Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

Journal of Wood and Forest Science and Technology

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

The effect of cationic polyacrylamide on properties of old corrugated containers (OCC) recycled pulp reinforced with *paulownia fortune's* nano lignocellulosic fibers

Mohammad Hadi Aryaie Monfared[*1], Laleh Karimi[2], Elyas Afra[3]

1. Corresponding Author, Assistant Prof., Dept. of Paper Sciences and Engineering, Faculty of Wood and Paper Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: aryaie@gau.ac.ir
2. M.Sc. Graduate in Cellulosic Industries, Faculty of Wood and Paper Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: laleh.karimi.245@gmail.com
3. Associate Prof., Dept. of Paper Sciences and Engineering, Faculty of Wood and Paper Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: elyasafra@yahoo.com

Article Info

Article type:
Full Length Research Paper

Article history:
Received: 10.15.2022
Revised: 01.27.2023
Accepted: 01.27.2023

Keywords:
Cationic polyacrylamide,
Nano ligno-cellulosic fibers,
Old corrugated container (OCC),
Paulownia fortune,
Recycled fibers

ABSTRACT

Background and Objectives: One of the important disadvantages of recycled fibers is the significant decrease in the mechanical strength of the resulting paper due to the reduction of the bond between the fibers. So far, many researches have been reported on the application of cellulose nanofibers in the production processes of paper products. Previous research shows that the use of cellulose nanofibers strengthens paper products, although the amount of this reinforcement is different depending on the type of cellulose nanofibers used. *Paulownia fortune's* wood lignocellulosic nanofibers consist of nanoscale fibers with the same chemical composition as wood and are produced mechanically without the use of chemicals from lignocellulosic biomass at ambient temperature. This material comes in the form of a brown gel, which has a completely environmentally friendly production process. The objective of this study was to investigate the effect of simultaneous addition of cationic polyacrylamide and paulownia wood lignocellulosic nanofibers on the characteristics of paper pulp obtained from the recycling of old corrugated containers (OCC).

Materials and Methods: The pulp was prepared from the OCC collected and after refining and obtaining a flow rate of 380 ± 20 ml, various amounts of paulownia wood lignocellulosic nanofibers (1, 2, and 3%) and polyacrylamide (0.1, 0.2, and 0.3%) was added. Finally, from these treatments, standard handmade papers were made and their physical and mechanical properties were measured according to the standard guidelines of TAPPI institution.

Results: The use of lignocellulosic nanofibers with cationic polyacrylamide significantly increases the resistance properties. The highest resistance was observed using combined addition of lignocellulosic nanofibers and cationic polyacrylamide in samples containing 1% lignocellulosic nanofibers and 3% cationic polyacrylamide. The results of evaluating the physical properties of the papers showed that the density and resistance to air increased with the addition of lignocellulosic nanofibers and cationic polyacrylamide. Moreover, addition of lignocellulosic nanofibers and cationic polyacrylamide to the pulp obtained from the OCC increased the air resistance of paper and density due to the improvement of bonds and

also the reduction of the porosity of the paper structure. Statistical analysis also showed that there is a significant difference between different treatments in terms of mechanical resistance (bursting, tearing, cyclic and tensile crushing) with 95% confidence.

Conclusion: Cationic polyacrylamide, due to its positive charge and polymer structure, prevents the loss of fine particles of paulownia's wood lignocellulosic nanofibers, and as a result, increases the number of nanofibers in paper pulp and improves the bonding between fibers and restores lost bonds. Statistical analysis also showed that there is a significant difference between different treatments in terms of mechanical resistance (bursting, tearing, cyclic and tensile crushing) with 95% confidence. The use of optimal levels of lignocellulosic nanofibers can improve these characteristics. According to the results, the best value of resistance among different treatments was observed in samples containing lignocellulosic nanofibers and 3% cationic polyacrylamide.

Cite this article: Aryaie Monfared, Mohammad Hadi, Karimi, Laleh, Afra, Elyas. 2023. The effect of cationic polyacrylamide on properties of old corrugated containers (OCC) recycled pulp reinforced with *paulownia fortune's* nano lignocellulosic fibers. *Journal of Wood and Forest Science and Technology*, 29 (4), 139-155.

© The Author(s).
DOI: 10.22069/JWFST.2023.20574.1983
Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

نشریه پژوهش‌های علوم و فناوری چوب و جنگل

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

تأثیر پلی‌اکریل‌آمید کاتیونی بر ویژگی‌های خمیر بازیافتی کارتن کنگره‌ای کهنه (OCC) تقویت‌شده با نانو الیاف لیگنوسلولزی *Paulownia fortune*

محمدهادی آریائی منفرد*[۱]، لاله کریمی[۲]، الیاس افرا[۳]

۱. نویسنده مسئول، استادیار گروه علوم و مهندسی کاغذ، دانشکده مهندسی چوب و کاغذ، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: aryaie@gau.ac.ir

۲. دانش‌آموخته کارشناسی‌ارشد صنایع سلولزی، دانشکده مهندسی چوب و کاغذ، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: laleh.karimi.245@gmail.com

۳. دانشیار گروه علوم و مهندسی کاغذ، دانشکده مهندسی چوب و کاغذ، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: elyasafra@yahoo.com

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مقاله کامل علمی- پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۷/۲۳
تاریخ ویرایش: ۱۴۰۱/۱۱/۰۷
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۱/۰۷

واژه‌های کلیدی:
الیاف بازیافتی،
پلی‌اکریل‌آمید کاتیونی،
کارتن کنگره‌ای کهنه (OCC)،
نانو الیاف لیگنوسلولزی،
Paulownia fortune

چکیده

سابقه و هدف: یکی از معایب مهم الیاف بازیافتی کاهش قابل‌توجه مقاومت‌های مکانیکی کاغذ حاصل از آن‌ها به دلیل کاهش پیوندهای بین الیاف می‌باشد. پژوهش‌های فراوانی تاکنون در زمینه کاربرد نانو الیاف سلولزی در فرآیندهای تولید فرآورده‌های کاغذی گزارش شده است. نتایج پژوهش‌های گذشته نشان می‌دهد به‌کارگیری نانو الیاف سلولزی سبب تقویت فرآورده‌های کاغذی می‌گردد؛ اگرچه میزان این تقویت‌کنندگی با توجه به نوع نانو الیاف سلولزی به کار گرفته‌شده متفاوت می‌باشد. نانو الیاف لیگنوسلولزی چوب پالونیا متشکل از الیاف نانومقیاس با ترکیب شیمیایی مشابه چوب است که به روش مکانیکی بدون استفاده از مواد شیمیایی از زیست‌توده لیگنوسلولزی در دمای محیط تولید می‌شود. این ماده به‌صورت ژل قهوه‌ای‌رنگ می‌باشد که فرآیند تولیدی کاملاً دوست‌دار محیط‌زیست دارد. پژوهش حاضر با هدف بررسی تأثیر افزودن هم‌زمان پلی‌اکریل‌آمید کاتیونی و نانو الیاف لیگنوسلولزی چوب پالونیا بر ویژگی‌های خمیرکاغذ حاصل از بازیافت کارتن کنگره‌ای کهنه (OCC) انجام شده است.

مواد و روش‌ها: از کارتن کنگره‌ای کهنه جمع‌آوری‌شده خمیرکاغذ بازیافتی تهیه شد و بعد از پالایش و دست‌یابی به درجه روانی ۳۸۰±۲۰ میلی‌لیتر CSF مقادیر مختلف نانوالیاف لیگنوسلولزی چوب پالونیا (۱، ۲ و ۳ درصد) و پلی‌اکریل‌آمید کاتیونی (۰/۱، ۰/۲ و ۰/۳ درصد) به آن افزوده شد. درنهایت از این تیمارها، کاغذهای دست‌ساز استاندارد ساخته شد و ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی آن‌ها بر اساس شیوه‌نامه استاندارد مؤسسه TAPPI اندازه‌گیری شدند.

یافته‌ها: به‌کار بردن نانوالیاف لیگنوسلولزی همراه با پلی‌اکریل‌آمید کاتیونی باعث افزایش قابل‌توجه خواص مقاومتی می‌شود. بیش‌ترین مقاومت‌ها در سامانه نانوالیاف لیگنوسلولزی- پلی‌اکریل‌آمید کاتیونی مربوط به نمونه‌های حاوی ۱ درصد نانوالیاف لیگنوسلولزی و ۰/۳ درصد پلی‌اکریل‌آمید کاتیونی مشاهده شد. نتایج ارزیابی خواص فیزیکی کاغذها نشان داد که دانسیته و مقاومت به عبور هوا با افزودن نانوالیاف لیگنوسلولزی- پلی‌اکریل‌آمید کاتیونی در کاغذ افزایش می‌یابد. شواهد نشان می‌دهد افزودن هم‌زمان نانو الیاف لیگنوسلولزی- پلی‌اکریل‌آمید کاتیونی به خمیر حاصل از کارتن کنگره‌ای کهنه به دلیل بهبود پیوندها و هم‌چنین کاهش تخلخل ساختار کاغذ باعث افزایش مقاومت به عبور هوا و دانسیته می‌گردد. تحلیل‌های آماری نیز نشان داد که اختلاف کاملاً معنی‌داری با ۹۵ درصد اطمینان بین تیمارهای مختلف از لحاظ مقاومت‌های مکانیکی (ترکیدن، پارگی، لهیدگی حلقوی و کششی) وجود دارد.

نتیجه‌گیری: پلی‌اکریل‌آمید کاتیونی به دلیل بار مثبت و ساختار پلیمری خود از هدررفت ذرات ریز نانو الیاف لیگنوسلولزی چوب پالونیا جلوگیری کرده و درنتیجه باعث افزایش مقدار نانو الیاف موجود در خمیرکاغذ شده و بهبود پیوندیابی بین الیاف ویژگی‌های کاغذ ساخته‌شده را سبب می‌شود. نتایج آنالیزهای آماری با ۹۵ درصد اطمینان نشان داد بین تیمارهای مربوط به ویژگی‌های مقاومتی مانند مقاومت ترکیدن، مقاومت کششی و لهیدگی حلقه‌ای اختلاف معنی‌داری وجود دارد. استفاده از سطوح بهینه الیاف نانو لیگنوسلولزی می‌تواند موجب بهبود این ویژگی‌ها گردد. طبق نتایج حاصل بهترین مقدار مقاومت حاصل در بین تیمارهای مختلف در سامانه نانو الیاف لیگنوسلولزی- پلی‌اکریل‌آمید کاتیونی در نمونه‌های حاوی ۱ درصد نانو الیاف لیگنوسلولزی و ۰/۳ درصد پلی‌اکریل‌آمید کاتیونی مشاهده می‌شود.

استناد: آریائی منفرد، محمدهادی، کریمی، لاله، افرا، الیاس (۱۴۰۱). تأثیر پلی‌اکریل‌آمید کاتیونی بر ویژگی‌های خمیر بازیافتی کارتن کنگره‌ای کهنه (OCC) تقویت‌شده با نانو الیاف لیگنوسلولزی *Paulownia fortune*. *نشریه پژوهش‌های علوم و فناوری چوب و جنگل*، ۲۹ (۴)، ۱۵۵-۱۳۹.

DOI: 10.22069/JWFST.2023.20574.1983

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

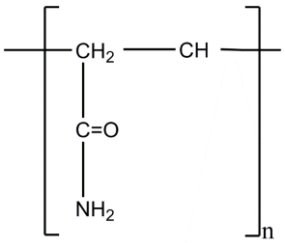
© نویسندگان.

مقدمه

کمبود منابع دارای الیاف بلند لیگنوسلولزی در سطح دنیا و نیاز به بهبود کیفیت و تولید کاغذهای با مقاومت‌های بالاتر جزو چالش‌های پیش‌رو در صنعت خمیر و کاغذ می‌باشد. به همین دلیل صنایع طی دهه‌های اخیر به فکر یافتن منابع و راه‌های جایگزین بوده‌اند. تیمارهای فیزیکی و شیمیایی و استفاده از مواد افزودنی مختلف مانند پلی‌اکریل‌آمید، پلیمرهای مصنوعی، رزین‌ها و در سال‌های اخیر نانو الیاف لیگنوسلولزی جزو این راه‌کارها می‌باشند (۱).

گونه پالونیا گونه‌ای سریع‌الرشد است که کشت آن به‌تازگی در حال گسترش می‌باشد و با پتانسیل‌های زیادی جهت استفاده در صنایع دارد. پژوهش‌های فراوانی نیز تاکنون در زمینه کاربرد نانو الیاف سلولزی برای تولید فرآورده‌های کاغذی گزارش شده است. بر پایه این پژوهش‌ها، به‌کارگیری نانو الیاف سلولزی با سطح ویژه و آب‌دوستی زیاد سبب تقویت فرآورده‌های کاغذی می‌گردد؛ اگرچه میزان این تقویت‌کنندگی با توجه به نوع نانو الیاف سلولزی به‌کار گرفته‌شده متفاوت می‌باشد (۲، ۳، ٤، ٥).

پلی‌آکریل‌آمیدها یکی از پلی‌الکترولیت‌های پرمصرف در صنعت کاغذسازی است. این ماده منشأ آلی دارد و از طریق برقراری پیوند هیدروژنی بین گروه‌های آمیدی نوع اول و مولکول‌های سلولز موجب پیوند بین الیاف می‌شود و هم‌چنین نقش لخته‌ساز و کمک نگهدارنده در صنعت کاغذسازی دارد. این ماده بسیار متنوع است و وزن مولکولی و دانسیته بار متفاوتی دارد (٦). پلی‌آکریل‌آمیدها به دو دسته پلی‌آکریل‌آمید آنیونی (APAM) و پلی‌آکریل آمیدکاتیونی (CPAM) تقسیم می‌شوند. پلی‌آکریل‌آمید آنیونی به دلیل بار منفی خود هیچ‌گونه جاذبه مستقیمی بین خود و الیاف کاغذسازی ندارد؛ به همین دلیل یک ماده کاتیونی مانند آلوم باید همراه با آن مصرف شود تا موجب ماندگاری آن گردد. برای جلوگیری از نیاز به ماده کاتیونی می‌توان گروه کاتیونی را به‌طور مستقیم به پلی‌اکریل‌آمید اولیه متصل کرد. با کوپلیمریزاسیون یک مونومر کاتیونی یا با تغییر بعضی از گروه‌های آمیدی به گروه‌های کاتیونی می‌توان پلی‌اکریل‌آمید کاتیونی تولید کرد. در پلی‌آکریل‌آمید مصرفی به‌عنوان افزودنی مقاومت خشک، باید ۱۰ درصد از مونومرها باردار شوند یا قابلیت باردار شدن داشته باشند. این ماده در تمام دامنه pH سامانه کاغذسازی باردار می‌باشد (شکل ۱). ساختارهای شیمیایی مونومرها معمولاً برای تولید محصولات کوپلیمر اکریل آمید کاتیونی استفاده می‌شود (۷، ۸).



شکل ۱- ساختار شیمیایی پلی‌اکریل‌آمید (۹).

Figure 1. Chemical structure of poly acrylamide (9).

مواد دارای ابعاد نانومتری بسیار کوچک هستند و به‌طور طبیعی و مستقیم نمی‌توانند در ماشین کاغذسازی مورد استفاده قرار گیرند اما سطح ویژه نسبتاً زیادی دارند و برای نگهداری آن‌ها در فرآیند کاغذسازی و جلوگیری از هدررفت آن‌ها می‌توان از کمک نگهدارنده‌ها استفاده کرد. لازم به ذکر است که

اگر از مواد کمک نگهدارنده بیش‌ازحد و اندازه مناسب استفاده شود، اثر آن‌ها در کمک به نگهداری مواد در سامانه کاغذسازی منفی خواهد بود (۱۰).

پوربابا و همکاران (۲۰۱۸) تأثیر استفاده هم‌زمان نانو الیاف سلولزی و نرمه‌های کاغذسازی به همراه یک ماده کاتیونی شامل پلی‌اکریل‌آمید کاتیونی، پلی‌آلومینیوم کلراید و پلی‌اکریل‌آمید کاتیونی بر خواص خمیرکاغذ بازیافتی مرکب‌زدایی شده بررسی نمودند. نتایج این پژوهش نشان داد شاخص مقاومت کششی، مقاومت به ترکیدگی و میزان نگهداری آب الیاف با افزودن پلی‌اکریل‌آمید کاتیونی همراه با نانو الیاف و نرمه‌های الیاف به ترتیب ٤۰، ٤۲ و ۲۷ درصد افزایش یافته است. در همین حال افزایش زمان آبگیری از خمیر تا ۳۰ درصد به دلیل استفاده از ۱٦ درصد نرمه و ۷ درصد نانو فیبر سلولزی به همراه پلی‌اکریل‌آمید قابل‌مشاهده است (۲).

رضایتی و مرادیان (۲۰۱۸) با استفاده از نانو الیاف سلولزی به همراه پلی‌اکریل‌آمید کاتیونی برای بهبود طول پارگی کاغذ حاوی الیاف کوتاه در مقایسه با کاغذ حاوی ۲۰ درصد الیاف بلند سوزنی‌برگ استفاده نمودند. هم‌چنین نتایج این پژوهش نشان داد افزودن ۰/۵ درصد پلی‌اکریل‌آمید کاتیونی همراه با ۳ درصد نانو الیاف موجب در عین کاهش مشکلات فرآیندی ناشی از استفاده از مقادیر زیاد پلی‌اکریل‌آمید کاتیونی موجب افزایش معنی‌دار طول پارگی کاغذ مشابه نتیجه حاصل از ۱۵ درصد الیاف بلند حاصل نیز می‌گردد. نتایج مشابهی نیز با افزودن ۳ درصد نانو الیاف سلولزی به همراه ۰/۰۳ درصد پلی‌اکریل‌آمید کاتیونی حاصل شد (۱۱).

یوسفی و همکاران (۲۰۱۸) با استفاده از روش مکانیکی و دستگاه سوپر آسیاب دیسکی بدون استفاده از تیمارهای شیمیایی از آرد چوب به‌طور مستقیم نانو الیاف لیگنوسلولزی چوب پالونیا با بازده بالا و دوستدار محیط‌زیست تولید نمودند. بررسی میکروسکوپی این محصول قطر متوسط ۲۲±۵۵ نانومتری الیاف حاصل را تأیید نمود (۱۲).

هدف از انجام این پژوهش بررسی تأثیر استفاده از نانو الیاف لیگنوسلولزی چوب پالونیا گونه سریع‌الرشد پالونیا بر خواص خمیرهای بازیافتی OCC و هم‌چنین تأثیر استفاده از سطوح مختلف پلی‌اکریل‌آمید بر حفظ نانو الیاف چوب در فرآیند کاغذسازی می‌باشد.

مواد و روش‌ها

تهیه خمیر اولیه: کارتن‌های کنگره‌ای کهنه (OCC) جهت خمیرسازی مجدد به‌صورت تصادفی از فروشگاه‌های شهر گرگان جمع‌آوری شد.

تهیه پلی‌اکریل‌آمید کاتیونی و آماده‌سازی: پلی‌اکریل‌آمید کاتیونی از شرکت BASF آلمان خریداری شد و مشخصات فنی آن در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱- مشخصات پلی‌اکریل‌آمید **کاتیونی مورد استفاده.**

Table 1. Properties of used cationic polyacrylamide.

شرکت و کشور تأمین‌کننده Company and country of producer	pH (محلول ۱ درصد) (1% soloution)	ظاهر Appearance	بارکاتیونی (میکرواکی والان گرم) Cationic charge (microequivalent)	وزن مولکولی (کیلودالتون) Molecular weight (kilodaltons)
BASF- آلمان کد Zetag-7563 Germany- BASF	6-8	گرانول سفید White granul	متوسط Medium	متوسط Medium

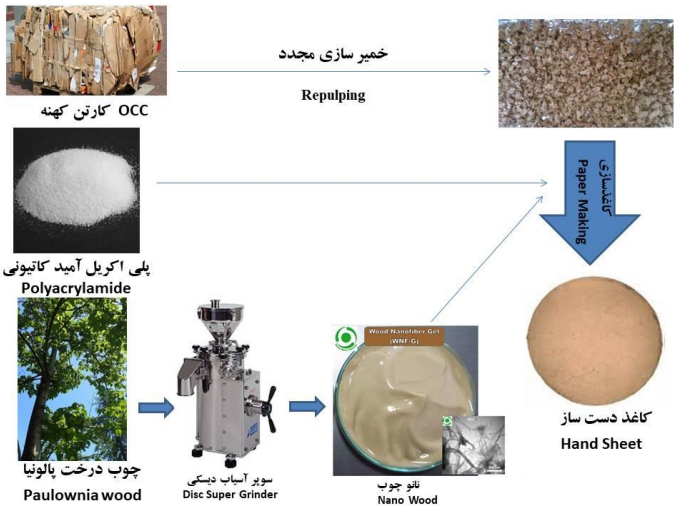
تهیه نانوالیاف لیگنوسلولزی: جهت انجام این پژوهش از نانوالیاف چوب پالونیا که از آرد چوب خام بدون هرگونه تیمار شیمیایی توسط شرکت نانو نوین پلیمر، ساری تهیه شده بود استفاده گردید. طبق اعلام شرکت نانو نوین پلیمر برای تهیه نانوالیاف لیگنوسلولزی ابتدا چوب پالونیا آرد شده و با غربال مش ٤٠ (٤٢٠ میکرومتر) غربال گردید. ذرات غربال‌شده به مدت ۵ ساعت در آب مقطر غوطه‌ور شد و سپس مجدداً با استفاده از یک دستگاه سوپرآسیاب دیسکی (MKCA6-2؛ شرکت Masuko، ژاپن) با غلظت ۲ درصد وزنی برای تهیه نانوالیاف لیگنوسلولزی آسیاب شد. ذرات چوب ٦ بار از طریق دستگاه سوپرآسیاب دیسکی عبور داده شد، در طی آن فاصله بین دیسک‌های استاتور و روتور از ۲۰۰ میکرومتر به ٦۰۰ میکرومتر کاهش یافت و سرعت روتور از ۲۸۰۰ به ۱۸۰۰ کاهش یافت. ژل نانوالیاف لیگنوسلولزی سپس از غلظت ۲ درصد وزنی با استفاده از سانتریفیوژ در ۱۰ هزار دور در دقیقه به‌مدت ۵ دقیقه به‌دست آمد (۱۲). مشخصات نانو الیاف لیگنوسلولزی چوب پالونیا مورد استفاده طبق اطلاعات فنی اعلامی از سوی شرکت نانو نوین پلیمر (ساری- ایران) به‌شرح جدول ۲ می‌باشد و سایر ویژگی‌های فیزیکی و مقاومتی الیاف مورد استفاده در این پژوهش نیز پیش‌ازاین در پژوهشی علمی توسط یوسفی و همکاران (۲۰۱۸) بررسی شده است (۱۲).

جدول ۲- مشخصات نانوالیاف لیگنوسلولزی چوب پالونیا طبق اعلام شرکت سازنده.

Table 2. Nano lignocellulosic paulownia wood fibers Properties according producer company.

رنگ Color	درصد خشکی (٪) Consistency	متوسط طول (nm) Average length	متوسط قطر (nm) Average diameter	بازده تولید (٪) Production productivity
کرم روشن Light beige	4	5000≥	55	97

آماده‌سازی الیاف و خمیرسازی مجدد: برای تهیه کاغذهای ترکیبی، ابتدا سوسپانسیون خمیر با درصد خشکی ۰/۳ درصد با دستگاه همزن با ۱۰۰۰ دور در دقیقه به‌مدت ۱۲۰ ثانیه هم زده شد. سپس سوسپانسیون نانوالیاف لیگنوسلولزی که از قبل آماده شده بود، به مقدار لازم به سوسپانسیون خمیرکاغذ اضافه شد و به‌مدت ۳۰ ثانیه دیگر سوسپانسیون حاصل با همان دور هم زده شد. در ادامه پلی‌اکریل‌آمید کاتیونی به‌آرامی به سوسپانسیون خمیرکاغذ اضافه شدند. پس از افزودن پلی‌اکریل‌آمید کاتیونی، سرعت چرخش همزن به ۱۵۰۰ دور در دقیقه افزایش یافت و سوسپانسیون به‌دست‌آمده پس از ۳ دقیقه هم‌زدن، در داخل محفظه سامانه ساخت کاغذ دست‌ساز ریخته شد. شکل ۲ تصویر شماتیکی از مراحل تولید نانو الیاف لیگنوسلولزی چوب پالونیا و تهیه کاغذ دست‌ساز را نشان می‌دهد.



شکل ۲- مراحل تولید کاغذ دست‌ساز خمیر OCC تقویت‌شده با استفاده نانو الیاف لیگنوسلولزی چوب پالونیا و پلی‌اکریل‌آمید کاتیونی.

Figure 2. OCC pulp Hand sheet Production steps reinforced with nano lignocellulosic paulownia wood fibers and cationic polyacrylamide.

ساخت کاغذهای دست‌ساز: کاغذ دست‌ساز با گراماژ ٦۰ گرم بر مترمربع مطابق دستورالعمل استاندارد شماره ۹۵-sp ۲۰۵ T آئین‌نامه تاپی ساخته شد. کاغذهای شاهد با استفاده از ۱۰۰ درصد خمیرکاغذ OCC و سایر تیمارها ترکیبی از نانو الیاف چوب و پلی‌اکریل‌آمید کاتیونی به شرح جدول ۳ ساخته شد.

جدول ۳- ترتیب نام‌گذاری تیمارهای نانو الیاف لیگنوسلولزی- پلی‌اکریل‌آمید کاتیونی.

Table 3. Treatments name of cationic polyacrylamide and nanowood.

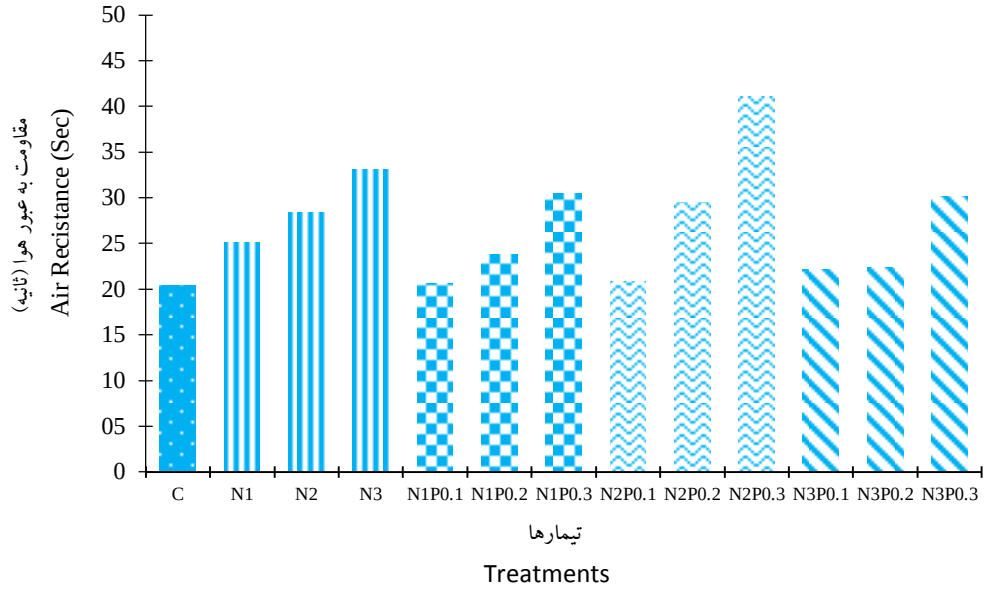
پلی‌اکریل‌آمید کاتیونی (٪) Cationic Polyacrylamide (%)	نانوالیاف لیگنوسلولزی (٪) Lignocellulosic nano fibers (%)	کد تیمار Treatment code
-	-	C
-	1	N_1
-	2	N_2
-	3	N_3
0.1		$N_1P_{0.1}$
0.2	1	$N_1P_{0.2}$
0.3		$N_1P_{0.3}$
0.1		$N_1P_{0.1}$
0.2	2	$N_1P_{0.2}$
0.3		$N_1P_{0.3}$
0.1		$N_1P_{0.1}$
0.2	3	$N_1P_{0.2}$
0.3		$N_1P_{0.3}$

اندازه‌گیری ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی کاغذها: زمان عبور ۳۰۰ میلی‌لیتر هوا از بافت کاغذ به‌عنوان مقاومت عبور هوا که معیاری از میزان تخلخل بافت کاغذ است، بر اساس دستورالعمل استاندارد شماره T٤٦٠ om-٠٢ آئین‌نامه TAPPI با دستگاه گرلی[1] به‌دست آمد. این اعداد، میزان نفوذپذیری هوا برحسب ثانیه بوده و برحسب ۱۰۰ میلی‌لیتر هوا گزارش شد. آزمون‌های مکانیکی شامل مقاومت کششی (T٤٠٤ om-٠١)، شاخص مقاومت به پارگی (T ٤١٤ om-٨٨)، شاخص مقاومت به ترکیدن (T٤٠٣ om-٩٧)، مقاومت به لهیدگی حلقوی (T ٨١٨ om-٨٧) نیز بر اساس دستورالعمل‌های آئین‌نامه تاپی انجام گردیدند.

روش تجزیه‌وتحلیل آماری: نتایج حاصل از پژوهش حاضر در قالب طرح کاملاً تصادفی توسط نرم‌افزار SPSS٢٤ مورد ارزیابی آماری قرار گرفت.

نتایج و بحث

مقاومت به عبور هوا: مقادیر مقاومت به عبور هوای انواع کاغذهای تهیه‌شده، طبق روش استاندارد تاپی اندازه‌گیری و نتایج حاصل نشان داد که اختلاف معنی‌دار آماری تا سطح ۹۵ درصد اطمینان بین مقادیر مربوطه وجود دارد. طبق نتایج حاصل، بیش‌ترین مقاومت به عبور هوا (٤١/١ ثانیه) مربوط به تیمار $N_{٢}P_{.٣}$ (۲ درصد نانوالیاف لیگنوسلولزی و ۰/۳ درصد پلی‌اکریل‌آمید کاتیونی) و کم‌ترین آن (۲۰/۳ ثانیه) مربوط به خمیرکاغذ ۱۰۰ درصد بازیافتی (شاهد) است و با افزودن نانوالیاف لیگنوسلولزی و پلی‌اکریل‌آمید کاتیونی مقادیر مقاومت به عبور هوا بیش‌تر مشاهده می‌گردد (شکل ۳).



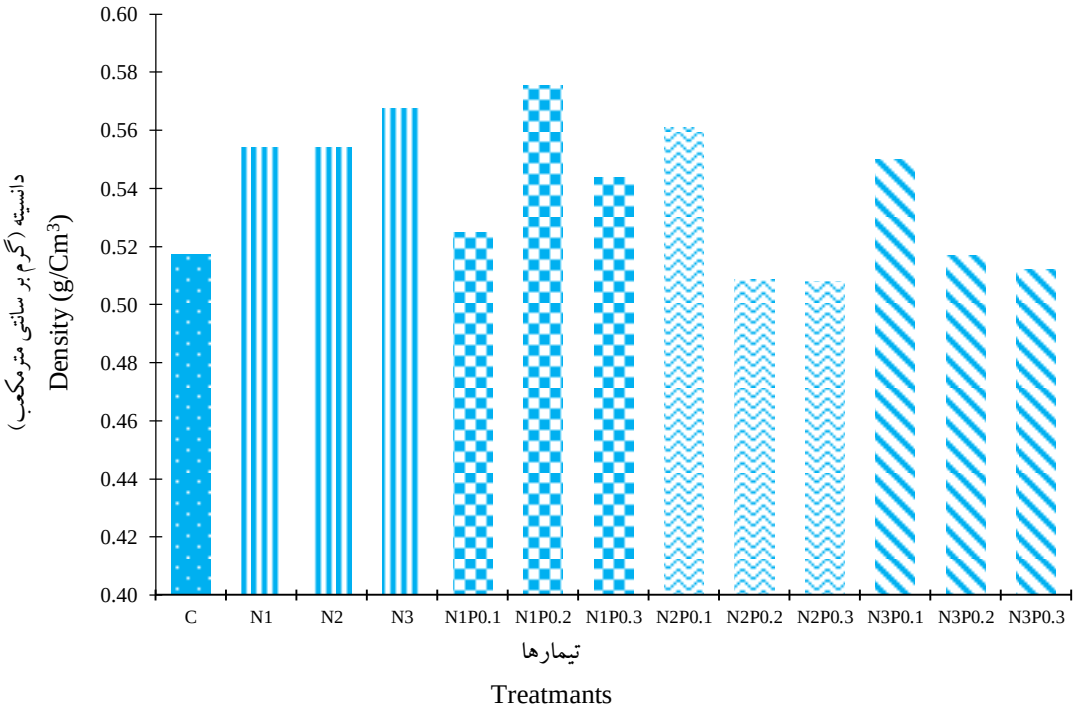
شکل ۳- مقادیر مقاومت به عبور هوا (روش گرلی) در تیمارهای مختلف پلی‌اکریل‌آمید **کاتیونی (P) و نانو الیاف لیگنوسلولزی چوب پالونیا (N).**

Figure 3. Air resistance (Gurley method) properties of different cationic polyacrylamide (P) and nano lignocellulosic fiber (N) treatments.

1- Gurley

به نظر می‌رسد حضور نانو الیاف لیگنوسلولزی چوب پالونیا به دلیل پر کردن خلل و فرج و هم‌چنین افزایش میزان اتصالات بین الیاف موجب کاهش تخلخل ساختاری کاغذ می‌گردد (۲۰). افزایش مقدار نانو الیاف لیگنوسلولزی چوب پالونیا در ساختار کاغذ تا سطح بهینه مصرف و در مرحله بعد استفاده از مقادیر بیش‌تر پلی‌اکریل‌آمید کاتیونی برای کمک به حفظ آن‌ها در ساختار کاغذ موجب کاهش تخلخل ساختاری کاغذ و افزایش مقاومت به عبور هوا شده در تیمار $N_{۲}P_{۰/۳}$ ولی عبور از سطح بهینه مجدداً تا حدی موجب کاهش مقاومت به عبور هوا در تیمارهای $N_{۳}P_{۰/۲}$ شده است. از سوی دیگر در تیمارهایی مانند $N_{۲}P_{۰/۲}$ به علت بر هم خوردن فرایند ایجاد فلاک و تولید فلاک‌های درشت دانسیته کاهش، ساختار کاغذ باز و مقاومت به عبور هوا کاهش یافته است (٦).

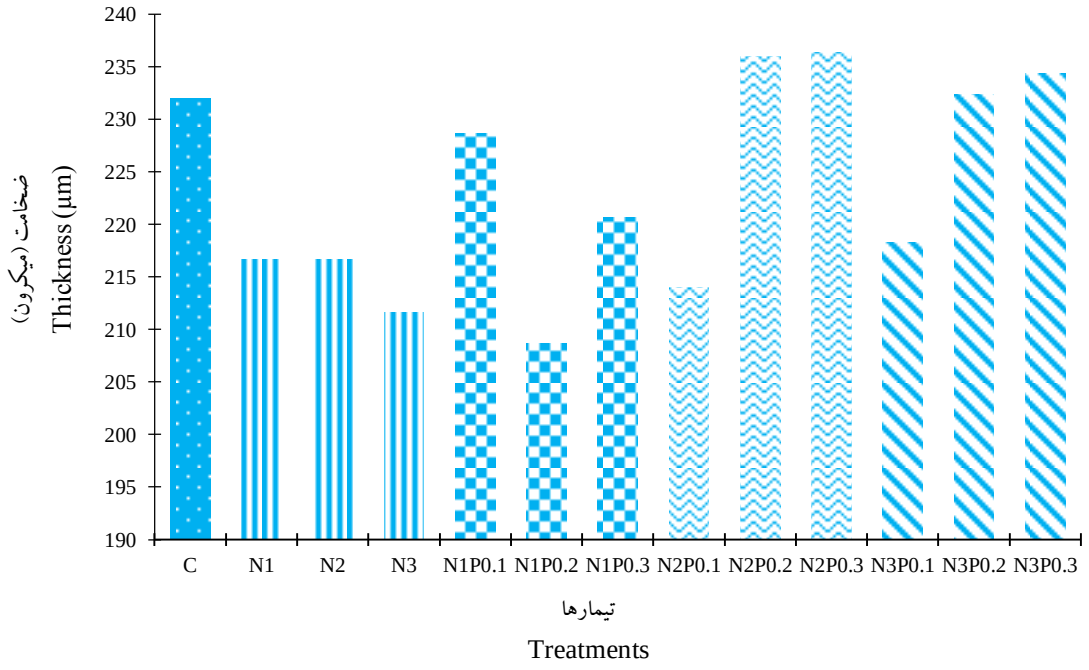
دانسیته: نتایج نشان داد که بین هر تیمار با خمیرکاغذ شاهد اختلاف معنی‌داری وجود دارد. هم‌چنین بین تیمارهای مختلف اختلاف معنی‌داری از لحاظ این ویژگی وجود دارد. به‌طوری‌که دانسیته کاغذهای حاصل از افزودن نانوالیاف لیگنوسلولزی- پلی‌اکریل‌آمید کاتیونی دانسیته بیش‌تری نسبت به تیمار شاهد دارد. طبق نتایج حاصل بیش‌ترین مقدار دانسیته مربوط به تیمار $N_{۳}$ (۳ درصد نانوالیاف لیگنوسلولزی) و کم‌ترین آن مربوط به خمیرکاغذ ۱۰۰ درصد بازیافتی (شاهد) است (شکل ٤). به‌نظر می‌رسد افزایش مقدار پلی‌اکریل‌آمید به‌دلیل تغییر تعادل بارها در سیستم کاغذسازی می‌تواند تشکیل توده‌های نانو الیاف را تحت‌تأثیر قرار داده و موجب کاهش روند افزایش دانسیته در تیمارهایی مانند $N_{۱}P_{۰/۳}$ می‌گردد که در نتایج سایر پژوهش‌ها نیز مورد تأیید قرار گرفته است (۱۹).



شکل ٤- مقادیر دانسیته کاغذ در تیمارهای مختلف پلی‌اکریل‌آمید کاتیونی (P) و نانو الیاف لیگنوسلولزی چوب پالونیا (N).

Figure 4. Density properties of paper in different cationic polyacrylamide (P) and nano lignocellulosic fiber (N) treatments.

ضخامت: مقادیر ضخامت انواع کاغذهای تهیه‌شده، نشان داد بین تیمارهای مختلف اختلاف معنی‌داری (۹۵ درصد اطمینان) از لحاظ این ویژگی وجود دارد. به‌طوری‌که ضخامت برخی کاغذهای حاصل از افزودن نانوالیاف لیگنوسلولزی- پلی‌اکریل‌آمید کاتیونی نسبت به تیمار شاهد کم‌تر است. طبق نتایج حاصل بیش‌ترین مقدار ضخامت مربوط به تیمار $N_2P_{0.3}$ (۲ درصد نانوالیاف لیگنوسلولزی و ۰/۳ درصد پلی‌اکریل‌آمید کاتیونی) و کم‌ترین آن مربوط به تیمار $N_1P_{0.2}$ (۱ درصد نانوالیاف لیگنوسلولزی و ۰/۲ درصد پلی‌اکریل‌آمید کاتیونی) است (شکل ۵).

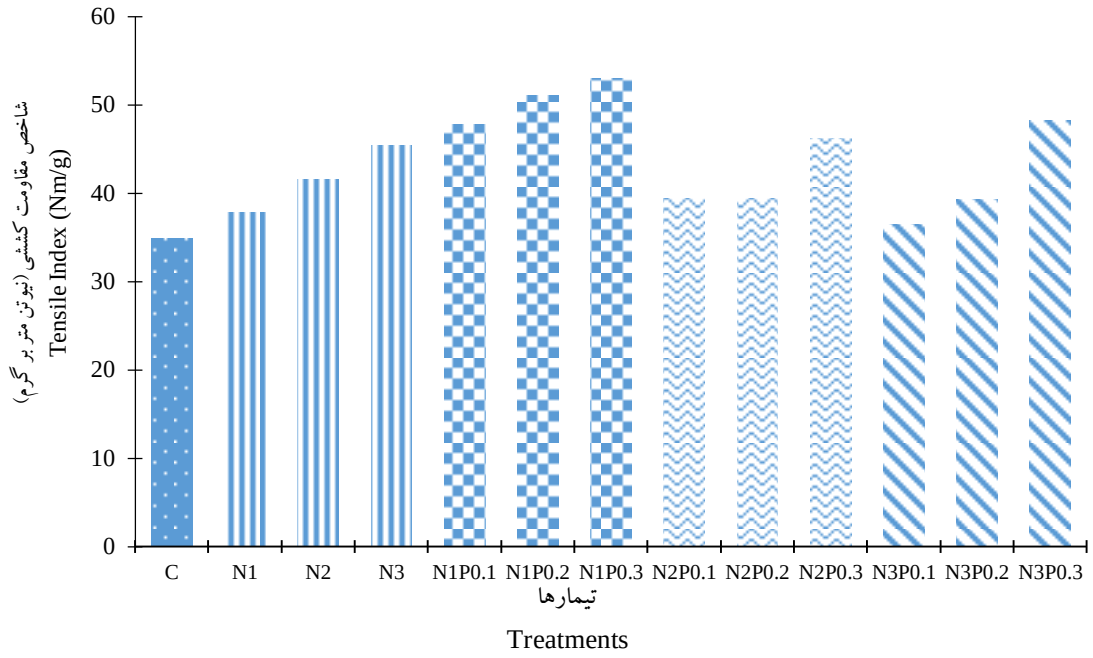


شکل ۵- مقادیر ضخامت کاغذ در تیمارهای مختلف پلی‌اکریل‌آمید کاتیونی (P) و نانو الیاف لیگنوسلولزی چوب پالونیا (N).

Figure 5. Thickness properties of paper in various cationic polyacrylamide (P) and nano lignocellulosic fiber (N) treatments.

در نتیجه استفاده از الیافی که حاوی مقادیر بیش‌تری لیگنین هستند الیاف نسبتاً سفت با انعطاف‌پذیری کم پس از خشک شدن حاصل می‌گردد که از نظر شیمیایی نیز سطح بیرونی آن‌ها برای پیوندهای هیدروژنی حاوی گروه‌های عاملی کم‌تری می‌باشد (۱۹). بااین‌حال کاهش ابعاد الیاف تا مقیاس نانومتری به‌شدت سطح آن‌ها را گسترش داده و از طریق ایجاد پل بین الیاف و تشکیل پیوندهای هیدروژنی باعث بهبود اتصال بین الیاف و در نتیجه کاهش ضخامت کاغذ می‌گردد (۱۳).

شاخص مقاومت کششی: مقادیر شاخص مقاومت کششی کاغذهای حاصل از تیمارهای مختلف نانوالیاف لیگنوسلولزی - پلی‌اکریل‌آمید کاتیونی نشان داد بیش‌ترین مقدار شاخص مقاومت کششی مربوط به تیمار $N_1P_{0.3}$ (۱ درصد نانوالیاف لیگنوسلولزی و ۰/۳ درصد پلی‌اکریل‌آمید کاتیونی) می‌باشد که مقدار آن برابر با ٤٦/٩٦ نیوتن متر بر گرم است. درحالی‌که کم‌ترین مقدار شاخص مقاومت کششی به تیمار شاهد اختصاص دارد که مقدار آن برابر با ٣٤/٩ نیوتن متر بر گرم می‌باشد (شکل ٦).



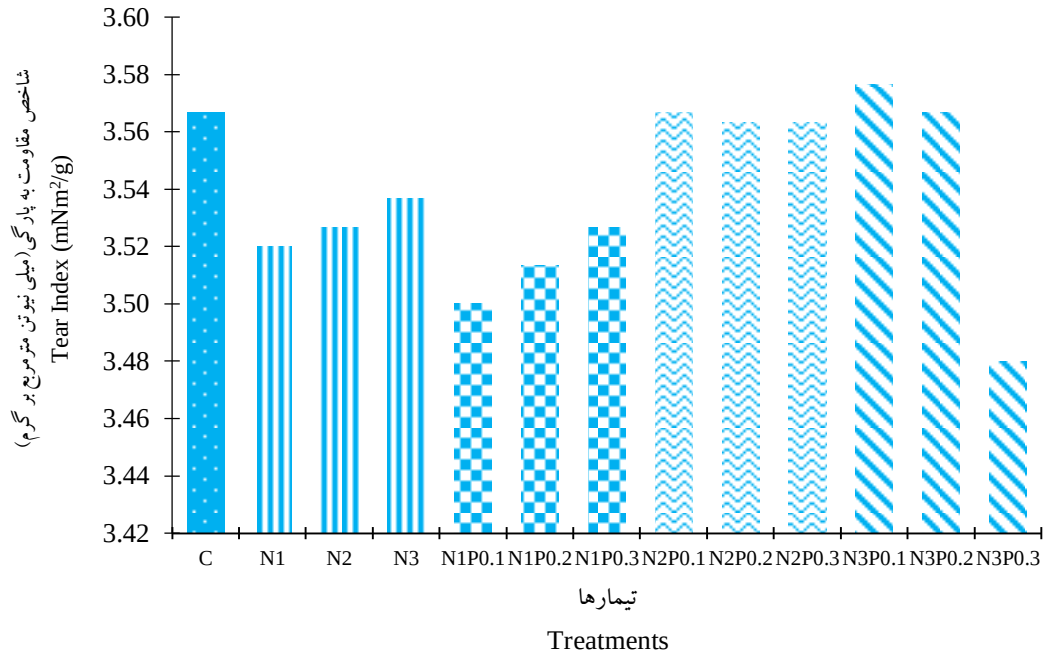
شکل ٦- مقادیر شاخص مقاومت کششی کاغذ در تیمارهای مختلف پلی‌اکریل‌آمید کاتیونی (P) و نانو الیاف لیگنوسلولزی چوب پالونیا (N).

Figure 6. Tensile index strength properties of paper in various cationic polyacrylamide (P) and nano lignocellulosic fiber (N) treatments.

یکی از پارامترهای تأثیرگذار بر مقاومت کششی، طول الیاف و پیوند بین آن‌هاست (١٤). افزایش تعداد پیوندها از طریق افزایش هم‌زمان نانو الیاف و کمک نگهدارنده کاتیونی باعث افزایش این مقاومت گردیده. شواهد نشان می‌دهد توزیع یکنواخت نانو الیاف در میان میکروالیاف OCC بازیافتی به دلیل تعادل بارهای الکتریکی در سوسپانسیون در این بهبود مؤثر بوده که با نتایج رضایتی و همکاران (۱۳۹۷) و هم‌چنین نتایج حاصل از دانسیته و مقاومت به عبور هوا در پژوهش حاضر همسو می‌باشد (۱۱). بااین‌حال افزایش مقادیر نانو الیاف در سطوح ۲ و ۳ درصد با توجه به مصرف بیش‌تر الیاف نانو ابعاد، نتوانسته موجب بهبود قابل‌قبولی در مقاومت کششی حاصل نماید. احتمالاً به‌دلیل وجود لیگنین در نانوالیاف لیگنوسلولزی، قابلیت پیوندیابی بین الیاف کاهش یافته و سبب کاهش مقاومت‌ها می‌گردد. با افزایش سهم نانوالیاف لیگنوسلولزی رفتار افزایشی در مورد مقاومت‌ها دیده می‌شود. بر اثر کوچک‌تر شدن ابعاد تا مقیاس نانومتری، سطح ویژه فیبرهای سلولزی افزایش می‌یابد. این به‌معنی قرارگرفتن تعداد بیش‌تر گروه‌های در دسترس هیدروکسیل در سطح نانوفیبرهاست که توانایی تشکیل پیوند هیدروژنی را با نانوفیبرهای مجاور دارند و نهایتاً سبب تشکیل شبکه‌ای از نانوفیبرها می‌شوند. درهم‌رفتگی و ایجاد ساختار شبکه‌ای نانوفیبرها در واحد حجم بیش‌تر از ویژگی متناظر میکروفیبرها در واحد حجم است. درهم‌رفتگی فیبرها بر خواص کاغذ به‌ویژه مقاومت‌های مکانیکی اثر معنی‌داری دارد (۱۹، ۲۰). این یافته‌ها با نتایج به‌دست‌آمده توسط پژوهش‌گرانی هم‌چون Yousefi و همکاران (۲۰۱۳)؛ هادیلام و همکاران (۱۳۹۲) و Ghaderi و همکاران (۲۰۱٤) که اثر افزودن نانوالیاف سلولزی را بر ویژگی مکانیکی فیلم و کاغذ مثبت ارزیابی کردند، مطابقت دارد (۱۹، ۲۰، ۲۱).

شاخص مقاومت به پارگی: مقادیر شاخص مقاومت به پارگی کاغذهای حاصل از تیمارهای مختلف نانوالیاف لیگنوسلولزی- پلی‌اکریل‌آمید کاتیونی و نتیجه مقایسه آماری میانگین نتایج در شکل ۷ قابل‌مشاهده است. مقادیر شاخص مقاومت به پارگی کاغذهای حاصل از تیمارهای مختلف توسط بررسی شد. نتایج حاصل از آزمون تجزیه واریانس نشان داد که بین مقادیر به‌دست‌آمده در سطح ۹۵ درصد اطمینان اختلاف معنی‌دار آماری وجود ندارد.

بیش‌ترین مقدار شاخص مقاومت به پارگی مربوط به تیمار $N_{۳}P_{.۱}$ (۳ درصد نانوالیاف لیگنوسلولزی و ۰/۱ درصد پلی‌اکریل‌آمید کاتیونی) می‌باشد که مقدار آن برابر با ۳/۵۸ میلی نیوتن مترمربع بر گرم است، درحالی‌که کم‌ترین مقدار شاخص مقاومت به پارگی به $N_{۳}P_{.۳}$ (۳ درصد نانوالیاف لیگنوسلولزی و ۰/۳ درصد پلی‌اکریل‌آمید کاتیونی) اختصاص دارد که مقدار آن برابر با ۳/٤۸ میلی نیوتن مترمربع بر گرم می‌باشد (شکل ۷). هر چند نتایج آنالیزهای آماری بر معنی‌دار نبودن این تفاوت‌ها دلالت دارد.



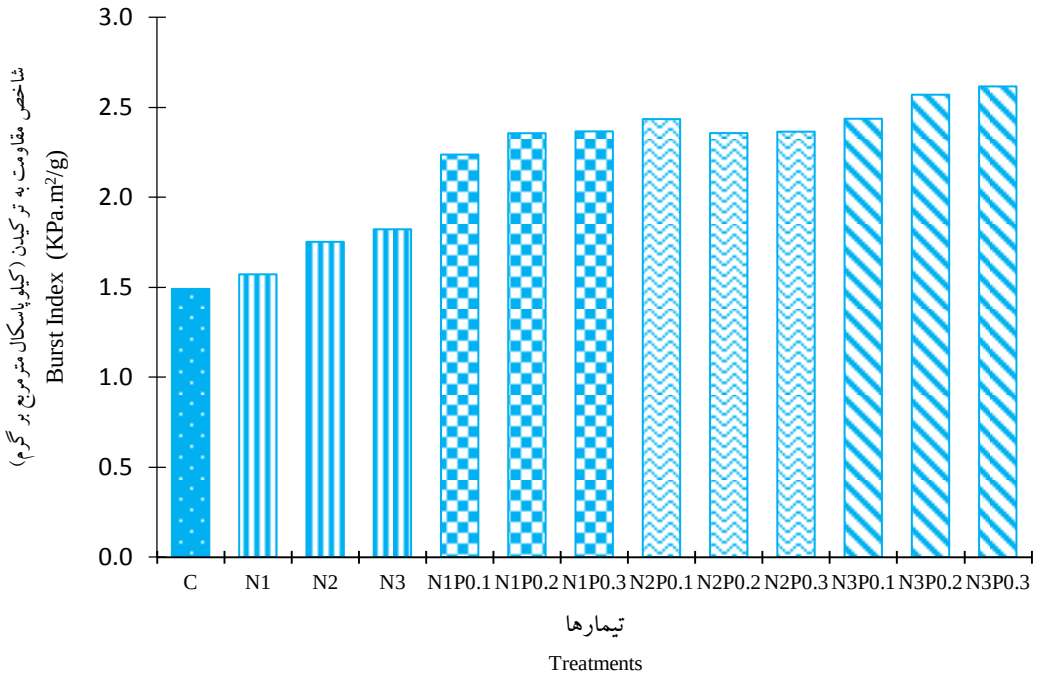
شکل ۷- مقادیر شاخص مقاومت به پارگی در تیمارهای مختلف پلی‌اکریل‌آمید کاتیونی (P) و نانو الیاف لیگنوسلولزی چوب پالونیا (N).

Figure 7. Tear index properties of paper in various cationic polyacrylamide(P) and nano lignocellulosic fiber (N) treatments.

مقاومت به پارگی بیان‌کننده مقدار انرژی موردنیاز برای گسیختگی نمونه کاغذ می‌باشد. این انرژی به کار گرفته‌شده می‌تواند صرف پارگی الیاف و یا جداسازی آن از صفحه کاغذی در نتیجه گسسته شدن پیوند بین الیاف شود (۵). مقدار مقاومت به پارگی در درجه اول به طول و مقاومت الیاف و قدرت اتصال بین الیاف بستگی دارد (٤). با توجه به ماهیت و استحکام پیوند بین الیاف، نسبت مقدار الیاف پاره شده به الیاف جداشده از صفحه کاغذ در طی فرآیند پارگی متغیر است. در کاغذهای با پیوند محکم بین الیاف، انرژی پارگی بیش‌تر صرف پاره شدن الیاف شده ولی در کاغذهای با پیوند ضعیف بین الیاف، انرژی پارگی

بیش‌تر صرف جدا شدن الیاف می‌شود. درمجموع با افزایش پالایش و افزایش سطوح پیوند بین الیاف و هم‌زمان کاهش میانگین طول الیاف، شاخص مقاومت به پارگی کاهش می‌یابد (۱٤).

شاخص مقاومت به ترکیدن: مقادیر مقاومت به ترکیدن کاغذهای حاصل از تیمارهای مختلف نانوالیاف لیگنوسلولزی - پلی‌اکریل‌آمید کاتیونی طبق روش استاندارد اندازه‌گیری و جهت حذف اثر وزن پایه نمونه‌ها، در تمامی موارد شاخص مقاومت به ترکیدن نمونه‌ها محاسبه و مورد استفاده قرار گرفت. نتایج نشان داد بیش‌ترین مقدار شاخص مقاومت به ترکیدن مربوط به تیمار $N_{۳}P_{.۳}$ (۳ درصد نانو الیاف لیگنوسلولزی چوب پالونیا و ۰/۳ درصد پلی‌اکریل‌آمید کاتیونی) می‌باشد که مقدار آن برابر با ۲/٦۱ کیلوپاسکال مترمربع برگرم است، درحالی‌که کم‌ترین مقدار شاخص مقاومت به ترکیدن به تیمار C (شاهد) اختصاص دارد که مقدار آن برابر با ۱/٤۹ کیلوپاسکال مترمربع برگرم می‌باشد (شکل ۸).



شکل ۸- مقادیر شاخص مقاومت به ترکیدن در تیمارهای مختلف پلی‌اکریل‌آمید کاتیونی (P) و نانو الیاف لیگنوسلولزی چوب پالونیا (N).

Figure 8. Burst strength index properties of paper in various cationic polyacrylamide (P) and nano lignocellulosic fiber (N) treatments.

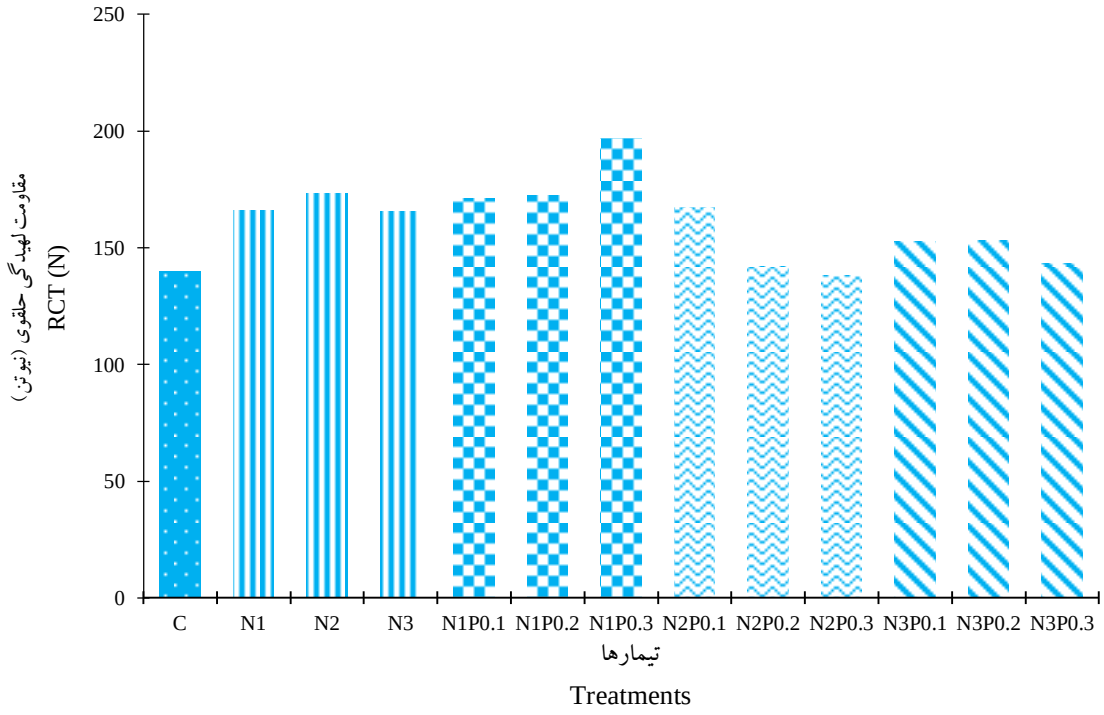
خمیر OCC دارای حداقل مقاومت به ترکیدن است که متأثر از طول کوتاه‌تر الیاف، انعطاف‌پذیری کم‌تر الیاف و پیوند ضعیف بین الیاف است. هر چه الیاف نازک‌تر یا انعطاف‌پذیرتر باشند به دلیل ایجاد اتصالات هیدروژنی بیش‌تر، پیوند بین الیاف افزایش یافته و در نتیجه مقاومت به ترکیدن نیز افزایش می‌یابد. با افزایش درصد استفاده از الیاف بلندتر مقاومت به ترکیدن افزایش می‌یابد (۱٤).

نتایج نشان می‌دهد که با افزایش سطح مصرف پلی‌اکریل‌آمید کاتیونی و پلی‌اکریل‌آمید کاتیونی، مقاومت به ترکیدن افزایش می‌یابد که درواقع افزودن پلی‌اکریل‌آمید کاتیونی به الیاف بازیافتی منجر به

احیای نقاط اتصال ازدست‌رفته در سطح این الیاف گردیده، قدرت اتصال بین این نوع الیاف را افزایش می‌دهد و درنهایت باعث افزایش این ویژگی مقاومتی کاغذ دست‌ساز می‌گردد. هم‌چنین افزودن پلی‌اکریل‌آمید کاتیونی باعث افزایش ثابتی در سطح نسبی پیوند می‌گردد. شواهد فوق با نتایج به‌دست‌آمده توسط Hubbe (۲۰۰۶)، Ekhtera و همکاران (۲۰۰۸) مطابقت دارد (۱۵، ۱۶).

افزایش درصد نانوالیاف لیگنوسلولزی منجر به ایجاد پیوند هیدروژنی بیش‌تر بین سطوح فیبر شد. به‌دلیل سطح ویژه زیاد در نانو الیاف سلولز و درهم‌تنیدگی‌های فیزیکی بین نانوالیاف لیگنوسلولزی و الیاف OCC، پیوند هیدروژن بین الیاف افزایش‌یافته است که باعث بهبود مقاومت شبکه فیبر تحت بارگذاری مکانیکی در ورق کاغذ می‌شود. این اثر توسط گزارش‌های قبلی تائید شده است (۱۷، ۱۸).

مقاومت به لهیدگی حلقوی: بیش‌ترین مقدار مقاومت به لهیدگی حلقوی مربوط به تیمار $N_1P_{./3}$ (۱ درصد نانوالیاف لیگنوسلولزی و ۰/۳ درصد پلی‌اکریل‌آمید کاتیونی) می‌باشد که مقدار آن برابر با ۱۹۷ نیوتن است، درحالی‌که کم‌ترین مقدار مقاومت به لهیدگی به تیمار C (شاهد) اختصاص دارد که مقدار آن برابر با ۱۳۹/۶ نیوتن می‌باشد (شکل ۹).



شکل ۹- مقادیر مقاومت به لهیدگی حلقوی در تیمارهای مختلف پلی‌اکریل‌آمید **کاتیونی (P) و نانو الیاف لیگنوسلولزی چوب پالونیا (N).**

Figure 9. Ring crush test properties of cationic polyacrylamide and nano wood treatments.

آزمون لهیدگی حلقوی به مقاومت به فشار و نیروی اعمال‌شده بر لبه مقوا مربوط می‌شود و تا حدود زیادی متناسب با مقاومت کنکورای لایه میانی (CMT) می‌باشد (۱۴).

شدت کاهش مقاومت به لهیدگی در حالت حلقه بر اثر وجود نانوالیاف لیگنوسلولزی - پلی‌اکریل‌آمید کاتیونی بیش‌تر از شدت افزایش این ویژگی بر اثر افزایش نانوالیاف لیگنوسلولزی- پلی‌اکریل‌آمید

کاتیونی است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود در سطح ۱/۵ درصد پلی‌اکریل‌آمید کاتیونی در کاغذهای ترکیبی بیش‌ترین مقدار مقاومت حاصل‌شده که در این سطح، بار مثبت پلی‌اکریل‌آمید نقش مؤثر و قوی خود را ایفا کرده و این ویژگی بهبود یافته است.

نتیجه‌گیری

در سال‌های اخیر تمایل به معرفی روش‌های با کم‌ترین تأثیرات زیست‌محیطی و درعین‌حال مؤثر برای تقویت ویژگی‌های مقاومتی الیاف بازیافتی افزایش‌یافته و معرفی نانو الیاف لیگنوسلولزی چوب پالونیا به‌عنوان یکی از این مواد دوستدار محیط‌زیست می‌تواند مسیرهای جدیدی را در این راه آغاز نماید. پلی‌اکریل‌آمید کاتیونی ماده کمک نگهدارنده‌ای است که با بار مثبت خود باعث بهبود پیوندیابی بین الیاف و احیای پیوندهای ازدست‌رفته می‌شوند و هم‌چنین نگهداری ذرات ریز نانو الیاف لیگنوسلولزی چوب پالونیا در ساختار خمیرکاغذ شده و در نتیجه باعث بهبود ویژگی‌های کاغذ ساخته‌شده می‌شوند. نکته قابل‌توجه این است که طبق نتایج حاصل مقدار مصرف کمک نگهدارنده‌ها نباید از حد بهینه مصرف خود بیش‌تر شود زیرا افزایش بیش‌ازاندازه از این مواد به دلیل برهم ریختن فرایند دلمه شدن و تشکیل توده‌هایی به‌ویژه بین الیاف، باعث برهم‌خوردن فاکتور شکل‌گیری در ورقه کاغذ شده و در نتیجه باعث افت کیفیت و ویژگی‌های کاغذ می‌گردد.

افزودن ترکیبی نانوالیاف لیگنوسلولزی به خمیر حاصل از کارتن کنگره‌ای کهنه باعث بهبود خواص مکانیکی آن از جمله مقاومت به عبور هوا، ترکیدن، پارگی، مقاومت به لهیدگی در حالت حلقه و کششی می‌شود. بااین‌حال به‌کار بردن هم‌زمان نانوالیاف لیگنوسلولزی و پلی‌اکریل‌آمید کاتیونی باعث افزایش قابل‌توجه خواص مقاومتی می‌شود. نتایج نشان می‌دهد افزودن هم‌زمان نانوالیاف لیگنوسلولزی- پلی‌اکریل‌آمید کاتیونی به خمیر حاصل از کارتن کنگره‌ای کهنه به دلیل بهبود پیوندها و هم‌چنین کاهش تخلخل ساختار کاغذ باعث افزایش مقاومت به عبور هوا و دانسیته می‌گردد. هم‌چنین بررسی نتایج نشان داد که اختلاف معنی‌داری با ۹۵ درصد اطمینان بین تیمارهای مختلف از لحاظ مقاومت‌های مکانیکی وجود دارد. طبق نتایج حاصل بیش‌ترین مقاومت‌ها در سامانه نانوالیاف لیگنوسلولزی- پلی‌اکریل‌آمید کاتیونی در میان تیمارهای مختلف درمجموع در نمونه‌های حاوی ۱ درصد نانو الیاف لیگنوسلولزی چوب پالونیا و ۰/۳ درصد پلی‌اکریل‌آمید کاتیونی مشاهده شد.

منابع

1. Rezayati Charani, P., and Moradian, M.H. 2019. Utilization of cellulose nanofibers and cationic polymers to improve breakinglength of paper. Cellulose Chemistry and Technology. 53: 7. 767-774.
2. Pourbaba, R., Izadyar, S., Hamzeh, Y., and Ashori, A. 2018. Effect of using cellulose nanofibers and cellulosic papermaking fines simultaneously on the properties of de-inked recycled pulp. Forest and Wood Products. 71: 3. 263-273.
3. Afra, E., Yousefi, H., Hadilam, M.M., and Nishino, T. 2013. Comparative effect of mechanical beating and nanofibrillation of cellulose on paper properties made from bagasse and softwood pulps, Carbohydrate Polymers. 97: 725-730.
4. Afra, E., Yousefi, H., and Aliniya Lakani, S. 2014. Properties of chemi-mechanical pulp filled with Nanofibrillated and Microcrystalline cellulose. J. of Biobased Materials and Bioenergy. 8: 1-6.
5. Afra, E., Mohammadnejad, S., and Saraeyan, A. 2016. Cellulose nanofibrils as coating material and its effects on paper. Progress in Organic Coating. 101: 455-460.

6.Wu, M.R., Paris, J., and van de Ven, T.G. 2007. Flocculation of papermaking fines by poly (ethylene oxide) and various cofactors: Effects of PEO entanglement, salt and fines properties. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 303: 3. 211-218.
7.Hubbe, M.A., Nanko, H., and McNeal, M.R. 2009. Retention aid polymer interactions with cellulosic surfaces and suspensions: A review. BioResources. 4: 2. 850-906.
8.Taherkhani, Z. 2021. Investigation of polyacrylamide polyelectrolytes performance in water purification. Iran Polymer Technology Research and Development. 6: 1. 39-50. (In Persian)
9.Xiong, B., Loss, R.D., Shields, D., Pawlik, T., Hochreiter, R., Zydney, A.L., and Kumar, M. 2018. Polyacrylamide degradation and its implications in environmental systems. NPJ Clean Water. 1: 1. 1-9.
10.Yang, K., Chen, J., Fu, Q., Dun, X., and Yao, C. 2020. Preparation of novel amphoteric polyacrylamide and its synergistic retention with cationic polymers. E-Polymers. 20: 1. 162-170.
11.Rezayati-Charani, P., Moradian, M.H., and Saadatnia, M.A. 2018. Sequence analysis using cellulose nanofibers, cationic starch and polyacrylamide in the paper tensile strength. J. of Wood and Forest Science and Technology. 25: 3. 73-86.
12.Yousefi, H., Azari, V., and Khazaeian, A. 2018. Direct mechanical production of wood nanofibers from raw wood microparticles with no chemical treatment. Industrial Crops & Products. 115: 26-31.
13.Moradian, M.H., Rezayati Charani, P., and Mousavi, S.F. 2020. Strengthening tensile strength of wet and dry layer of paper from chemical-mechanical pulp by cellulose nanofibers and PAE. Environmental Sciences Studies J. 5: 2. 2458-2465.
14.Afra, E. 2003. Properties of paper. Agricultural Sciences Press. 392p. (In Persian)
15.Hubbe, M.A. 2006. Bonding between cellulosic fibers in the absence and presence of dry-strength OD dry strength agents-a review. BioResources. 1: 2. 281-318.
16.Ekhtera, M.H., Rezayati Charani, P., Ramezani, O., and Azadfallah, M. 2008. Effects of poly-aluminum chloride, starch, alum, and rosin on the rosin sizing, strength, and microscopic appearance of paper prepared from old corrugated container (OCC) pulp. Bioresources Technology. 4: 2. 291-318.
17.Hassan, M.L., Bras, J., Mauret, E., Fadel, S.M., Hassan, E.A., and El-Wakil, N.A. 2015. Palm rachis microfibrillated cellulose and oxidized-microfibrillated cellulose for improving paper sheets properties of unbeaten softwood and bagasse pulps. J. Industrial Crops and Products. 64: 9-15.
18.Wiśniewska, M. 2018. Polyacrylamide (PAM). High performance polymers and their nanocomposites. Scrivener Publishing LLC. pp. 105-131.
19.Hadilam, M., Afra, E., and Yousefi, H. 2013. Effect of using nano cellulose fibers on bagas paper properties. J. of Wood and Forest Science and Technology. 66: 3. 351-366. (In Persian)
20.Yousefi, H., Faezipour, M., Hedhazi, S., Mazhari Mousavi, M., Azusa, Y., and Heidari, A.H. 2013. Comparative study of paper and nanopaper properties prepared from bacterial cellulose nanofibers and fibers/ground cellulose nanofibers of canola straw. J. Industrial Crops and Products. 43: 732-737.
21.Ghaderi, M., Mousavi, M., Yousefi, H., and Labbafi, M. 2014. All-cellulose nanocomposite film made from bagasse cellulose nanofibers for food packaging application. J. Carbohydrate polymers. 104: 59-65.