۰/۲، ۰/۱ درصد؛ همگی بر مبنای جرم خشک خمیر کاغذ، در مقایسه با یکدیگر و تیمار شاهد بررسی شد. ویژگی‌های خمیر کاغذ شامل ماندگاری کل، زمان آبگیری حین ساخت کاغذ آزمایشگاهی، حجم آبگیری در آنالیزگر DDJ و نیز ویژگی‌های کاغذ بازیافتی دست‌ساز آزمایشگاهی مشتمل بر ضخامت و شاخص‌های مقاومت کششی، ترکیدن و پارگی برابر استانداردهای TAPPI مورد پژوهش قرار گرفت.

یافته‌ها: نانوذولیت به‌عنوان بخشی از سامانه سه جزئی منجر به تغییر معنی‌دار زمان آبگیری (تا ۱۶-٪)، حجم آبگیری (تا ۸/۵+٪) و ماندگاری کل (تا ۱۵+٪) در خمیر کاغذ بازیافتی OCC در مقایسه با تیمار شاهد گردید. در سامانه دو جزئی نیز نسبت به تیمار شاهد، تغییرات معنی‌دار زمان آبگیری (تا ۱۱-٪)، حجم آبگیری (تا ۷+٪) و ماندگاری کل (تا ۱۲+٪) مشاهده شد. همچنین ضخامت (تا ۱۸+٪)، شاخص کشش (تا ۵۵+٪)، شاخص ترکیدن (تا ۱۰۱+٪) و شاخص پارگی (تا ۲۰+٪) کاغذ تولیدشده از سامانه سه جزئی نسبت به تیمار شاهد تغییرات معنی‌داری داشت. سامانه دو جزئی نیز نسبت به تیمار شاهد واجد تغییرات معنی‌داری در ضخامت کاغذ (تا ۸+٪)، شاخص کشش (تا ۱۷+٪)، شاخص ترکیدن (تا ۳۷+٪) و شاخص پارگی (تا ۶+٪) بوده است. با افزایش سطح کاربرد نانوذولیت در هر یک از سامانه‌های دو و سه جزئی تغییرات معنی‌داری در ویژگی‌های مورد بررسی مشاهده شد. باین‌حال سطح متوسط مطالعه شده آن (۰/۲٪) در مجموع از برتری برخوردار بوده است.

نتیجه‌گیری: نانوذولیت به‌واسطه سطح ویژه بسیار زیاد، متخلخل و آنیونی، عمدتاً بهبود معنی‌داری را در عملکرد هر یک از پلیمرهای کاتیونی نشاسته و پلی‌اکریلامید در خمیر کاغذ و کاغذ تولیدی از بازیافت کارتن‌های کنگره‌ای کهنه نشان داد. بهبود دلمه‌سازی ظریف اجزای دوغاب منجر به ارتقای ماندگاری و آبگیری از خمیر کاغذ و نیز ویژگی‌های ساختاری و مقاومتی کاغذ گردید. شدت اثرگذاری نانوذولیت در حضور دو پلیمر CPAM و نشاسته کاتیونی بر ویژگی‌های مورد بررسی بیش از تأثیرات ناشی از کاربرد آن با نشاسته کاتیونی بوده است. تا جایی‌که سامانه سه جزئی در مقایسه با سامانه دو جزئی از برتری معنی‌داری در تمامی ویژگی‌های خمیر کاغذ و کاغذ برخوردار بوده است. علاوه بر نتایج مثبت مشاهده‌شده در این پژوهش، دسترسی بومی و ارزان، گستره وسیع pH عملکردی نانوذولیت و نقش آن در جذب آلاینده‌ها، کاربرد آن در واحدهای بازیافت OCC را می‌تواند پیشنهاد نماید.

استناد: زارع بیدکی، سعیده، جلالی ترشیزی، حسین، رودی، حمیدرضا (۱۴۰۴). تأثیر سامانه‌های دلمه‌سازی دو جزئی و سه جزئی مبتنی بر نانوذولیت بر ویژگی‌های کاغذ و خمیر کاغذ بازیافتی از OCC. نشریه پژوهش‌های علوم و فناوری چوب و جنگل،

۳۲ (۴)، ۸۵-۶۷

DOI: 10.22069/jwfst.2026.24473.2145



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

مقدمه

با توسعه مداوم اقتصاد جهانی، گرایش جهانی به توسعه بسته‌بندی‌های پایدار از یکسو و افزایش نگرانی‌های زیست‌محیطی و نیز الزام به کاهش مصرف منابع بکر سلولزی از سوئی دیگر، استفاده از انواع خمیرکاغذهای بازیافتی در تولید فراورده‌های مختلف را به محور اصلی صنعت کاغذسازی تبدیل کرده است (۱، ۲). خمیرکاغذ حاصل از بازیافت کارتن‌های قهوه‌ای باطله (OCC^۱) به دلایلی هم‌چون در دسترس بودن، هزینه و نیازمندی‌های پایین‌تر و نیز گسترش بازار مصرف؛ اهمیت فزاینده‌ای یافته است (۳، ۴، ۱). با این‌حال، الیاف بازیافتی OCC به‌واسطه افت مقاومت ذاتی الیاف (کاهش طول و ضخامت دیواره) و کاهش ظرفیت پیوندیابی (ناشی از استخوانی شدن) تا حد زیادی خواص فیزیکی و مکانیکی خود را از دست می‌دهند (۱، ۲، ۳، ۴، ۵، ۶، ۷). این تغییرات به کاهش استحکام کاغذ تولیدی، افزایش نایکنواختی، افزایش بار آنیونی دوغاب (ناشی از سطح ویژه زیاد نرمه‌های افزایش‌یافته)، کاهش نگهداشت بر روی توری و در پی آن مشکلات فنی و زیست‌محیطی و نیز کاهش راندمان تولید و حاشیه سود صنعت کاغذسازی منجر می‌شود (۶، ۷، ۸). از این‌رو برای کنترل محتوای بار الکترواستاتیکی دوغاب، بهبود یکنواختی و افزایش نگهداشت اجزای دوغاب خمیرکاغذ از طریق دلمه‌سازی اجزای ریز و قابل‌عبور از منافذ توری بر روی الیاف؛ طراحی سامانه‌های شیمیایی چندجزئی کارآمد در چنین سیستم‌هایی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (۲، ۵، ۹). سامانه‌های دلمه‌سازی عمدتاً متشکل از پلی‌الکترولیت‌ها (پلیمرهای کاتیونی و آنیونی) و ذرات آنیونی آلی یا معدنی است. از دیدگاه شیمی سطحی، تفاوت در نوع و توالی افزودن مواد باردار موجب تغییر در نحوه

چیدمان لایه‌های پلی‌الکترولیتی در اطراف الیاف و در نتیجه تفاوت محسوس در عملکرد دلمه‌سازی و خصوصیات کاغذ نهایی خواهد بود (۲، ۵، ۹). در سال‌های اخیر، سامانه‌های متعددی متشکل از پلیمرهای کاتیونی مانند نشاسته (۱۰، ۱۱، ۱۲)، کایتوزان (۱۳، ۴)، پلی‌اکریلامید (۳، ۴، ۱۵)، پلی‌اتیلن ایمین (۱۶، ۱۷، ۱۸) و ... و نیز نانوذرات آنیونی مانند نانوسولوز (۱، ۷، ۱۵، ۱۷)، نانوسیلیکا (۱، ۴، ۸)، نانوبنتونیت (۳، ۱۸) و ... برای بهره‌مندی از مزایای ماندگاری، آبگیری و ساختار ارتقایافته کاغذ تولیدی؛ مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. نشاسته کاتیونی (شکل ۱) به‌عنوان پلی‌الکترولیتی زیست‌پایه با بار مثبت ضعیف و طول زنجیره کوتاه، به‌واسطه شاخه‌دار بودن، آبدوستی زیاد و شباهت ساختاری با سلولز از ظرفیت بالایی در جذب و مسطح‌شدن بر سطوح الیاف سلولزی آنیونی برخوردار است (۱۹، ۲۰). نشاسته کاتیونی با تشکیل لایه‌ای نازک و چسبنده، نخستین مرحله اصلاح سطح الیاف و ایجاد بستری مناسب برای جذب افزودنی‌های بعدی، کاهش دافعه آنیونی، بهبود پیوندهای بین‌الیافی و افزایش مقاومت خشک را موجب می‌شود (۱۰، ۱۱). پلی‌اکریلامید کاتیونی^۲ (شکل ۱) پلیمری خطی با وزن مولکولی بالا و دانسیته بار سطحی زیاد، به‌واسطه سازوکار دلمه‌سازی پل‌زنی^۳ میان الیاف و ذرات ریز (نرمه‌ها، پرکننده‌ها و دیگر مواد کلونیدی) عمل می‌کند (۳، ۴، ۱۵). نشست نشاسته کاتیونی پیش از افزودن CPAM، علاوه بر این‌که مانع از جذب خوابیده (ناشی از دانسیته بالای بار مثبت آن) و کاهش توان پل‌زنی CPAM می‌شود، می‌تواند موجب کاهش نیاز کاتیون‌خواهی اجزای دوغاب و نیاز کم‌تر به پلیمر سنتزی اکریلامید گردد؛ که گران‌تر از نشاسته نیز می‌باشد. با این‌حال

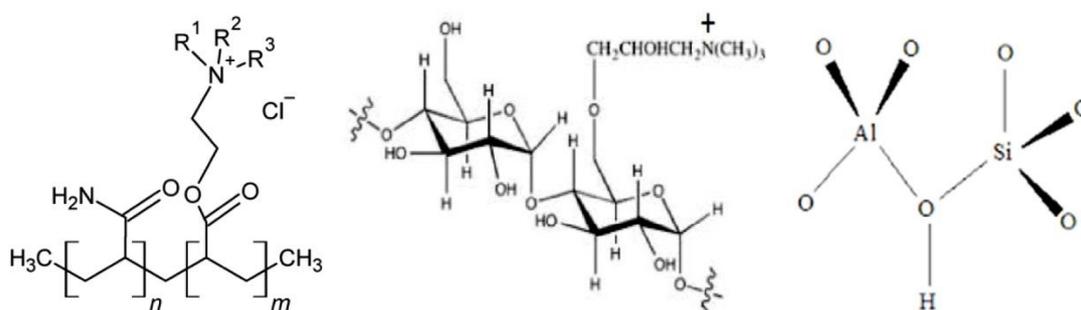
2- Cationic Polyacrylamide (CPAM)

3- Bridging Flocculation

1- Old Corrugated Container (OCC)

پساب توسعه یافته‌اند (۲۴، ۲۵). رایج‌ترین زئولیت که به مقدار زیاد یافت می‌شود، کلینوپتیلولیت است که در آب بار سطحی منفی از خود نشان می‌دهد و این ویژگی را در شرایط بسیار اسیدی تا بسیار قلیایی با pH ۲-۱۲ حفظ می‌کند، بنابراین بیش‌تر کاربردها شامل این ماده معدنی می‌شود (۲۲، ۲۳، ۲۴، ۲۵). همچنین استفاده از زئولیت‌ها به‌عنوان روشی جدید برای جلوگیری از اکسیداسیون اتوکاتالیستی اسیدهای چرب موجود در الیاف سلولزی و به‌ویژه الیاف بازیافتی از بسته‌بندی مواد غذایی، برای ممانعت از تشکیل ترکیبات فرار آلی (بوی نامطبوع) معرفی شده‌اند (۲۳، ۲۴). زئولیت به‌عنوان متعادل‌کننده pH کاغذ معرفی شده که سازگاری محیط زیستی فرآیند کاغذسازی را نیز ارتقا دهد (۲۴). حضور زئولیت به‌عنوان پرکننده به‌همراه کربنات کلسیم در غلظت‌های پایین، اثر مثبت و هم‌افزایی بر خواص مکانیکی کاغذهای دست‌ساز کهنه‌شده داشته است (۲۳).
 باین‌حال از آن‌جاکه نانوذرات زئولیت نیز همانند الیاف و نرمه‌های سلولزی سرشار از بارهای آنیونی به‌ویژه در سطح خود می‌باشند، دافعه الکترواستاتیکی مانع از نزدیکی و جذب این اجزاء در غیاب حداقل یک ماده واسط کاتیونی می‌شود؛ بنابراین برهمکنش‌های نانوزئولیت-خمیرکاغذ در عدم حضور پلیمرهای کاتیونی فاقد توجه و امکان است؛ بنابراین مطالعه‌ی حاضر با هدف بررسی و مقایسه سامانه‌های دلمه‌سازی دوجزئی نشاسته کاتیونی/نانوزئولیت و سه‌جزئی نشاسته کاتیونی/پلی‌اکریلامید کاتیونی/نانوزئولیت بر عملکرد ماندگاری، آبگیری و ویژگی‌های ساختاری و مقاومتی کاغذهای حاصل از بازیافت OCC طراحی شد تا با تحلیل این سامانه‌ها، درک دقیق‌تری از نقش هم‌افزای پلیمرهای زیست‌پایه، سنتزی و نانومواد معدنی دریافت و ارائه دهد.

ماکرومولکول‌های بلندزنجیره و واجد دانسیته زیاد بار کاتیونی مانند CPAM تشکیل‌دهنده دلمه‌هایی بزرگ خواهند بود که علاوه بر امکان تخریب شکل‌گیری، احتباس مولکول‌های آب و افت راندمان زهکشی از دوغاب خمیرکاغذ را نیز به همراه خواهد داشت (۱، ۲، ۵). بدین‌منظور پس از اعمال نیروی برشی، می‌توان از مواد آنیونی برای برقراری اتصال بین دلمه‌های شکسته‌شده واجد قطعات پلیمر کاتیونی، استفاده کرد و ایجاد دلمه‌های کوچک‌تر را سبب شد (۱، ۲، ۵). نانوذرات آنیونی هم‌چون نانوسلولز و نانوسیلیکا در مقایسه با پلیمرهای آنیونی از برتری در این مقوله برخوردار بوده‌اند، چراکه علاوه بر ارزان‌تر بودن، سطح ویژه بیشتر و دلمه‌هایی کوچک‌تری را فراهم می‌آورند (۱، ۲، ۵). نانوساختارهای معدنی آنیونی دارای توانایی بالایی در ایجاد دلمه‌های پایدار در خمیرکاغذ هستند و برخلاف نانوسلولز منجر به جذب آب اضافی و اختلال در آبگیری از سوسپانسیون خمیرکاغذ نیز نمی‌شوند (۱، ۵، ۲۱). نانوزئولیت آنیونی ماده معدنی واجد نانوکریستال‌هایی با سطح ویژه و بار سطحی منفی زیاد است که می‌تواند با پلیمرهای کاتیونی واکنش داده و پیوندهای الکترواستاتیکی و فیزیکی چندنقطه‌ای را ایجاد کند (۲۲، ۲۳). تمام زئولیت‌ها از چارچوب آلومینوسیلیکاتی تشکیل شده‌اند که شامل یک آرایش چهاروجهی از کاتیون‌های سیلیکون (Si^{4+}) و کاتیون‌های آلومینیوم (Al^{3+}) است که توسط چهار آنیون اکسیژن (O^{2-}) احاطه شده‌اند (شکل ۱). زئولیت‌ها به‌دلیل ساختارهای ریزتخلخل و فعالیت سطحی بالا، برای طیف وسیعی از کاربردها، از پرکننده در کاغذسازی برای کاغذهای حجیم و کم‌هزینه، ساختمان‌سازی، جذب‌ها، کاتالیزورهای جداسازی یا غنی‌سازی در صنایع گاز، کاتالیزور و ذخیره‌ساز انرژی در کلکتورهای خورشیدی تا کاربردهایی در کشاورزی و تصفیه



شکل ۱- فرمول‌های ساختاری زئولیت (راست)، نشاسته کاتیونی (وسط) و پلی اکریلامید کاتیونی (چپ).

Figure 1. Structural formula of Zeolite (right), Cationic Starch (middle) and Cationic Polyacrylamide (left).

الک (مش ۴۰۰)، انجام و توده سلولزی مزبور در آزمایشگاه کارخانه هواخشک گردید. پس از تعیین درصد رطوبت توده سلولزی، برای ممانعت از تأثیر رطوبت و عوامل بیولوژیک تا زمان مصرف در درون کیسه‌های زیپ‌دار و در دمای حدود 4°C نگهداری شد. نشاسته کاتیونی (منشأ گندم) از شرکت بویاخ ساز (تبریز) با مشخصات فنی جدول ۱ خریداری و پس از پخت روزانه (۱۱، ۱۲) در سطح ثابت ۱٪ استفاده گردید.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش از خمیرکاغذ حاصل از بازیافت آخال قهوه‌ای OCC، به‌عنوان منبع لیفی غالب مورد استفاده در کارخانه‌های کاغذسازی کشور استفاده شد که از کارخانه کاغذسازی مهر واقع در یزد تهیه گردید. حدود ۱۰۰ لیتر دوغاب خمیرکاغذ (درصد خشکی ۱ درصد و درجه روانی ۳۱۵ میلی‌لیتر) از نقطه قبل هدباکس و عاری از هرگونه افزودنی شیمیایی جمع‌آوری شد. به‌منظور حفظ حداکثری نرمه‌ها، آبگیری از خمیرکاغذ توسط ظرفیت‌ترین

جدول ۱- مشخصات نشاسته کاتیونی.

Table 1. Cationic Starch Specification.

درجه استخلاف (D.S) Degree of Substitution	ویسکوزیته ۶٪ Viscosity 6%	خاکستر Ash	دمای پخت Cooking Temp.	pH	رطوبت Moisture
0.03	325-500 cP	3.3%	85-90 $^{\circ}\text{C}$	6.5	7.8%

در پارک فناوری اراک تهیه گردید و در سطح ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۳ درصد مورد بررسی قرارگرفت.

نانوزئولیت نوع کلینوپتیلولیت^۱ با مشخصات فنی جدول ۲ از شرکت پیشگامان محیط زیست پاک واقع

جدول ۲- مشخصات نانوزئولیت.

Table 2. Nano Zeolite Specification.

رنگ Colour	pH	درجه سفیدی Whiteness	درصد خلوص Purity	رطوبت Moisture	اندازه ذرات Particle Size	نوع Type
سفید	8-8.5	93-99%	99%	1%	38 nm	Clinoptilolite

1- Clinoptilolite

پلی اکریل‌آمید کاتیونی مشتمل بر کوپلیمری از
 اکریل‌آمید و مشتق کاتیونی اسید اکریلیک در حالت
 محلول در آب از موجودی مصرفی شرکت چوب و
 کاغذ مازندران با مشخصات فنی جدول ۳ زیر تهیه
 گردید و در دو سطح ۰ و ۰/۲ درصد مورد بررسی
 قرار گرفت.

جدول ۳- مشخصات پلی اکریل‌آمید کاتیونی.

Table 3. Cationic Polyacrylamide Specification.

رنگ Color	ویسکوزیته در ۲۰ °C Viscosity @ 20 °C	مواد جامد Solid Content	pH (۱۰ g/l در دمای ۲۰ °C) (10g/l @ 20 °C)
Off-white shell	5500 cP	25% <	3.5

از خمیرکاغذ در دستگاه^۱ DDJ (۲۶۱ cm-۰۰) و شاخص‌های مقاومت کاغذ در برابر کشش (T۴۹۴ om-۰۱)، ترکیدن (T۴۰۳ om-۰۲) و پاره شدن (T۴۱۴ om-۰۴). درصد ماندگاری کل در ماشین کاغذساز آزمایشگاهی نیز از نسبت بین جرم خشک کاغذ تولیدی به جرم خشک کل مواد به کار رفته در تولید کاغذ (مواد لیفی و افزودنی) محاسبه گردید.

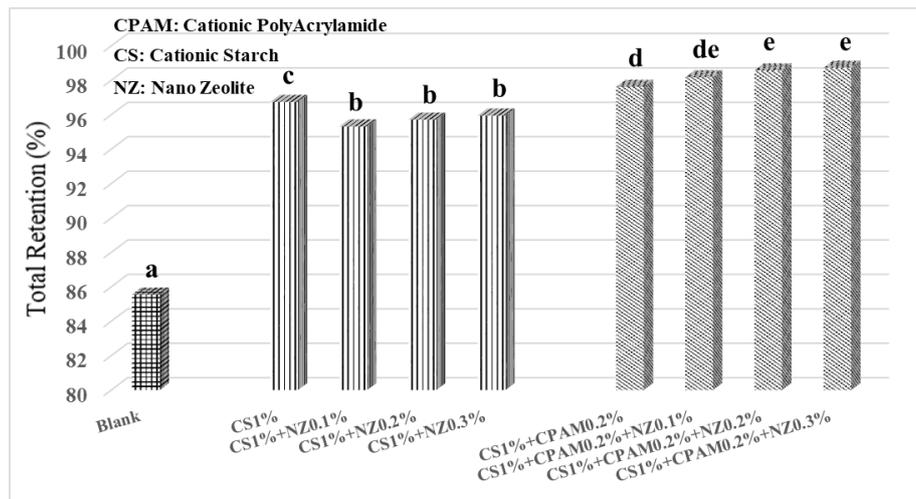
نتایج و بحث

ماندگاری کل خمیرکاغذ: پارامتر ماندگاری کل برای ارزیابی و تعیین میزان نگهداشت افزودنی‌های فیبری و غیرفیبری در ماشین کاغذسازی و به عبارتی برای نسبت تبدیل آن‌ها به کاغذ استفاده می‌شود که نشان‌دهنده راندمان تولید است. در نتیجه، ماندگاری کل، مقدار کلی مواد جامد باقی‌مانده شامل لیاف، نرمه‌ها و افزودنی‌ها در کاغذ نهایی نسبت به وزن خشک مواد اولیه مورد استفاده در کاغذسازی را بیان می‌کند (۱، ۲، ۵، ۲۷). همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده است، در مقایسه با خمیرکاغذ شاهد فاقد هرگونه افزودنی، به‌کارگیری هر یک از سطوح سامانه‌های دلمه‌سازی دو جزئی و سه جزئی مبتنی بر

برای ساخت کاغذ آزمایشگاهی (حداقل ده نمونه سالم)، میزان مورد نیاز خمیرکاغذ با احتساب رطوبت آن را در آب شهری به مدت ۷۲ ساعت خیسانده و پس از آن لیاف به آرامی به مدت ۱ دقیقه توسط همزنی با تیغه‌های کند شده جداسازی شدند. نشاسته کاتیونی آماده‌شده به دوغاب در حال تلاطم اضافه‌شده و سپس با کاهش سرعت همزن، سوسپانسیون حاوی ذرات نانوزئولیت تزریق شد و پس از توقف همزن و گذشت ۳۰ ثانیه، کاغذهای دست‌ساز مطابق با استاندارد TAPPI به شماره ۰۲- T۲۰۵ sp ساخته شد. در تیمارهای حاوی پلی اکریل‌آمید کاتیونی، پلی الکترولیت مزبور پس از گذشت حدود یک دقیقه از اعمال نشاسته و در همان شدت تلاطم، افزوده شد. تمامی مواد شیمیایی افزودنی به دوغاب خمیرکاغذ برحسب جرم خشک خمیرکاغذ مصرف گردید. همچنین در این پژوهش اندازه‌گیری تمامی ویژگی‌ها براساس استانداردهای آئین‌نامه TAPPI انجام گرفت که عبارتند از: رطوبت کاغذ و خمیرکاغذ (T۴۱۰ om-۰۲)، درجه روانی CSF خمیرکاغذ (T۲۲۷ om-۰۴)، زمان آبگیری از خمیرکاغذ (T۲۲۱ cm-۹۹)، گراماژ کاغذ (T۴۱۰ om-۰۲)، ضخامت کاغذ (T۴۱۱ om-۰۵)، کیفیت آبگیری

دلیل این امر احتمالاً به تفوق بار آنیونی مجموعه دوغاب خمیرکاغذ از محدوده نقطه خشی ایزوالکتریک و غلبه نیروهای دافعه الکترواستاتیکی بر جاذبه مربوط می‌گردد. به عبارتی دیگر، ماهیت آنیونی ذرات نانوزئولیت و در نتیجه سطح ویژه زیاد آن‌ها منجر به انسداد و مصرف جایگاه‌های کاتیونیک نشاسته اضافه‌شده به خمیرکاغذ و در نتیجه اختلال در نقش دلمه‌سازی اجزای دوغاب توسط نشاسته کاتیونی می‌شود. تفسیری که با حضور CPAM و افزایش معنی‌دار ماندگاری کل اجزای دوغاب خمیرکاغذ به مقادیری حتی فراتر از عدم حضور نانوذرات آنیونی زئولیت، تحکیم و تقویت می‌شود. چراکه افزایش محتوای بار کاتیونی دوغاب توسط CPAM منجر به بهبود ماندگاری اجزا و ارتقای معنی‌دار آن (بیش از ۱۵٪ نسبت به نمونه شاهد) به بالاترین سطوح مشاهده‌شده در این پژوهش شده است. برخلاف سامانه دو جزئی نشاسته/زئولیت، کاربرد نانوزئولیت پس از دو پلیمر کاتیونی (سامانه سه جزئی) به افزایش معنی‌دار میزان ماندگاری اجزای دوغاب خمیرکاغذ بازیافتی منجر شده است. هم‌چنین حضور نانوزئولیت پس از دو پلی‌الکتروولیت کاتیونی منجر به افزایش معنی‌دار ماندگاری کل گردید؛ درعین‌حالی‌که علی‌رغم روند پیوسته افزایش ماندگاری متناسب با افزایش کاربرد نانوزئولیت، تفاوت معنی‌داری بین سطوح مطالعه شده نانوذرات مشاهده نگردید (شکل ۲).

نانوزئولیت، ماندگاری کل خمیرکاغذ بازیافتی و به‌عبارتی راندمان تولید را به‌طور معنی‌داری افزایش داده است. نانوذرات زئولیت با قرارگیری در فضای بین شبکه الیاف دلمه‌شده توسط پلیمرهای کاتیونی، افزایش اتصال و پیوندپذیری الکترواستاتیک/یونی و نیز تراکم و ماندگاری الیاف و نرمه‌ها را به وجود می‌آورند. باین‌حال، استفاده از زئولیت پس از نشاسته کاتیونی باعث کاهش ماندگاری کل در مقایسه با عامل تک‌جزئی نشاسته شده است که دلیل آن را می‌توان به افزایش بار آنیونی دوغاب ناشی از نانوزئولیت و سطح ویژه زیاد آن منتسب دانست. چراکه فراتر از نیاز و ظرفیت دلمه‌سازی نشاسته به‌عنوان پلیمری با دانسیته بار پائین بوده و منجر به کاهش عملکرد بار کاتیونی نشاسته در دلمه‌سازی و اشتغال و غیرفعال شدن ظرفیت‌های کاتیونی نشاسته می‌شود. سامانه دلمه‌سازی سه جزئی نشاسته کاتیونی/پلی‌اکریلامید کاتیونی/نانوزئولیت از برتری معنی‌داری (۳٪ ماندگاری بیش‌تر) در نگهداشت خمیرکاغذ بر روی توری دستگاه کاغذساز آزمایشگاهی در مقایسه با سامانه دلمه‌سازی دو جزئی نشاسته کاتیونی/نانوزئولیت برخوردار بوده است. به‌نحوی‌که در سامانه سه جزئی حداکثر ۱۵٪ ولی در سامانه دو جزئی حداکثر ۱۲٪ نسبت به تیمار شاهد افزایش ماندگاری ایجاد گردید. نکته جالب‌توجه، برتری معنی‌دار ماندگاری در کاربرد منفرد نشاسته کاتیونی نسبت به تلفیق آن با نانوزئولیت است که البته تفاوت معنی‌داری بین سطوح مختلف استفاده از نانوزئولیت با یکدیگر مشاهده نگردید.

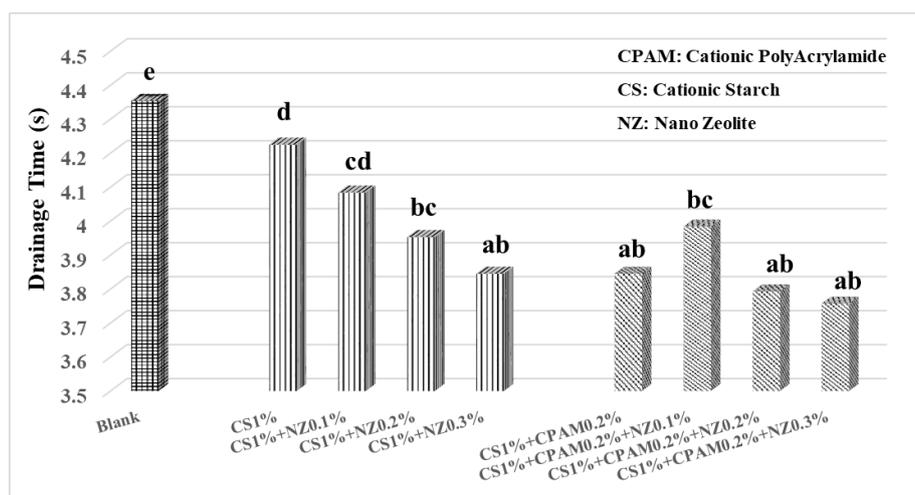


شکل ۲- تأثیر کمپلکس‌های دو جزئی و سه جزئی مواد افزودنی نانو زئولیت- پایه بر ماندگاری کل خمیر کاغذ بازیافتی از آخال OCC.

Figure 2. Effect of binary and ternary Nano-Zeolite-based additive complexes on total retention of OCC recycled pulp.

ماندگاری و چگونگی دلمه‌سازی اجزای دوغاب خمیر کاغذ با یکدیگر (دلمه‌های الیاف با الیاف، دلمه‌های الیاف با نرمه‌ها، دلمه‌های نرمه‌ها با نرمه‌ها و ...) می‌باشد که منجر به کاهش سطح تماس اجزای آبدوست دوغاب خمیر کاغذ با محیط آب و نیز رهایش آسان‌تر آب می‌گردد (۱۲، ۱۴). همان‌گونه که در شکل ۳ آمده است، کاربرد هر یک از افزودنی‌های مورد مطالعه به‌طور معنی‌داری منجر به کاهش مدت‌زمان آبیگری از حجم ثابت (۷ لیتر) دوغاب خمیر کاغذ بازیافتی از کارتن‌های کنگره‌ای کهنه در مقایسه با تیمار شاهد شده است. همانند ویژگی ماندگاری کل، افزایش کاربرد نانوزئولیت غالباً منجر به بهبود پیوسته دلمه‌سازی اجزای دوغاب و نیز تسریع و تسهیل خروج آب شده است. هم‌چنین سامانه سه جزئی از مزیت کارایی در کاهش زمان آبیگری از دوغاب خمیر کاغذ برخوردار بوده است، در عین حالی که از منظر آماری تفاوت‌های اندازه‌گیری شده معنی‌دار نبوده است (شکل ۳).

زمان آبیگری در کاغذساز آزمایشگاهی: همانند ماندگاری، چگونگی آبیگری در ماشین کاغذسازی از اهمیت بسیاری بر راندمان تولید و بهره‌وری کارخانه کاغذسازی برخوردار است (۱، ۲). بخش عمده خروج آب از دوغاب خمیر کاغذ در حال تبدیل به شبکه نهایی کاغذ، در بخش توری ماشین صورت می‌گیرد که در مقایسه با دیگر بخش‌های زهکشی آب مشتمل بر جعبه‌های مکشی، پرس‌ها و خشک‌کن‌ها، ارزان‌ترین بخش از لحاظ اقتصادی و راحت‌ترین بخش از جنبه فنی و تکنولوژیک محسوب می‌گردد (۵، ۱۰)؛ بنابراین کاغذسازان همیشه در تلاش برای تخلیه بیشینه حجم آب در بخش توری ماشین کاغذسازی می‌باشند. به عبارتی آبیگری حداکثری، (خروج حجم مشخصی آب در زمان کم‌تر/مساحت کم‌تر توری و یا بیش‌ترین حجم ممکن آب در بخش توری) علاوه بر مزیت چشمگیر اقتصادی، از برتری‌های فنی و زیست‌محیطی نیز برخوردار است. آبیگری بیش‌تر در پایانه تر ماشین کاغذ از منظر تأثیرات دوغاب، به میزان زیادی ناشی از سیستم

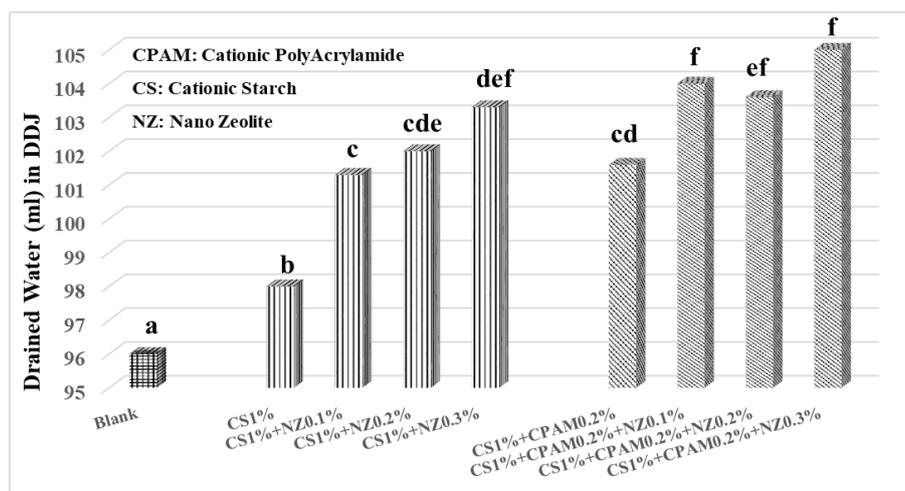


شکل ۳- تأثیر کمپلکس‌های دو جزئی و سه جزئی مواد افزودنی نانو زئولیت پایه بر زمان آگیری از خمیر کاغذ بازیافتی از آخال OCC.

Figure 3. Effect of binary and ternary Nano-Zeolite-based additive complexes on drainage time of OCC recycled pulp.

دلمه‌سازی و شمول نرمه‌ها و ذرات ریز قابل‌عبور از منافذ توری به‌صورت توده‌های بزرگ‌تر و متراکم‌تر نگهداشته شده بر توری و نهایتاً تبدیل آن‌ها به کاغذ، تأثیر سامانه‌های مواد شیمیایی مورد پژوهش نمایان شده است؛ بنابراین علاوه بر افزایش ماندگاری کل و ممانعت از فرار مواد اولیه به جریان آب خروجی از توری که آلودگی کم‌تر آب‌های فرایندی و نیاز کم‌تر به تصفیه و پاک‌سازی را به همراه دارد، مصرف آب تازه (که چالش روزافزون صنعت بومی کاغذسازی است) نیز کاهش می‌یابد. عدم/کاهش انسداد منافذ توری ناشی از ذرات ریز به همراه کاهش سطح تماس اجزای دوغاب از طریق دلمه‌شدن؛ در مجموع منجر به افزایش سرعت خروج آب می‌شود. این امر امکان افزایش سرعت ماشین کاغذ و نیز صرفه‌جویی و سهولت در بخش‌های بعدی خروج رطوبت (مکش، پرس و خشک‌کن) را فراهم می‌سازد.

حجم آگیری در آنالیزگر DDJ با توجه به عدم امکان ارزیابی تأثیر متغیرهای شیمیایی بر حجم آگیری از دوغاب خمیرکاغذ در زمان مشخص به‌هنگام ساخت کاغذ دست‌ساز، از آنالیزگر ظرف آگیری دینامیکی که به‌طور ویژه‌ای برای بررسی کیفیت ماندگاری و آگیری طراحی شده است، استفاده گردید (۲، ۱۵، ۲۰). کاربرد نانوزئولیت در هر یک از سامانه‌های دو جزئی و سه جزئی مورد پژوهش، افزایش معنی‌دار حجم آب خروجی را در مقایسه با تیمار شاهد و نیز فقدان کاربرد نانوزئولیت سبب گردید (شکل ۴). ولی علی‌رغم غالباً افزایشی بودن حجم خروج آب متناسب با افزایش مصرف نانوزئولیت؛ غالباً تفاوت معنی‌داری بین سطوح مختلف مصرف نانوذرات مشاهده نگردید؛ بنابراین همان‌گونه که در ویژگی‌های زمان آگیری (شکل ۳) و نیز ماندگاری کل (شکل ۲) مشاهده گردید، بهبود



شکل ۴- تأثیر کمپلکس‌های دو جزئی و سه جزئی مواد افزودنی نانو زئولیت پایه بر کیفیت آگیری از خمیر کاغذ بازیافتی از آخال OCC در آنالیزگر DDJ

Figure 4. Effect of binary and ternary Nano-Zeolite-based additive complexes on drained water from OCC recycled pulp in DDJ analyzer.

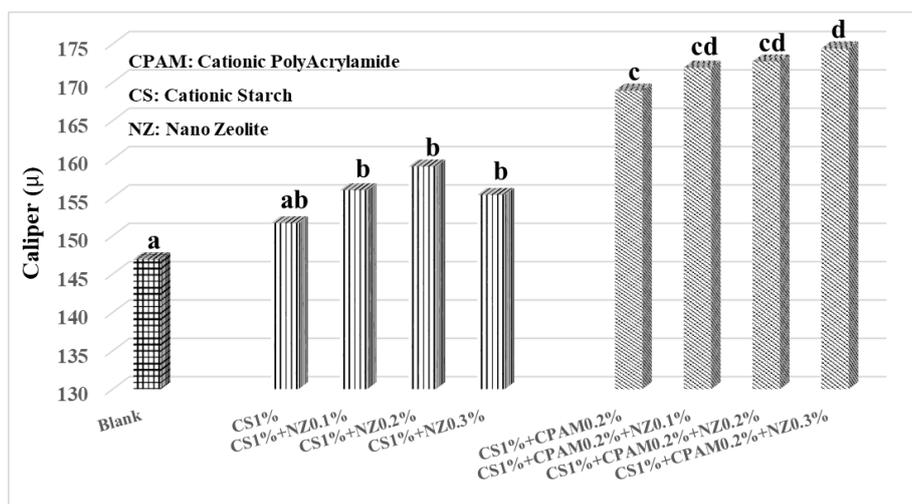
(شکل ۵). ماندگاری و به عبارتی گرماژ بالاتر (تا ۱۵٪ درصدی) کاغذ حاصل از سیستم سه جزئی (شکل ۲) طبیعتاً منجر به افزایش ضخامت واحد سطح کاغذ می‌شود که برتری ضخامت در سامانه سه جزئی (تا ۱۹٪) بر دو جزئی (تا ۱۲٪) نیز در سازگاری و انطباق کامل با نتایج ماندگاری (شکل ۲) است. روند افزایشی ضخامت کاغذ متناسب با افزایش سطح مصرف نانوزئولیت در هر یک از سامانه‌های دو جزئی و سه جزئی، ایجاد گردید؛ در عین‌حالی که همانند ویژگی ماندگاری کل، عمدتاً تفاوت آماری معنی‌داری بین سطوح مختلف مصرف نانوزئولیت مشاهده نشد. هم‌چنین کاربرد نانوزئولیت در مقایسه با عدم کاربرد آن منجر به بالک‌تر شدن کاغذ گردید که علاوه بر دربرداشتن جرم بیشتری از مواد در سطح ثابت که منجر به افزایش ضخامت گردیده است، نقش کیفیت شکل‌گیری و دلمه‌سازی که در پارامترهای پیشین تثبیت گردید نیز محتمل است. نانوساختارهای زئولیتی با گروه‌های کاتیونی سطح پلیمرها واکنش داده، موجب ایجاد پل‌های معدنی- پلیمری چندنقطه‌ای^۱ و فلاک‌های

ضخامت (کالیپر) کاغذ: ضخامت (کالیپر) از مهم‌ترین ویژگی‌های کاغذ بسته‌بندی، به‌عنوان ماده‌ای مهندسی است که تابع گرماژ و کیفیت فرایند تولید بوده و بر استحکام و نیز انعطاف‌پذیری کاغذ تأثیر می‌گذارد (۲۷، ۲). کاغذ ضخیم‌تر عموماً محافظت و استحکام بیشتری را فراهم می‌کند، درحالی‌که کاغذ نازک‌تر در عین انعطاف‌پذیری بیشتر، ممکن است استحکام کم‌تری داشته باشد؛ بنابراین کاغذ ضخیم‌تر به دلیل سفتی خمشی بیشتر، صلبیت و تحمل بار بیشتری را به همراه داشته و برای کاربردهای قفسه‌ای، انبارش کارتن‌ها، بسته‌بندی کالاهای ظریف و حساس که در آن‌ها محافظت از کالاهای شکننده بسیار مهم است، ارجح است (۵، ۲۶، ۲۷، ۲۸). هم‌چنین کاغذ ضخیم‌تر در فرایندهای تبدیلی و کارتن‌سازی (تاخوری، برجسته‌سازی، دایکات) عملکرد بهتری داشته و از جلوه زیبایی‌شناختی؛ حس لوکس بودن و کیفیت برتری را منتقل می‌کند. به‌کارگیری سامانه‌های دو جزئی و سه جزئی به‌طور معنی‌داری افزایش ضخامت کاغذ دست‌ساز آزمایشگاهی را نسبت به نمونه شاهد، با برتری سامانه سه‌رقمی سبب شده است

1- Hybrid bridging

نسبت به سامانه دوجزئی و نیز تیمار شاهد می‌شود (شکل ۵).

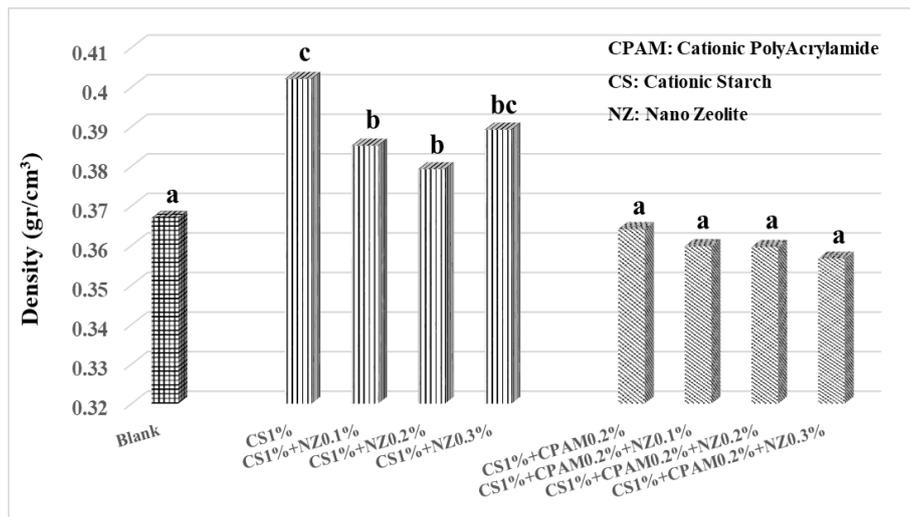
کنترل‌شده با تخلخل مناسب می‌گردد. چنین آرایشی موجب تشکیل ساختارهای سه‌بعدی پایدارتر، افزایش تخلخل مؤثر، افزایش ضخامت و حجیمی کاغذ



شکل ۵- تأثیر کمپلکس‌های دو جزئی و سه جزئی مواد افزودنی نانو زئولیت پایه بر ضخامت کاغذ بازیافتی از آخال OCC. Figure 5. Effect of binary and ternary Nano-Zeolite-based additive complexes on caliper of OCC recycled paper.

بروز تفاوت معنی‌دار در ضخامت (شکل ۵) و ماندگاری (شکل ۲) تیمارهای مربوطه (مقایسه سطوح مختلف کاربرد نانوزئولیت در سامانه‌های دو جزئی و سه جزئی) نشأت می‌گیرد. نکته جالب توجه برتری معنی‌دار دانسیته کاغذهای دست‌ساز آزمایشگاهی در تیمارهای دو جزئی نسبت به سه جزئی است. با توجه به رابطه عکس دانسیته با بالک کاغذ، این امر نشان‌دهنده آن است که در سامانه‌های سه جزئی میزان بالکی بودن کاغذ تولیدی بیش‌تر از کاغذهای تولیدشده با سامانه‌های دو جزئی است. به عبارتی دیگر افزایش ضخامت کاغذ در سامانه‌های سه جزئی از افزایش گرماژ (ماندگاری) پیشی گرفته و کسر تناسی گرماژ تقسیم بر ضخامت را در مقایسه با تیمارهای دو جزئی دچار کاهش می‌کند. در عین‌حالی که اختلاف معنی‌داری در دانسیته کاغذهای سامانه سه جزئی در مقایسه با تیمار شاهد مشاهده نگردید.

دانسیته کاغذ: دانسیته کاغذ به شدت بر ویژگی‌های مقاومتی نظیر کشش، سفتی خمشی و مقاومت فشاری و هم‌چنین ویژگی‌های ساختاری هم‌چون نفوذپذیری هوا، رفتار ممانعتی و قابلیت چاپ‌پذیری تأثیر می‌گذارد (۵، ۲۶، ۲۷، ۲۸). دانسیته که به‌عنوان جرم در واحد حجم ورق کاغذ تعریف می‌شود در کاغذهای بازیافتی از ویژگی‌های بنیادی محسوب شده و ارتباط نزدیکی با ساختار تخلخلی، کیفیت شکل‌گیری و چگونگی درهم‌رفتگی اجزای کاغذ و نیز عملکرد نهایی کاغذ دارد (۲، ۲۷). از آن‌جایی که پارامتر دانسیته از تقسیم گرماژ کاغذ بر ضخامت آن به دست می‌آید، نوسانات ماندگاری (که در ویژگی گرماژ کاغذ تولیدی نمود پیدا می‌کند) و کالیبر کاغذ مستقیماً منجر به تغییر در دانسیته کاغذ (و برعکس آن؛ بالک کاغذ) می‌گردد؛ بنابراین عدم بروز تغییر معنی‌دار در دانسیته کاغذها بین اغلب سطوح مختلف کاربرد نانوزئولیت در سامانه‌های دو جزئی و سه جزئی (شکل ۶) از عدم

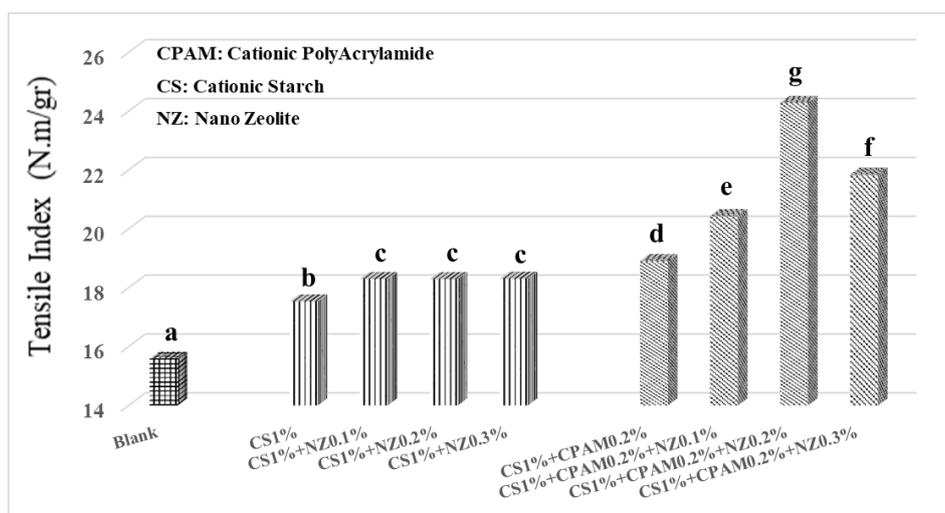


شکل ۶- تأثیر کمپلکس‌های دو جزئی و سه جزئی مواد افزودنی نانو زئولیت پایه بر دانسیته کاغذ بازیافتی از آخال OCC.

Figure 6. Effect of binary and ternary Nano-Zeolite-based additive complexes on density of OCC recycled paper.

شاخص کشش کاغذ: مقاومت کششی که حداکثر میزان تنش قابل تحمل قبل از پاره شدن نوار کاغذ در معرض کشش تعریف می‌شود، نقش بسیار مهمی در عملکرد کاغذ و مقوا و مناسب بودن آن برای کاربردهای متنوع صنعتی کاغذ از چاپ تا بسته‌بندی ایفا می‌کند (۱۱، ۲۰). استحکام کششی کاغذ تحت تأثیر عوامل مختلفی از جمله نوع الیاف، کیفیت شکل‌گیری، فرآیند کاغذسازی و گرماژ کاغذ قرار می‌گیرد (۲، ۵). نوع الیاف و فرآیند تهیه کاغذ دست‌ساز در این پژوهش یکسان بوده است، ولی گرماژ و کیفیت شکل‌گیری کاغذ از پارامترهای متغیر پژوهش متأثر شده‌اند. افزایش گرماژ (ماندگاری) مشاهده شده (شکل ۲) منجر به ارتقای معنی‌دار شاخص کششی کاغذ بازیافتی در هر دو سامانه دو جزئی (حداکثر ۱۷٪) و سه جزئی (حداکثر ۵۵٪) نسبت به نمونه شاهد گردید (شکل ۷). رصد معنی‌داری روند تغییرات در دو ویژگی ماندگاری و کشش مشخص می‌سازد که تأثیر پارامترهای متغیر پژوهش بر شاخص کشش از تفاوت‌های ایجاد شده بیش‌تری در مقایسه با ماندگاری برخوردار است. تا جایی‌که گروه‌بندی‌های آماری متنوع‌تری در شاخص کشش بروز نموده و تفاوت بین شرایط پژوهش (مثلاً کل (شکل ۲) منجر به کاهش معنی‌داری گردید.

سطوح مختلف کاربرد نانوزئولیت) چشمگیرتر بوده است. با اذعان به این‌که روند تغییرات پارامترهای فنی مرتبط با یکدیگر، یکسان و مساوی نمی‌باشند؛ به نظر می‌رسد که علاوه بر گرماژ و نوسانات آن، شاخص کشش کاغذ از کیفیت شکل‌گیری و بهبود آن تأثیرات بیش‌تری را پذیرفته است. قوام این استدلال در سامانه سه جزئی کاملاً مصداق دارد و سه تیمار سامانه مذکور، سه گروه آماری متفاوتی را رقم زده است. چراکه افزایش گرماژ ناشی از کاربرد بیش‌تر نانوزئولیت در هیچ‌یک از سامانه‌های دو جزئی و سه جزئی معنی‌دار نبوده است (شکل ۲)، ولی با افزایش کاربرد نانوزئولیت در تیمارهای سامانه سه جزئی؛ افزایش معنی‌دار شاخص کشش با کسب گروه‌بندی‌های آماری متفاوتی بروز یافته است (شکل ۷). در نتیجه تأثیر بهبود دلمه‌سازی اجزای دوغاب خمیرکاغذ بهتر و مؤثرتر از افزایش گرماژ بوده که کیفیت آگیری از دوغاب خمیرکاغذ نیز آن را تأیید می‌نماید (شکل‌های ۳ و ۴). هم‌چنین افزودن نانوزئولیت پس از نشاسته کاتیونی و تشکیل سامانه دو جزئی منجر به افزایش معنی‌دار شاخص کشش کاغذ گردید درحالی‌که در ویژگی ماندگاری کل (شکل ۲) منجر به کاهش معنی‌داری گردید.

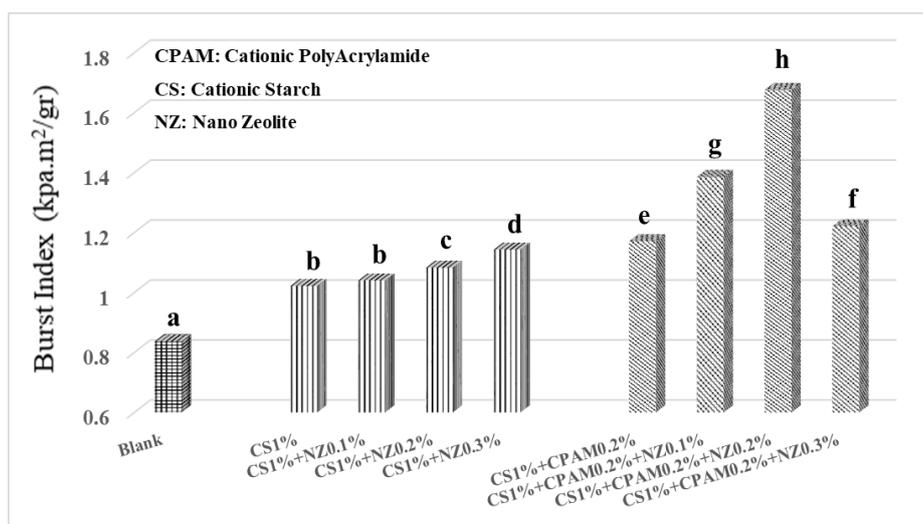


شکل ۷- تأثیر کمپلکس‌های دو جزئی و سه جزئی مواد افزودنی نانو زئولیت پایه بر شاخص کششی کاغذ بازیافتی از آخال OCC.

Figure 7. Effect of binary and ternary Nano-Zeolite-based additive complexes on tensile index of OCC recycled paper.

ترکیدن از پارامترهایی همانند شاخص کشش تأثیر می‌پذیرد، دقت و حساسیت بالاتر به کیفیت شبکه لیاف از یکسو و سهولت و وابستگی کم‌تر به شرایط آزمون و نمونه‌گیری از سوئی دیگر منجر به مطلوبیت و رواج بیش‌تر آن شده است (۲، ۵). اعمال سامانه‌های دو جزئی و سه جزئی مواد شیمیایی در ساخت کاغذ دست‌ساز از خمیرکاغذ بازیافتی از کارتن‌های بسته‌بندی کهنه قهوه‌ای منجر به افزایش چشمگیر و معنی‌دار شاخص ترکیدن (تا ۱۰۰٪) (سامانه سه جزئی نشاسته کاتیونی/پلی‌اکریلامید کاتیونی/نانوزئولیت) در مقایسه با تیمار شاهد گردید (شکل ۸). همانند دیگر ویژگی‌های در پیش گفته‌شده، سامانه سه جزئی از برتری در افزایش شاخص ترکیدن در مقایسه با سامانه دو جزئی برخوردار گردید. هم‌چنین در این ویژگی تفاوت معنی‌داری بین سطوح مختلف کاربرد نانوزئولیت در هر دو سامانه مشاهده گردید.

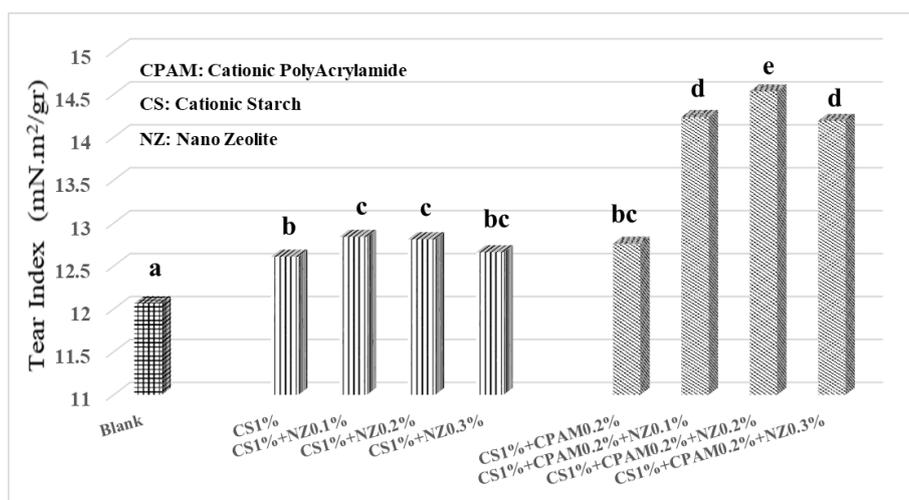
شاخص ترکیدن کاغذ: آنالیز مقاومت در برابر ترکیدگی کاغذ روش استاندارد صنعتی، بسیار آسان، کاربردی و مفید است که برای شناخت حداکثر میزان فشاری به‌کار می‌رود که کاغذ بسته‌بندی می‌تواند از نیروی وارده توسط محتویات درون بسته و یا نیروهای بیرونی، در حین حمل‌ونقل، انبارش، تحویل و جابجایی تحمل کند (۲، ۵). در این آزمون با افزایش تنش فشاری عمود بر سطح کاغذ، حداکثر فشار قابل‌تحمل توسط کاغذ پیش از ترکیدگی تعیین می‌شود که آن را به پارامتری اساسی در طراحی کارتن‌ها، مقوا و سایر محصولات بسته‌بندی تبدیل می‌کند (۵، ۱۱). استفاده از بسته‌بندی با مقاومت کافی در برابر ترکیدگی، نیاز به لایه‌گذاری بیش‌ازحد در کارتن و در پی آن افزایش ابعاد جعبه و یا بسته‌بندی ثانویه را کاهش می‌دهد. این امر منجر به صرفه‌جویی در هزینه مواد و حمل‌ونقل می‌شود، زیرا کارتن‌های قوی‌تر می‌توانند وزن و فشار بیش‌تری را بدون گسیختگی تحمل کنند. درعین‌حالی که شاخص



شکل ۸- تأثیر کمپلکس‌های دو جزئی و سه جزئی مواد افزودنی نانو زئولیت پایه بر شاخص ترکیدن کاغذ بازیافتی از آخال OCC.
Figure 8. Effect of binary and ternary Nano-Zeolite-based additive complexes on burst index of OCC recycled paper.

تأییدشده توسط ویژگی‌های پیشین موجب توزیع یکنواخت تنش و ممانعت از تمرکز تنش در کاغذ می‌گردد. افزایش مشاهده‌شده در ضخامت کاغذهای دست‌ساز آزمایشگاهی (شکل ۵) نیز به‌واسطه قرار دادن تعداد اجزای بیش‌تری از محتویات کاغذ در مسیر پارگی، به انرژی بیش‌تری برای تداوم پارگی کاغذ نیاز دارد که در نتیجه افزایش شاخص پارگی را سبب می‌گردد؛ بنابراین در مجموع، تیمارهای واجد سامانه‌های مواد شیمیایی دو جزئی و سه جزئی از برتری معنی‌داری بر تیمار شاهد برخوردار گشته و تا ۲۰٪ ارتقای شاخص پارگی کاغذ را سبب گشته است (شکل ۹). همانند دیگر ویژگی‌ها، سامانه سه جزئی مواد شیمیایی از کارایی و بهبوددهندگی بیش‌تری در مقایسه با سامانه دو جزئی برخوردار بوده و کاربرد نانوزئولیت نیز نسبت به عدم کاربرد آن، مقاومت پارگی بالاتری را رقم زده است. باین‌حال در سامانه دو جزئی نشانه‌ای از تفاوت آماری معنی‌دار بین سطوح مختلف نانوزئولیت مشاهده نشد.

شاخص پارگی کاغذ: مقاومت در برابر پارگی معیاری از نیروی اعمال‌شده عمود بر صفحه کاغذ (مقید بین گیره‌ها)، برای تکمیل پاره کردن ورقه‌ای با پارگی ابتدائی است. مقاومت بالای کاغذ در برابر پارگی ناشی از ویژگی‌هایی مانند مقاومت ذاتی (طول و ضخامت دیواره) و امتداد الیاف، پالایش کم، گرماژ بالا، ضخامت بالا، کیفیت شکل‌گیری و تا حد مشخصی پیوندیابی داخلی کاغذ می‌باشد (۵، ۱۱، ۲۸، ۲۹). همانند دیگر ویژگی‌های مقاومتی، کاغذ و مقوای دارای مقاومت پارگی بالا می‌تواند خواص محافظتی بهتری ارائه داده و خطر آسیب به کالاها را در حین حمل‌ونقل و انبارداری کاهش دهد. با افزایش ماندگاری (گرماژ) کاغذ و بهبود دلمه‌سازی اجزای دوغاب خمیرکاغذ، انتظار ارتقای مقاومت کاغذ در برابر تنش پارگی نیز متصور است. چراکه تنش وارده توسط آزمونگر پارگی، بین جرم بیش‌تری از مواد لیگنوسولوزی توزیع شده (مستند به افزایش گرماژ یا همان ویژگی ماندگاری، شکل ۲) و بهبود دلمه‌سازی



شکل ۹- تأثیر کمپلکس‌های دو جزئی و سه جزئی مواد افزودنی نانو زئولیت پایه بر شاخص پارگی کاغذ بازیافتی از آخال OCC. Figure 9. Effect of binary and ternary Nano-Zeolite-based additive complexes on tear index of OCC recycled paper.

هم‌چنین بهبود شکل‌گیری مورد اشاره منجر به ارتقای معنی‌دار شاخص‌های مقاومتی کشش، ترکیدن و پارگی گردید و در عین اتصالات محکم‌تر شبکه الیاف ضخامت بیشتری را نیز به وجود آورد. در سامانه دو جزئی نشاسته کاتیونی/نانوزئولیت، تعامل گروه‌های کاتیونی نشاسته با بار منفی سطوح نانوزئولیت به تشکیل دلمه‌های پایدار و بهبود قابل توجه سرعت و حجم آبگیری منجر شد. در سامانه سه‌جزئی (نشاسته کاتیونی/پلی‌اکریلامید کاتیونی/نانوزئولیت)، نقش هم‌افزای دو پلیمر کاتیونی در کنار نانوزئولیت آنیونی برجسته‌تر بود. در این حالت، نشاسته کاتیونی با جذب اولیه بر سطح الیاف، بستری مناسب برای جذب غیرمسطح پلی‌اکریلامید کاتیونی فراهم آورده که باعث تشکیل شبکه‌ی پلیمری سه‌بعدی و افزایش تخلخل مؤثر و ضخامت کاغذ می‌شود. حضور ذرات آنیونی نانوزئولیت پس از دو پلیمر کاتیونی طبیعی و سنتزی منجر به ایجاد پیوندهای الکترواستاتیک چندنقطه‌ای شده که علاوه بر بهبود معنی‌دار ماندگاری و سهولت آبگیری؛ در نهایت موجب بهبود شبکه‌سازی، حفظ و ارتقای ضخامت و نیز ارتقای ویژگی‌های مکانیکی محصول نهایی می‌شود.

نتیجه‌گیری کلی

بررسی تأثیر کاربرد نانوزئولیت به‌عنوان ذره آنیونی در سامانه دلمه‌سازی مرکب خمیرکاغذ بازیافتی، در حضور پلیمر منفرد نشاسته کاتیونی و نیز نشاسته کاتیونی به همراه پلی‌اکریلامید کاتیونی نشان داد که شمول نانوزئولیت در سامانه سه جزئی حاوی پلی‌اکریلامید کاتیونی با ارتقا و بهبود بیشتری در ویژگی‌های خمیرکاغذ و کاغذ همراه بوده است. در این سامانه‌ها و به‌ویژه در سامانه سه جزئی، حضور نانوزئولیت آنیونی به‌عنوان جزء معدنی فعال، نقشی کلیدی ایفا کرده است. از آنجائی‌که نانوزئولیت‌ها دارای ساختار متخلخل کریستالی، سطح ویژه بسیار بالا و بار سطحی منفی پایدار هستند، این ویژگی‌ها موجب می‌شود تا در تماس با پلیمرهای کاتیونی، فرایند تجمع کنترل‌شده و دلمه‌سازی ظریف اجزای دوغاب خمیرکاغذ را تسریع نماید. در نتیجه، این پژوهش نشان داد که استفاده از نانوزئولیت آنیونی نه تنها به بهبود نگهداری اجزای ریز و نرمه‌های الیاف کمک نموده و افزایش ماندگاری کل سامانه را رقم زد، بلکه موجب بهبود در ریزساختار شبکه در حال شکل‌گیری الیاف و سهولت خروج آب گردید.

منابع

1. Askarabadi, S. A., Talaeipour, M., Jalali Torshizi, H., & Hemmasi, A. (2025). Enhanced retention, drainage, and strength of old corrugated container pulp using poly (aluminum chloride), nanofibrillated cellulose, and hydrophobic colloidal silica particles. *BioResources*. 20(4), 8993-9007.
2. Pourkarim Dodangeh, H., Jalali Torshizi, H., & Rudi, H. (2025). Effect of p-DADMAC-nano cellulose complex on properties of pulp and paper recycled from Old corrugated containers (OCC). *Iranian Journal of Wood and Paper Science Research*. 40(4), 379-394.
3. Jalali Torshizi, H., Zare Bidok, S., Ramezani, O., & Rudi, H. (2014). Effect of cationic poly acrylamide - nano bentonite system on retention, drainage and properties of recycled paper from OCC. *Iranian Journal of Wood and Paper Science Research*. 29(3), 474-483.
4. Jalali Torshizi, H., Zare Bidok, S., Ramezani, O., & Rudi, H. (2015). Effect of nano silica and cationic polyacrylamide on retention, drainage and strength properties of recycled paper from OCC. *Forest and Wood Products*. 68(4), 771-784.
5. Gullichsen, J., & Paulapuro, H. (1999). *Papermaking Chemistry, Papermaking science and technology 19 series*. 229p.
6. Jalali Torshizi, H., Jahan-Latibari, A., Mirshokraei, S. A., & Faezipour M. (2009). Investigation on the performance of cationic starch and CMC addition on strength properties of fluting paper produced from OCC. *Pajouhesh & Sazandegi*. 81, 69-76.
7. Pourkarim Dodangeh, H., Jalali Torshizi, H., Rudi, H., & Ramezani, O. (2016). Performance of nano fibrillated cellulose (NFC) and chitosan bio-polymeric system on recycled pulp and paper properties of old corrugated containers (OCC). *Iranian Journal of Wood and Paper Industries*. 7(2), 297-309.
8. González-Pérez, M. M., Manríquez-González, R., Robledo-Ortíz, J. R., Silva-Guzmán, J. A., de Muniz, G. I. B., & Lomelí-Ramírez, M. G. (2021). Old corrugated container (OCC) cardboard material: an alternative source for obtaining microfibrillated cellulose. *Journal of Natural Fibers*. 19(14), 9296-9308.
9. Yang, J., Huang, L., Ni, Y., Chen, L., & Miao, Q. (2021). Nano-SiO₂ used with cationic polymer to improve the strength of sack paper. *BioResources*. 16(2), 3348-3359.
10. Baradaran Khaksar, A., Jalali Torshizi, H., Rasooly Garmaroody, E., & Hamzeh, Y. (2017). Effect of raw and cationic starch Iranian oak (*Quercus Persica*) fruit (Acorn) as a novel biopolymer on properties improvement of dry network and cellulosic fiber suspension. *Forest and Wood Products*. 70(3), 519-528.
11. Baradaran Khaksar, A., Jalali Torshizi, H., & Hamzeh, Y. (2023). Valorization and development of acorn starch as sustainable and high-performance papermaking additive for improving bagasse pulp and paper properties. *Waste and Biomass Valorization*. 14(3), 937-947.
12. Khosravani, A., & Rahmaninia, M. (2013). The potential of nanosilica-cationic starch wet end system for applying higher filler content in fine paper. *BioResources*. 8(2), 2234-2245.
13. Chiani, E., Jalali Torshizi, H., Ashori, A., Rudi, H., & Nabid, M. (2025). Valorizing recycled paper through chitosan and glyoxal-chitosan treatments: synergistic effects on mechanical and physical properties. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*. 38(3), 1122-1141.
14. Song, Z., Li, G., Guan, F., & Liu, W. (2018). Application of chitin/chitosan and their derivatives in the papermaking industry. *Polymers*. 10(4), 389.

15. Pourkarim Dodangeh, H., Jalali Torshizi, H., & Rudi, H. (2021). Cationic polyAcrylamide/cellulose nanofibril polyelectrolytes effects on suspension and network properties of packaging recycled fibers. *Applied Research in Chemical - Polymer Engineering*. 5(1), 3-15.
16. Chiaani, E., Jalali Torshizi, H., Rudi, H., & Nabid, M. (2018). Performance of chitosan and polyamide epichlorohydrin (PAE) on wet strength and water absorption of deinked pulp. *Forest and Wood Products*. 70(4), 709-717.
17. Mousavi, S. F., Rezayati Charani, P., Moradian, M. H., & asadpour, G. (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.
18. Liang, S. B., Ning, X., Fu, Q. J., Liu, Q., & Yao, C. L. (2020). "The use of a PAE/bentonite binary system to improve the wet strength of paper," *BioResources*. 15(4), 8449-8458.
19. Elyasi Bakhtyari, S., & Jalali Torshizi, H. (2017). The effect of concentration of anionic starch solution in paper surface sizing on physical and strength properties of recycled paper. *Iranian Journal of Wood and Paper Industries*. 7(4), 487-497.
20. Pourkarim Dodangeh, H., & Jalali Torshizi, H. (2018). The effect of cellulose nanofibres on cationic starch efficiency in pulp and paper recycled from packaging waste paper. *Iranian Journal of Wood and Paper Industries*. 9(2), 187-197.
21. Lindstrom, T., Wagberg, L., & Larsson, T. (2005). On the nature of joint strength in paper: a review of dry and wet strength resins used in paper manufacturing. 13th Fundamental research symposium, Cambridge. 2005, 457-562.
22. Ersoy, B., & Celik, M. S. (2002). Electrokinetic properties of clinoptilolite with mono- and multivalent electrolytes. *Microporous and Mesoporous Materials*. 55, 305-312.
23. Engin, M., & Atik, C. (2018). The impact of zeolite filler on ageing and mechanical failure of paper. *Nordic Pulp & Paper Research Journal*. 33(3), 512-521.
24. Diana, G. S., Mirela, R., Tadeja, M., & Branka, L. (2012). Natural zeolite as filler in base ink jet paper sheet. *Nordic Pulp & Paper Research Journal*. 27(4), 721-728.
25. Jha, B., & Singh, D. N. (2016). Basics of zeolites. In *Fly Ash Zeolites* (Pp: 5-31). Springer, Singapore.
26. Safizadeh, A., Jalali Torshizi, H., Rudi H., & Partovinia, A. (2019). Premixing of isolated soy protein retention-aid polymer with precipitated calcium carbonate filler on properties of recycled writing and printing paper. *Journal of Wood & Forest Science and Technology*. 26(1), 117-128.
27. Elyasi Bakhtyari, Sh., Jalali Torshizi, H., & Resalati, H. (2016). Alkyl ketene dimer (AKD) sizing of recycled-virgin cardboard with engineered heterogeneous layers under neutral and alkaline condition. *Journal of Wood & Forest Science and Technology*. 23(1), 1-19.
28. Dehghani Firouzabadi, M. R., & Vaziri, V. (2014). Effect of using of zeolite and calcium carbonate fillers on newsprint paper properties. *Journal of Wood & Forest Science and Technology*. 21(4), 86-175.
29. Tajik, M., Kiaei, M., & Jalali Torshizi, H. (2015). Apricot wood—a potential source of fibrous raw material for paper industry. *Comptes rendus de l'Académie bulgare des Sciences*. 68(3), 329-336.

