Applied Research in Chemical - Polymer Engineering

Vol. 5, No.1
page 3-15 ,spring 2021

Cationic PolyAcrylamide/Cellulose Nanofibril Polyelectrolytes Effects on Suspension and Network Properties of Packaging Recycled fibers

Hossein Pourkarim Dodangeh[1], Hossein Jalali Torshizi[2*], Hamidreza Rudi[3]

1. M.Sc. student, Dept. of Biorefinery Eng., Shahid Beheshti University, Iran.
2. Assist. Prof., Dept. of Biorefinery Eng., Shahid Beheshti University, Iran.
3. Assoc. Prof., Dept. of Biorefinery Eng., Shahid Beheshti University, Iran.

Abstract

Research Subject: Plant fibrous suspensions require electrostatically cationic polymers to provide proper and strong structures during papermaking. The charge bearing naturally and synthetically polymers (Polyelectrolytes), are considered as the most chemicals used in cellulosic products mills, due to improvement in the fibrous suspension and network properties.

Research Approach: Cationic acrylamide polymer (CPAM) and anionic nano cellulose (ANC) were added individually and in combination forms into the fibrous suspension recycled from brown packaging papers. After the fibrous suspension assays, laboratory handsheets were made and tested according to the TAPPI standards.

Main Results: Individually application of each CPAM and ANC increased the suspension retention (productivity) as %8 and %2, resp. Fibrous suspension freeness and loss materials content continuously increased and decreased up to %47, respectively that could provide significant technologically and economically benefits. Paper density (%5+), tensile (%17+) and burst (%27+) properties improved drastically compared to the blank. But, tear strength of fibrous network decreased (%4-) which could be attributed to the network higher fines contents and retention, originated from the acrylamide polyelectrolyte flocculation effect. Compared to the blank sample without any the polymeric additive, the polymeric contained suspensions and networks revealed improvements in fibrous suspension properties; i.e., retention, freeness and the solid materials loss during the network formation; and in the fibrous dried network, include density, tensile and burst strengths. Individually application of ANC also enhanced suspension retention, network density, tensile and burst strengths and declined network tear strength with lesser suspension freeness and loss. ANC post addition to CPAM contained suspension resulted in tear reduction, but higher suspension retention and freeness, together with higher density, tensile and burst strength of cellulosic network.

key words

Cationic Polyacrylamide

Cellulose Nanofibril

Fibrous suspension and network

*To whom correspondence should be addressed:
H_Jalali@sbu.ac.ir

[Downloaded from arcpe.modares.ac.ir on 2025-07-16]

پژوهش‌های کاربردی
مهندسی شیمی - پلیمر

فصلنامه علمی - پژوهشی بین رشته ای
سال چهارم، شماره ۴، نسخه ۱
بهار ۱۴۰۰ ، صفحه ۱۵-۳

تأثیر پلی‌الکترولیت‌های نانولیفچه سلولزی و پلی‌اکریل‌آمید کاتیونی بر تعلیقه و شبکه الیاف بازیافتی بسته‌بندی

حسین پورکریم دودانگه[۱]، حسین جلالی ترشیزی*[۲]، حمیدرضا رودی[۳]

۱. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی پالایش زیستی، دانشگاه شهید بهشتی.
۲. استادیار، گروه مهندسی پالایش زیستی، دانشگاه شهید بهشتی.
۳. دانشیار، گروه مهندسی پالایش زیستی، دانشگاه شهید بهشتی.

چکیده

موضوع تحقیق: تعلیقه‌های الیاف گیاهی به‌واسطه بار آنیونی نیازمند پلیمرهایی با بار الکترواستاتیکی کاتیونی برای تشکیل ساختاری مناسب و مستحکم هستند. تاجایی‌که پلیمرهای باردار (پلی‌الکترولیت) سنتزی و طبیعی جزء مواد پرکاربرد کارخانجات فراورده‌های سلولزی قلمداد و باعث بهبود ویژگی‌های تعلیقه و شبکه الیاف می‌شوند.
روش تحقیق: پلیمر کاتیونی اکریلامید (CPAM) و نانولیفچه سلولز آنیونی در چهار سطح صفر، ۰/۱، ۰/۱۵ و ۰/۲ درصد جرم خشک تعلیقه به‌صورت منفرد و تلفیقی به تعلیقه الیاف بازیافتی کاغذهای بسته‌بندی قهوه‌ای افزوده شد و پس از ارزیابی ویژگی‌های تعلیقه الیاف، کاغذ دست‌ساز آزمایشگاهی تهیه و براساس استانداردهای TAPPI مورد آزمون قرارگرفت.
نتایج اصلی: کاربرد منفرد پلی‌اکریلامید کاتیونی و نانولیفچه سلولز آنیونی به‌ترتیب تا ٪۸ و ٪۲ ماندگاری کل (بهره‌وری) را افزایش‌داد. روانی تعلیقه الیاف و میزان اتلاف مواد با افزایش کاربرد منفرد CPAM به‌طور پیوسته و به‌ترتیب تا ٪۴۷ افزایش و کاهش یافته که مزایای چشمگیر فنی و اقتصادی را به‌همراه دارد. چگالی (٪۵+) و مقاومت‌های کشش (٪ ۱۷+) و ترکیدن (٪ ۲۷+) کاغذ نیز بهبود چشمگیری را نسبت به نمونه شاهد نشان‌داد. با اینحال، مقاومت پارگی شبکه لیفی کاهش یافت (٪ ۴-) که به افزایش سهم ذرات ریز به‌واسطه نگه‌داشت بیش‌تر آن‌ها توسط پلی‌الکترولیت اکریلامیدی، مربوط می‌شود. افزودن نانولیفچه سلولزی پس از CPAM در سطوح ٪۰/۲ و ٪۰/۱۵ به تعلیقه الیاف، عمدتاً موجب بهبود مقاومت کششی کاغذ در مقایسه با کاربرد منفرد پلیمر کاتیونی شد. کاربرد توأم پلیمرهای CPAM و نانولیفچه سلولزی در مقاومت ترکیدن نیز بسته به تعامل نانوذره با پلیمر کاتیونی و تعلیقه الیاف، اثرات متفاوتی را برجای گذاشته است؛ به‌نحوی‌که در برخی از سطوح تلفیقی، نه تنها برتری زیادی نسبت به کاربرد منفرد پلیمر به‌همراه نداشته‌است، بلکه منجر به کاهش تأثیر بهبوددهندگی CPAM کاتیونی نیز شده است. نانولیفچه سلولزی در کاربرد منفرد منجر به افزایش ماندگاری تعلیقه، چگالی، شاخص‌های کشش و ترکیدن کاغذ، کاهش روانی و اتلاف مواد از خمیرکاغذ و نیز افت مقاومت پارگی شد. افزودن نانولیفچه سلولز پس از CPAM، منجر به افزایش ماندگاری (تا بیش از ٪۱۰) و روانی تعلیقه (حداقل ٪۲۰)، تراکم و مقاومت‌های کشش (تا ٪۲۰) و ترکیدن (تا ٪۵۰) و کاهش مقاومت پارگی (تا ٪۸) شد.

کلمات کلیدی

پلی‌اکریل‌آمیدکاتیونی

نانولیفچه سلولزی

تعلیقه و شبکه الیاف

*مسئول مکاتبات:
H_Jalali@sbu.ac.ir

[Downloaded from arcpe.modares.ac.ir on 2025-07-16]

مقدمه

کاغذ کامپوزیتی از پلیمرهای عمدتاً زیستی شامل سلولز، همی‌سلولزها و لیگنین است که سلولز به‌عنوان فراوان‌ترین زیست‌پلیمر، بیش‌ترین و مهم‌ترین سهم را در ویژگی‌های فراورده‌های لیگنوسلولزی برعهده دارد [۱]. زیست‌پلیمرهای مزبور به‌صورت آمیخته‌ای در دیواره الیاف انواع گیاهان، سالانه و به‌طور تجدیدپذیری تولید می‌شوند. کامپوزیت‌های کاغذی که به‌صورت صفحاتی پس از خارج‌ساختن آب از تعلیقه بسیار رقیق الیاف (غلظت ۱/۵-۰/۵٪) به‌دست می‌آیند، گستره کاربردی وسیعی در صنایع چاپ و نشر تا بسته‌بندی دارند [۱]. با این حال، تولید کارآمد و متناسب با الزامات فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی، کاربرد افزودنی‌های معدنی و آلی را در فرایند تولید اجتناب‌ناپذیر ساخته‌است [۲]. چراکه، نگهداشت الیاف و نرمه‌های لیفی بر توری آبگیرنده ماشین کاغذسازی، به‌طور مکانیکی به‌میزان حداقل بوده و سازوکارهایی شیمیایی برای لخته‌سازی اجزا مورد نیاز است که پلیمرهای بلندزنجیره متنوعی بدین منظور کاربرد دارند [۳ و ۴]. با توجه به پتانسیل زتای آنیونی تعلیقه الیاف، پلیمرهای غالباً کاتیونی همچون پل و رابطی موجب اتصال اجزای تعلیقه به یکدیگر شده و علاوه بر غلبه بر دافعه الکترواستاتیک الیاف آنیونی، پیوندهای محکمی را بین اجزا برقرارکرده که ضمن لخته‌شدگی، لخته‌سازی و بزرگ‌شدن تجمعی اجزا (شکل ۱)، مانع از خروج اجزا به‌همراه آب از منافذ توری می‌شوند [۴]. عدم اتلاف مواد زیستی لیفی و در عوض تبدیل شدن به فراورده کاغذی، علاوه بر مزایای اقتصادی و فنی، از برتری زیست‌محیطی نیز برخوردارست. چراکه مواد زیست‌تخریب‌پذیر لیفی وارد پساب و طبیعت نمی‌شوند و نیاز به مواد اولیه لیفی وابسته به جنگل و دیگر منابع زیست توده نیز کاهش می‌یابد [۲ و ۵]. همچنین آلودگی آب‌های فرایندی نیز به‌طور چشمگیری کاهش یافته و نیاز به آب تازه برای فرایند پرمصرف کاغذسازی کاهش می‌یابد [۲ و ۵]. الیاف بازیافتی حاصل از کاغذهای باطله، به‌واسطه گذراندن مراحل متعدد فرایندی و نیز دریافت افزودنی‌های مختلف در حین مراحل پیشین تولید و مصرف، از پتانسیل زتای آنیونی بیش‌تری برخوردار هستند که تعامل آن‌ها با پلیمرهای کاتیونی را پیچیده‌تر از الیاف بکر می‌سازد [۲-۷]. پیشرفت‌های اخیر بر کاربرد میکرو/نانومواد آنیونی به‌همراه پلیمرهای کاتیونی بلندزنجیره تحت عنوان سازوکار لخته‌سازی همتافت (Complex Flocculation) متمرکز است [۸] که منجر به بهبود ویژگی‌های فرایندی و فراورده‌ای می‌شود (شکل ۱). علاوه بر میکرو/نانوسیلیکا به‌عنوان ذره غالب، نانوذرات عمدتاً معدنی دیگری همچون نانوبنتونیت و نانوکربنات کلسیم نیز مورد توجه هستند [۹]. تاجایی‌که صنایع کاغذسازی از جمله صنایع پرمصرف نانومواد معرفی و انواع نانوذرات معدنی در سامانه‌های کمک ماندگاری-کمک آب‌گیری به‌همراه پلیمرهای کاتیونی، کاربرد گسترده‌ای پیدا کرده‌اند [۱۰ و ۱۱]. با این‌حال، گرایش به نانومواد آلی به‌ویژه نانولیفچه سلولز در تولید و بهبود فراورده‌ها به‌ویژه کامپوزیت‌های زیستی، روزافزون است [۸، ۳ و ۱۲]. نانولیفچه سلولز به‌واسطه طبیعت آنیونی و نیز سطح ویژه زیاد، تأثیرات مثبتی را در ترکیب با پلیمرهای زیستی نشاسته [۸] و نیز کایتوزان [۱۲] در تعلیقه‌های الیافی نشان داده است. نگرانی‌های اخیر مربوط به معضل آب و مشکل قدیمی تأمین مواد لیفی با حفظ منابع محدود جنگلی کشور، ارائه فنون کاربردی را برای صنایع استراتژیک کاغذسازی الزامی ساخته است. بنابراین و به‌واسطه رواج و غلبه بازیافت کاغذهای بسته‌بندی در جهان و نیز ایران [۲ و ۱۳]، در این پژوهش تأثیر لخته‌سازی همتافت تعلیقه کلوئیدی الیاف سلولزی بازیافتی از کارتن‌های باطله «Old Corrugated Container (OCC)» توسط پلی اکریلامید کاتیونی و نانولیفچه سلولز مورد بررسی قرارگرفت. امروزه تمایلات علمی و صنعتی گسترده و روزافزونی به کاربردهای نانولیفچه سلولزی معطوف گشته که مزایایی همچون دسترس‌پذیری بالا به‌عنوان ماده‌ای تجدیدپذیر، مقاومت مکانیکی بالا، سطح ویژه و نسبت ظاهری بالا، زیست‌تخریب‌پذیری و زیست‌سازگاری برای آن قابل ذکر است و دامنه وسیع کاربردهایی همچون صنایع غذائی، داروئی، رنگ و پوشش، آرایشی، گِل‌های حفاری، فراورده‌های جاذب و بهداشتی و نانوکامپوزیت‌ها را دربر می‌گیرد [۸ و ۱۴-۱۶].

تجربی

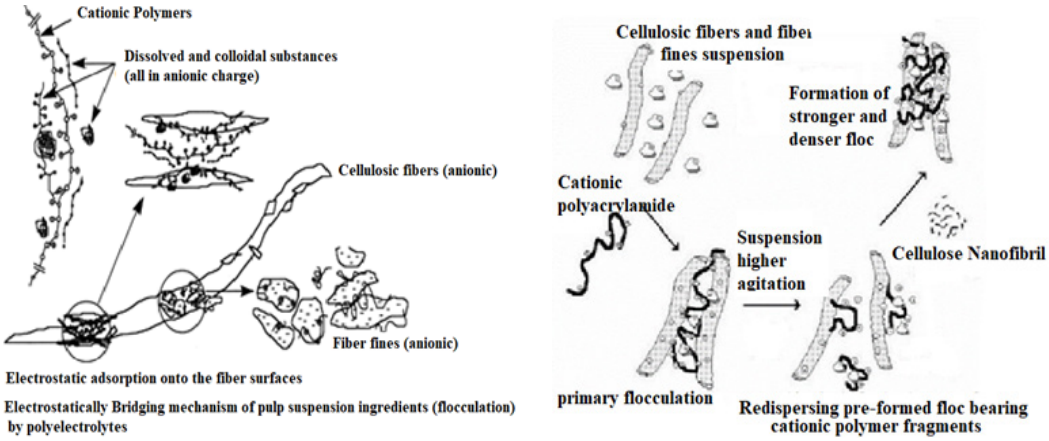
تعلیقه الیاف از کارخانه پارس کاغذ نکا تهیه شد که از بازیافت کارتن‌های قهوه‌ای بسته‌بندی و فاقد هرگونه ماده افزودنی و پس از تمیزسازی مکانیکی تعلیقه، برای حذف ذرات جامد و ناخالصی به‌دست می‌آید. درجه روانی استاندارد کانادائی «Canadian Standard Freeness (CSF)» تعلیقه (mL) ۳۲۰-۳۵۰، pH ~ ۸ و دمای ۱۶ °C برای تهیه کاغذهای دست‌ساز آزمایشگاهی تنظیم شد. نانولیفچه سلولز از نوع نانولیفچه سلولز «Nano Fibrillated Cellulose (NFC)» و تهیه‌شده به روش مکانیکی از الیاف رنگبری‌شده کرافت سوزنی‌برگ، از شرکت دانش بنیان نانونوین پلیمر (پارک علم و فناوری مازندران) و به‌صورت ژل سفیدرنگ با درصد خشکی ۳/۵، متوسط قطر الیاف ۳۵ نانومتر، درصد خلوص ≥ ۹۹٪ خریداری و پس از رقیق‌سازی تا درصد خشکی ۰/۱٪ مورد استفاده قرارگرفت. پلی‌اکریل‌آمیدکاتیونی مورد استفاده به شکل محلول در آب با وزن مولکولی ۲۵۰،۰۰۰ دالتون از شرکت چوب وکاغذ مازندران (محصول شرکت Degussa

[Downloaded from arcpe.modares.ac.ir on 2025-07-16]

آلمان) تهیه که ترکیبات آن، کوپلیمری از اکریل‌آمید و مشتق کاتیونی اسیداکریلیک است. پلیمر کاتیونی مزبور با درصدخشکی ۰/۱٪ استفاده‌شد و از آنجایی که برای کسب بهترین نتیجه، پس از افزودن به تعلیقه الیاف در حال چرخش بایستی اغتشاش و تلاطم (Turbulence) بیش‌تری اعمال شود تا لخته‌سازی به‌طور بهینه صورت گیرد [۱، ۵-۳، ۸، ۱۲]، شدت دوران تعلیقه (۵۰۰ دور بر دقیقه) پس از ۱۰-۵ ثانیه، به درجه ۸۰۰ دور در دقیقه افزایش یافت. پس از کاهش شدت چرخش تعلیقه به حدود ۵۰۰ دور بر دقیقه، نانوذره سلولزی اضافه شد. در نهایت و بلافاصله تعلیقه مزبور به دستگاه ساخت کاغذ آزمایشگاهی منتقل و براساس استاندارد TAPPI به‌شماره T ۲۰۵ sp -۰۲ نمونه آزمونی تهیه شد. در این پژوهش، اندازه‌گیری تمامی ویژگی‌ها منطبق بر استانداردهای آئین‌نامه TAPPI انجام گرفت و شامل میزان ماندگاری در آزمونگر زهکشی دینامیکی DDJ (Dynamic Drainage Jar) (T ۲۶۱ cm -۰۰) و درجه روانی CSF (T ۲۲۷ om-۰۴)، شاخص‌های مقاومت به کشش (T ۴۹۴ om -۰۱)، ترکیدن (T ۴۰۳ om -۰۲)، پاره‌شدن (T ۴۱۴ om -۰۴)، جرم واحد سطح (گرماژ) (T ۴۱۰ om -۰۲) و ضخامت کاغذ (T ۴۱۱ om -۰۵) انجام پذیرفته و از تقسیم گرماژ بر ضخامت اندازه‌گیری‌شده کاغذ، چگالی محاسبه شد. درصد ماندگاری کل در ماشین کاغذساز آزمایشگاهی نیز از نسبت بین جرم خشک کاغذ تولیدی به جرم خشک کل تعلیقه مواد لیفی و افزودنی محاسبه شد. لازم به ذکرست که نانولیفچه سلولز در چهار سطح صفر (شاهد)، ۰/۱، ۰/۱۵ و ۰/۲درصد براساس وزن خشک تعلیقه الیاف مصرفی به‌صورت منفرد و نیز به‌همراه پلیمر اکریلامید کاتیونی مورد ارزیابی قرارگرفت. پلی‌اکریلامید کاتیونی نیز در چهار سطح صفر (شاهد)، ۰/۱ و ۰/۱۵ و۰/۲ درصد براساس وزن خشک تعلیقه الیاف به‌صورت منفرد و نیز به‌همراه نانولیفچه سلولز استفاده شد.

نتایج و بحث

در شکل‌های ۲ تا ۷، نتایج کاربرد پلی‌اکریل‌آمید کاتیونی و نانولیفچه سلولزی در سطوح مورد مطالعه به صورت منفرد و نیز توأم با یکدیگر در تعلیقه الیاف سلولزی ارائه شده است. نمونه شاهد نیز در سطح مصرف صفر پلی‌اکریل‌آمید کاتیونی و خط روند صفر NFC نمایان شده است. بررسی روند تغییرات به وجود آمده، حاکی از تأثیرگذاری پلیمرهای مورد مطالعه در هر دو حالت کاربرد منفرد و توأم، بر ویژگی‌های تعلیقه الیاف و نیز شبکه کاغذی حاصل از آن است. مراحل و سازوکار عمل در نمونه‌های تلفیقی حاصل از کاربرد هم‌زمان پلی‌اکریل‌آمید کاتیونی و نانولیفچه سلولزی در شکل ۱ آمده است.

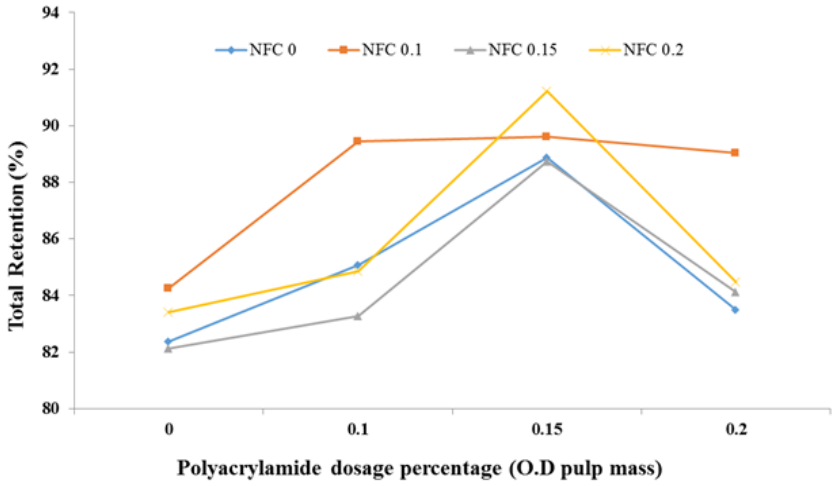


شکل ۱ سازوکار عمل پلی الکترولیت ها در تعلیقه الیاف: روش همتافت (راست) و روش پل زنی (چپ) [۴]

Fig. 1 Polyelectrolytes mechanisms in fibrous suspension: Bridging approach (left) and complex approach (right) [4]

ماندگاری کل تعلیقه: برای اندازه‌گیری و رصد میزان حفظ اجزای لیفی و غیرلیفی تعلیقه و تبدیل آن‌ها به‌صورت شبکه کاغذی و به‌عبارتی بهره‌وری تولید، از ویژگی ماندگاری کل استفاده می‌شود. بنابراین ماندگاری کل، معیاری از میزان کل مواد جامد باقی‌مانده شامل الیاف، نرمه‌های الیاف و مواد افزودنی در شبکه نهایی کاغذ نسبت به وزن خشک مواد اولیه موجود در تعلیقه کاغذسازی است [۱۷]. همانگونه که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، درصد ماندگاری کل با افزایش میزان کاربرد منفرد CPAM تا سطح مشخصی (٪ ۰/۱۵) ارتقا یافته و از ۸۲/۴٪ به ۸۸/۹٪ افزایش یافته که حدود ۸٪ بهبود ماندگاری و بهره‌وری تولید را سبب شده است. بروز جاذبه الکترواستاتیکی بین الیاف آنیونی و پلیمر کاتیونی منجر به جذب پلیمر بر سطوح الیاف شده و همانند پلی منجر به تشکیل لخته‌هایی از اجزای سلولزی واجد گذر از منافذ توری گشته و اجزا را به صورت لخته‌هایی بزرگ‌شده بر روی توری نگه می‌دارد (شکل ۱). بهبود ماندگاری علاوه بر ارتقای بهره‌وری تولید و درآمد، نگرانی‌های زیست‌محیطی ناشی از عدم حفظ مواد

[Downloaded from arcpe.modares.ac.ir on 2025-07-16]



شکل ۲ تأثیر پلی‌اکریل‌آمید کاتیونی بر ماندگاری کل تعلیقه الیاف بازیافتی در حضور و عدم حضور نانولیفچه سلولزی

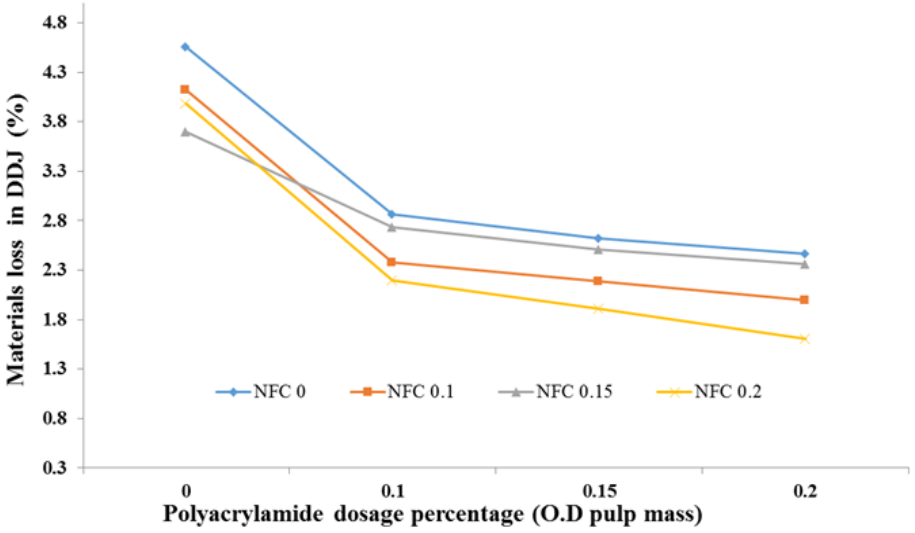
Fig. 2 Effect of cationic Polyacrylamide on total retention of recycled fiber suspension in absence and presence of cellulose nano fibrils

زیستی و ورود آن‌ها به محیط زیست را کاهش داده و هزینه‌های تصفیه پساب و آب‌های فرایندی را نیز تقلیل می‌دهد [۱۲، ۱۷]. کاربرد منفرد نانولیفچه سلولز نیز افزایش ماندگاری را دربر داشته‌است. نانولیفچه سلولز همانند الیاف سلولزی، سرشار از گروه‌های عاملی هیدروکسیلی بوده و با قرارگیری در فضای ماتریس الیاف، افزایش اتصال و پیوندپذیری هیدروژنی بین اجزای سلولزی تعلیقه و نیز تراکم و ماندگاری الیاف و نرمه‌ها را به وجود می‌آورد. در نمونه‌های تلفیقی، CPAM کاتیونی و نانولیفچه سلولزی، ماندگاری در میزان کاربرد ۰/۱٪ نانولیفچه سلولز از تأثیر مثبتی در تمامی سطوح حضور CPAM برخوردار بوده است. نامتعادل‌شدن تعلیقه به واسطه کاربرد بیش از اندازه افزودنی‌ها، تخریب شکل‌گیری و ماندگاری را سبب می‌شود که لازم است متناسب با شرایط هر نوع تعلیقه لیفی و فرایند تولید، حد بهینه کاربرد افزودنی‌ها بر عملکرد مشخص شود [۴، ۵، ۱۲، ۱۷]. به‌نحوی‌که کاربرد بیش‌ترین سطح مورد مطالعه از پلیمر کاتیونی (٪ ۰/۲)، به واسطه جاذبه شدید الکترواستاتیکی بین پلیمر و الیاف و ذرات آنیونی سلولزی منجر به افت شدید ماندگاری به واسطه تخریب لخته‌سازی اجزا، هم در کاربرد منفرد و نیز توأم با نانولیفچه سلولز شد. با این حال در مقایسه با نمونه شاهد فاقد افزودنی، تمامی تلفیق‌های CPAM/نانولیفچه سلولز، بهبود ماندگاری را به‌همراه داشته است، ولی شدت تغییرات متفاوت مشاهده شد.

درصد اتلاف مواد در آزمونگر DDJ: دستگاه زهکشی دینامیکی (DDJ) ابزاری ارزشمند برای رصد میزان مواد عبوریافته (اتلاف مواد) است. چراکه دستیابی به میزان اتلاف مواد در ماشین کاغذ آزمایشگاهی به‌راحتی میسر نیست. همان‌گونه که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، کاربرد منفرد پلیمر کاتیونی CPAM به‌طور چشمگیر و معنی‌داری، میزان مواد عبوریافته از توری دستگاه DDJ را کاهش‌داده که متناسب با نتایج ماندگاری بوده و استدلال‌های ارائه‌شده در آن بخش نیز قابل تعمیم است. بیشترین کاهش در عبور و اتلاف مواد در بالاترین سطح کاربرد CPAM (٪ ۰/۲) رخ داده‌است. کاربرد منفرد نانوالیاف نیز از درصد عبور و اتلاف مواد کاسته و کاربرد توأمان دو پلیمر مورد مطالعه در غالب موارد روندی را همانند ویژگی ماندگاری رصدشده در ماشین کاغذساز آزمایشگاهی رقم‌زده که در قالب کاهش اتلاف مواد قابل گزارش است. مهم‌ترین اختلاف نتایج ماندگاری کل با آزمونگر زهکش دینامیکی در بالاترین سطح کاربرد نانولیفچه سلولز (٪ ۰/۲) است که در زهکش دینامیکی نشان‌دهنده افزایش ماندگاری و لیکن در ویژگی ماندگاری بیانگر کاهش ماندگاری در مقایسه با سطح کاربرد (٪ ۰/۱۵) نانولیفچه سلولز است. دلیل احتمالی این تفاوت، جرم به‌مراتب بیشتر الیاف و نرمه‌های سلولزی در کاغذساز آزمایشگاهی و تخریب شکل-گیری ناشی از افزایش میزان نانوذرات آنیونی سلولزی، خواه در حضور یا عدم حضور پلیمر کاتیونی می‌تواند باشد. افزودن نانوالیاف پس از CPAM نیز بر ماندگاری در DDJ و کاهش اتلاف مواد، تأثیر مثبتی داشته که روند تغییرات آن همانند سامانه لخته‌سازی همتافت گزارش می‌شود.

درجه روانی خمیرکاغذ: آبگیری در ماشین کاغذ سوای از ماهیت الیاف، به‌میزان زیادی تحت تأثیر شدت و ساختار لخته‌های (Flocs) تشکیل‌شده از اجزای تعلیقه و نیز سازوکار شیمیایی به‌کاررفته در تعلیقه الیاف است. افزایش توانایی آبگیری از تعلیقه الیاف واجد غلظت حدودی ۱٪ (به‌عبارتی میزان آب ۹۹٪)، مزایای بسیاری برای صنعت کاغذسازی به‌همراه دارد؛ چراکه امکان افزایش سرعت ماشین، افزایش تولید، کاهش مصرف انرژی در جعبه‌های مکشی، پرس‌ها و خشک‌کن‌ها و

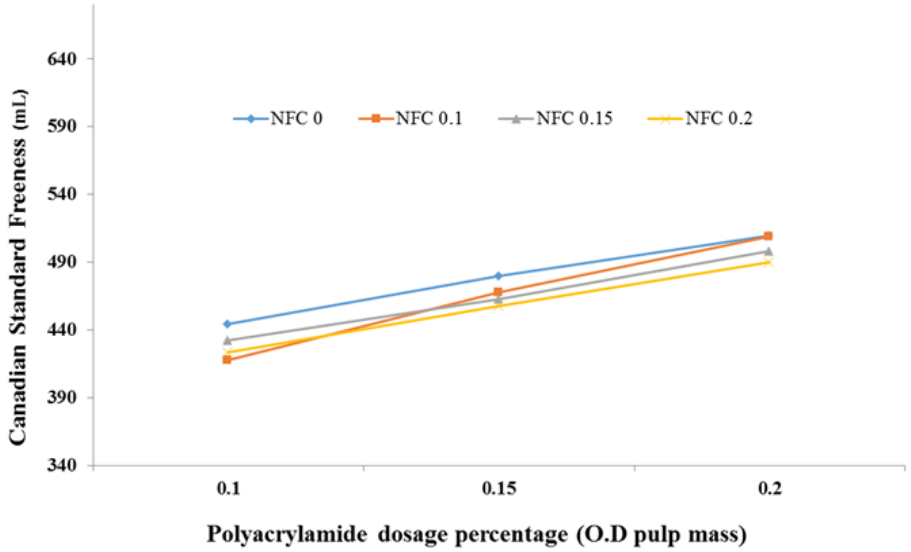
[Downloaded from arcpe.modares.ac.ir on 2025-07-16]



شکل ۳ تأثیر پلی‌اکریل‌آمید کاتیونی بر عبور (اتلاف) تعلیقه الیاف بازیافتی از توری دستگاه DDJ در حضور و عدم حضور نانولیفچه سلولزی

Fig. 3 Effect of cationic Polyacrylamide on recycled fiber suspension passing (loss) through DDJ wire in absence and presence of cellulose nano fibrils

به‌طور کلی کاهش هزینه‌های تولید و افزایش بهره‌وری را فراهم می‌آورد [۴، ۱۲، ۱۷]. تأثیر اعمال سامانه‌های منفرد و ترکیبی مورد مطالعه بر آبگیری از تعلیقه الیاف بازیافتی، در شکل ۴ آمده که به‌منظور ارائه بهینه و واضح نتایج و باتوجه به دامنه گسترده تأثیرات ایجادشده، به نمونه‌های شاهد و حاوی نانوالیاف منفرد در شکل مزبور پرداخته نشد. کاربرد منفرد CPAM افزایش درجه روانی خمیرکاغذ از ۳۵۰ میلی‌لیتر در نمونه شاهد و فاقد هرگونه افزودنی به ۴۴۵ میلی‌لیتر در پائین‌ترین سطح کاربرد آن (٪ ۰/۱) که حدود ۳۰ درصد است را سبب شده است. افزایش میزان کاربرد پلی اکریل‌امید کاتیونی نیز به‌طور پیوسته و معنی‌داری تقویت توان آب‌گیری سامانه را موجب شد. تفسیر تشکیل لخته بین اجزای دوغاب و کاهش مساحت تماس بین سطوح آب‌دوست اجزا (شکل ۱)، که ماندگاری بالاتر، بهبود شکل‌گیری و مقاومت‌ها را نیز سبب می‌شود، توسط جدایش آسان‌تر آب از تعلیقه و افزایش درجه روانی، قابل تأیید و تعمیم است. شایان گفتن است که بیش‌ترین میزان بهبود ایجادشده در آب-گیری، در بالاترین سطح کاربرد (٪ ۰/۲) CPAM مشاهده می‌شود که با نتایج هادیلام و همکاران (۲۰۱۳) ، سو (۲۰۱۳) و جلالی ترشیزی و همکاران (۲۰۱۴) مطابقت دارد. کاربرد منفرد نانوالیاف منجر به کاهش درجه روانی خمیرکاغذ به سطح حدودی ۳۲۵ میلی‌لیتر شده و تفاوتی نیز بین سطوح مختلف کاربرد نانوالیاف مشاهده نشد. رفتار ژله‌ای، قابلیت جذب و نگه‌داری بالای آب، بالابردن گرانروی تعلیقه و همچنین قرارگیری نانوالیاف در حفرات شبکه الیاف سبب کاهش پیوستگی بین حفرات و کاهش درجه روانی در عدم حضور پلیمر کاتیونی می‌شود [۸].



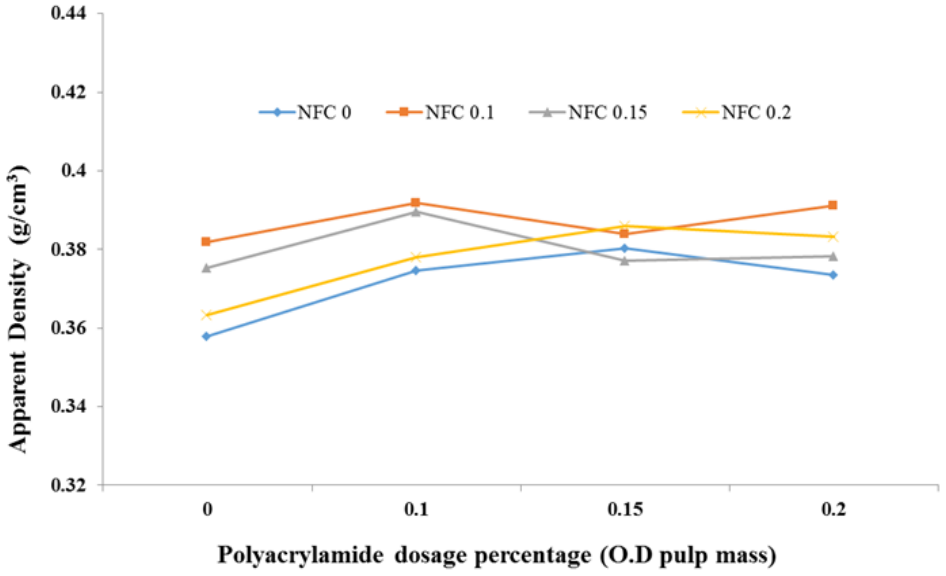
شکل ۴ تأثیر پلی‌اکریل‌آمید کاتیونی بر درجه روانی (CSF) تعلیقه الیاف بازیافتی در حضور و عدم حضور نانولیفچه سلولزی

Fig. 4 Effect of cationic Polyacrylamide on CSF freeness of recycled fiber suspension in absence and presence of cellulose nano fibrils

[Downloaded from arcpe.modares.ac.ir on 2025-07-16]

همچنین احتمال گرفتگی کلی یا جزئی منافذ توری نیز در این شرایط قابل گزارش است [۸، ۱۷]. نکته جالب و دور از انتظار، کاهش معنی‌دار درجه روانی خمیرکاغذ بازیافتی، در سامانه همتافت CPAM/نانولیفچه سلولز در مقایسه با سامانه پل‌زنی CPAM (شکل ۱، لخته‌سازی اولیه) است که می‌توان به محبوس شدن مولکول‌های آب در ساختا لخته فشرده‌شده و متراکم سامانه همتافت (پس از افزودن نانولیفچه سلولز) در مقایسه با زهکشی و عبور آسان‌تر مولکول‌های اب در حالت لخته‌سازی اولیه (پل‌زنی) نسبت داد.

چگالی ظاهری کاغذ: چگالی از جمله مهم‌ترین ویژگی‌های کاغذ به‌ویژه در کاربردهای بسته‌بندی محسوب می‌شود. تراکم کاغذ بر ویژگی‌های مدول کشسانی، مقاومت کششی و فشاری کاغذ تأثیرگذار بوده و در شبکه متراکم و با چگالی بالای کاغذ، پیچ‌خوردگی و تابیدگی الیاف کم‌تر بروز یافته و مقاومت کاغذ را در برابر تنش‌های خمشی نیز ارتقا می‌دهد [۱۲، ۱۷]. البته در مورد کاغذهای بسته‌بندی، چگالی بسیار بالا، نامناسب تلقی می‌شود، چراکه منجر به کاهش سفتی خمشی گشته و در فرایندهای تبدیلی کنگره‌سازی نیز منجر به پارگی در هنگام خیس‌شدن می‌شود [۱۸]. چگالی کاغذ با پالایش و نیز افزودن مواد شیمیایی افزایش می‌یابد که از جنبه‌های مختلف، مواد شیمیایی از برتری برخوردارند [۱۳]. همچنین افزایش ماندگاری اجزای تعلیقه الیاف، به‌ویژه نرمه‌های الیاف منجر به افزایش چگالی کاغذ تولیدی می‌شود [۸، ۱۲، ۱۷، ۱۸]. شایان گفتن است که افزایش چگالی در ورقه در حال شکل‌گیری کاغذ، به انتقال مطلوب‌تر و بهینه حرارت در خشک‌کن نیز کمک می‌کند [۴، ۵]. همان‌گونه که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، حضور منفرد پلیمر CPAM ارتقای معنی‌دار چگالی ظاهری را درپی داشته و افزایش میزان کاربرد آن هیچ‌گونه تأثیر معنی‌داری بر چگالی نداشته است. کاربرد منفرد نانوالیاف نیز ارتقای چگالی را به‌همراه داشته، لیکن افزایش مصرف آن از میزان چگالی کاسته و کاغذی حجیم‌تر را ارائه کرده که با داده‌های ماندگاری سازگار است. چراکه در روند مشابه، کاغذهای حاوی سطوح بالاتر کاربرد منفرد نانوالیاف، از میزان ماندگاری کم‌تری برخوردار گشته‌اند. افزودن نانولیفچه سلولزی پس از CPAM در سامانه همتافت، غالباً افزایش تراکم و چگالی کاغذ را به‌همراه داشته که علاوه بر افزایش ماندگاری اجزا، از تراکم و نزدیکی بیش‌تر اجزا نیز نشأت می‌گیرد (شکل ۱). بهترین نتایج چگالی، در پائین‌ترین سطح کاربرد نانوالیاف (پس از افزودن CPAM و هم‌زدن) به‌دست آمده که حاکی از تعدد تشکیل لخته‌های کوچک به‌جای لخته‌های بیش از اندازه بزرگی است (کاربرد منفرد CPAM) که افزایش ضخامت را سبب می‌شود. پلی‌اکریل‌آمید به دلیل داشتن بار مثبت باعث جذب بیشتر نرمه‌ها شده و با افزایش ماندگاری آن‌ها و پرشدن فواصل بین الیاف، منجر به افزایش جرم در واحد سطح، کاهش ضخامت و در نهایت افزایش چگالی ظاهری می‌شود که حضور سطح بهینه نانوالیاف آنیونی، به این نقش کمک می‌کند.



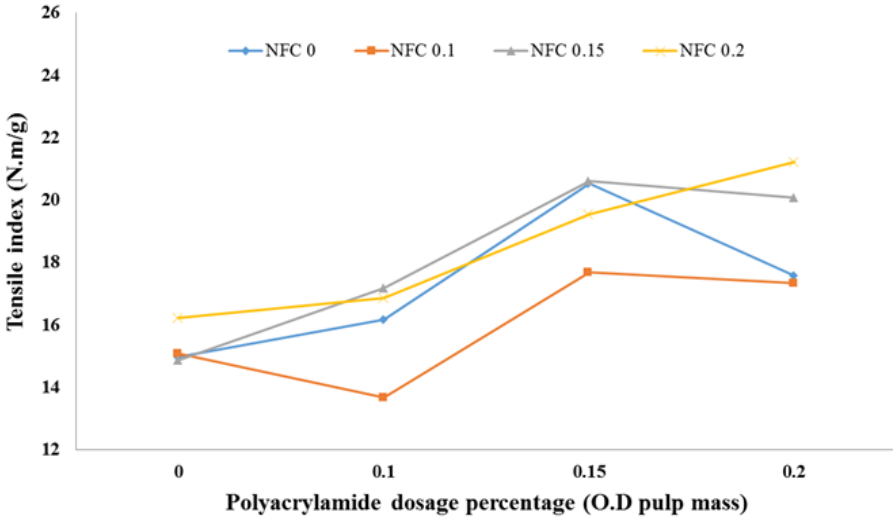
شکل ۵ تأثیر پلی‌اکریل‌آمید کاتیونی بر تراکم کاغذ بازیافتی در حضور و عدم حضور نانولیفچه سلولزی

Fig. 5 Effect of cationic Polyacrylamide on apparent density of recycled paper in absence and presence of cellulose nano fibrils

مقاومت به کشش: مقاومت به کشش از مهم‌ترین ویژگی‌های کاربردی انواع کاغذ و مقواست که تحت تأثیر عواملی از جمله مقاومت ذاتی الیاف، مقاومت پیوند بین الیاف، تعداد پیوند (سطح پیوندیافته) و کیفیت توزیع اجزا و شکل‌گیری کاغذ است [۱۰-۱۲]. از بین عوامل فوق، نوع و میزان افزودنی‌های پایانه تَر

[Downloaded from arcpe.modares.ac.ir on 2025-07-16]

کاغذسازی بر نحوه توزیع اجزای دوغاب خمیرکاغذ و درپی آن شکل‌گیری کاغذ، تعداد و مقاومت پیوندها تأثیرگذار است که به واسطه نقش این مواد در تشکیل لخته‌ها، آبگیری و پیوندیابی شناخته می‌شود [۳، ۴]. افزودن CPAM و افزایش درصد کاربرد آن در خمیرکاغذ بازیافتی تا سطح کاربرد ٪ ۰/۱۵ منجر به ارتقای ویژگی مقاومت به کشش کاغذ بازیافتی شده است که میزان بهبود حاصله در سطح مزبور، تا حدود ۴۰ درصد بوده است. CPAM به‌عنوان پلیمری زنجیره بلند و با چگالی بار کاتیونی، با اتصال بر سطوح الیاف و برقراری پل بین اجزای دوغاب خمیرکاغذ، موجبات شکل‌گیری و ماندگاری مناسب را فراهم آورده، تراکم، نزدیکی و بهبود کیفیت پیوندها و در نهایت بهبود مقاومت کششی را موجب می‌شود. با این‌حال کاربرد بیش از حد نیاز CPAM (۰/۲)، منجر به لخته‌شدگی شدید اجزا، تشکیل لخته‌هایی بزرگ و تخریب شکل‌گیری می‌شود که سبب کاهش مقاومت نسبت به سطح کاربرد کم‌تر CPAM شده است. همچنین شایان گفتن است که کاربرد منفرد نانولیفچه سلولز در سطح ۰/۲ درصد نیز حدود ٪۱۰ افزایش مقاومتی را به‌همراه داشته‌است. نانو الیاف سلولزی به‌دلیل سطح ویژه بالا و ایجاد درگیری فیزیکی با الیاف خمیرکاغذ، سبب افزایش تعداد پیوند هیدروژنی و افزایش سطح پیوند بین الیاف و در نتیجه استحکام بالاتر شبکه الیاف می‌شود. حسن و همکاران (۲۰۱۱) نیز با کاربرد میکرو الیاف سلولزی در خمیرکاغذ باگاس، بهبود مقاومت خشک و تَر کششی و کاهش مقاومت پارگی را گزارش کردند [۱۹]. هادیلام و همکاران (۱۳۹۲) نیز با افزودن ۲۰ درصد نانولیفچه سلولز به خمیرکاغذ باگاس، شاهد افزایش مقاومت کششی بوده‌اند [۲۰]. در سایر سطوح پائین‌تر افزودن منفرد نانوالیاف، تأثیر ملموسی بر شاخص کشش مشاهده نشد، افزودن سطوح مختلف نانولیفچه سلولز، بسته به سطح کاربرد CPAM تأثیرات متفاوتی بر شاخص مقاومت به کشش داشته است. به‌طوری‌که در سطح ٪۰/۱ افزودن نانولیفچه سلولز، مقاومت در همه سطوح استفاده از پلیمر کاتیونی نسبت به کاربرد منفرد CPAM کاهش یافته است. به‌طور کلی نوسانات مقاومتی حاکی و ناشی از چگونگی تعادل بار خالص تعلیقه در سطوح مختلف کاربرد نانولیفچه سلولز و CPAM است، که با توجه به مقادیر ماندگاری اجزای عمدتاً غیرلیفی و نیز درنظر داشتن ماهیت تعلیقه الیاف بازیافتی از کارتن‌های بسته‌بندی قهوه‌ای، که واجد آشغال‌های آنیونی فراوان و مزاحم پیوندیابی هستند، قابل درک است. لیکن افزودن نانولیفچه سلولزی پس از CPAM در سطوح ٪ ۰/۲ و ٪۰/۱۵ به تعلیقه الیاف، عمدتاً موجب بهبود شاخص کششی کاغذ در مقایسه با کاربرد منفرد پلیمر کاتیونی شده است. به‌عبارتی دیگر در مقایسه با نمونه شاهد فاقد هرگونه افزودنی، تلفیق پلیمرهای زیستی نانولیفچه سلولز و سنتزی پلی اکریلامید منجر به افزایش چشمگیر و معنی‌دار شاخص کشش شده است، لیکن می‌توان بهبود ایجادشده را عمدتاً به نقش CPAM معطوف داشت. بهبودهای ایجادشده ناشی از ایجاد سامانه همتافتی از نانوذره آنیونی و پلیمر کاتیونی است که با تشکیل لخته‌های ریز و مستحکم‌تر، توزیع شبکه الیافی بهتر و قوی‌تر را موجب شد. این نتایج با پژوهش‌های حسن و همکاران (۲۰۱۵) [۱۹]، سو و همکاران (۲۰۱۳) [۲۱] و نیز هادیلام و همکاران (۲۰۱۳) [۲۰] مطابقت دارد.

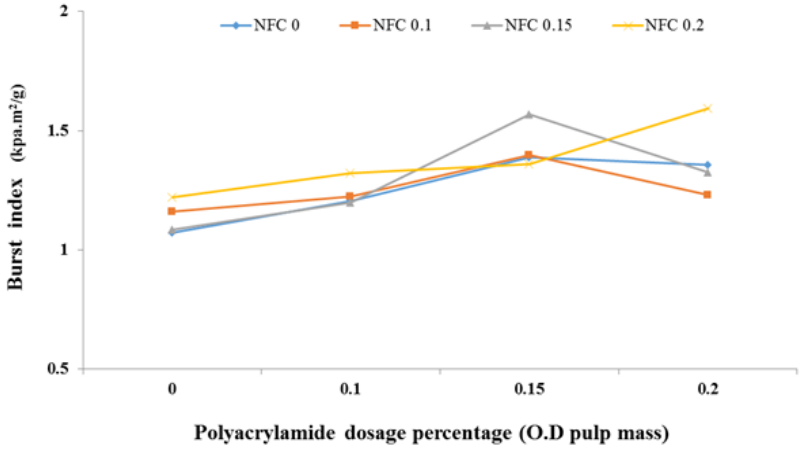


شکل ۶ تأثیر پلی‌اکریل‌آمید کاتیونی بر مقاومت کششی کاغذ بازیافتی در حضور و عدم حضور نانولیفچه سلولزی

Fig. 6 Effect of cationic Polyacrylamide on tensile indx of recycled paper in absence and presence of cellulose nano fibrils

مقاومت به ترکیدن: شاخص مقاومت به ترکیدن نیز از عواملی همانند مقاومت کششی کاغذ پیروی می‌کند. از آنجایی که CPAM به واسطه بار کاتیونی سازگاری و تمایل خوب و بالائی با سطح آنیونی الیاف سلولزی دارد، برقراری پیوندهای الکترواستاتیکی تسهیل می‌شود.

[Downloaded from arcpe.modares.ac.ir on 2025-07-16]



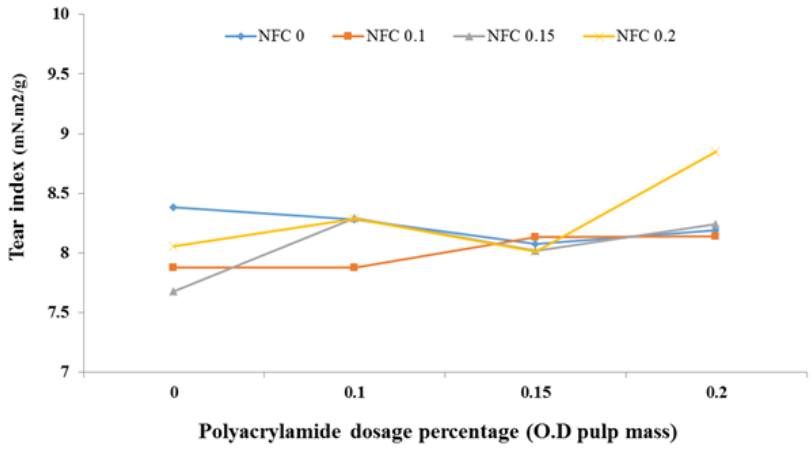
شکل ۷ تأثیر پلی‌اکریل‌آمید کاتیونی بر مقاومت ترکیدن کاغذ بازیافتی در حضور و عدم حضور نانولیفچه سلولزی

Fig. 7 Effect of cationic Polyacrylamide on burst index of recycled paper in absence and presence of cellulose nano fibrils

همان‌گونه که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، شاخص مقاومت به ترکیدن با حضور CPAM به‌طور معنی‌داری افزایش می‌یابد و ارتقایی در حدود ٪۲۶ را تجربه می‌کند. بیش‌ترین میزان بهبود در شاخص ترکیدن ساختار سلولزی، در ۰/۱۵ درصد مصرف CPAM مشاهده شد و در سطح کاربرد ٪۰/۲، افزایشی در شاخص ترکیدن در مقایسه با میزان کاربرد کم‌تر از آن، ایجاد نشد. همانند روند شاخص کششی، افزودن منفرد نانولیفچه سلولزی بهبود شاخص ترکیدن را موجب شده و در سطح کاربرد ٪۰/۲ نانو الیاف سلولزی، بیش از ٪۱۰ ارتقای شاخص ترکیدن را به‌همراه داشته‌است. کاربرد توأم پلیمرهای CPAM و نانولیفچه سلولزی نیز بسته به تعامل نانوذره با پلیمر کاتیونی و دوغاب، اثرات متفاوتی را برجای گذاشته است؛ به‌نحوی‌که در برخی از سطوح تلفیقی، نه‌تنها برتری زیادی نسبت به کاربرد منفرد پلیمر به‌همراه نداشته‌است، بلکه منجر به کاهش چشمگیر تأثیر بهبوددهندگی CPAM کاتیونی نیز گشته‌است. کاهش مشاهده شده در مقاومت ترکیدن بر اثر افزودن سطوح نانولیفچه سلولز به خمیرکاغذ حاوی CPAM بنا بر استدلال قبلی ذکرشده، قابل درک است. نکته جالب توجه، بهبود مقاومت‌های ترکیدن با افزایش سهم نانوالیاف در سطح ٪ ۰/۲ کاربرد نانوالیاف به همراه ۰/۲ درصد CPAM است که افزایش در حدود ٪۵۰ مقاومت به ترکیدن را در مقایسه با نمونه شاهد فاقد افزودنی و ٪۱۷ را در مقایسه با نمونه حاوی صرفاً CPAM به‌همراه داشته‌است. به‌نظر می‌رسد، جذب CPAM بر سطح الیاف و همراه‌شدن با سطح مناسب مصرف نانولیفچه سلولز آنیونی سبب تشکیل لخته‌هایی مناسب و شکل‌گیری بهینه و در نتیجه بهبود مقاومت شده باشد.

مقاومت به پاره‌شدن: این ویژگی از جمله پارامترهای مورد ارزیابی کیفی سازه‌های سلولزی نظیر کاغذ و مقوا، به‌ویژه در کاربردهای بسته‌بندی است. عوامل اصلی تأثیرگذار در این مقاومت کاغذ شامل میانگین طول و قطر الیاف و نیز مقاومت ذاتی الیاف به‌کاررفته در تولید کاغذ است که البته میزان پیوندیابی اجزا و نیز جهت‌یافتگی آن‌ها در ساختار کاغذ نیز تأثیرگذار است. به‌طوری‌که حضور الیافی با میانگین طول و ضخامت کم‌تر در تعلیقه الیاف، کاهش این ویژگی را به‌همراه دارد [۸، ۱۷، ۱۸]. همان‌گونه که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، در تمامی سطوح مختلف کاربرد منفرد نانولیفچه سلولز، شاخص پارگی کاغذ پائین‌تر از نمونه شاهد فاقد هرگونه افزودنی گزارش می‌شود. همچنین با درنظرگرفتن نتایج ماندگاری خمیرکاغذ (شکل ۲)، مشخص می‌شود که میزان ماندگاری نیز در نمونه‌های مورد اشاره ارتقا یافته که به مفهوم حفظ بیش‌تر نرمه‌ها در ساختار ورقه کاغذ است. بنابراین حضور نانوالیاف و تأثیر آن بر ماندگارشدن بیش‌تر نرمه‌های الیاف که در سازگاری با افزایش ویژگی ماندگاری کل و نیز کاهش اتلاف مواد است، کاهش میانگین قطر و طول الیاف را در کاغذ تولیدی درپی داشته که به‌صورت تنزل شاخص پارگی کاغذ نمود می‌یابد. در حالت کاربرد منفرد CPAM، کاهش حدود ۴ درصدی در شاخص پارگی کاغذ مشاهده شد. همراهی نانولیفچه سلولز نیز عمدتاً (به استثنای بالاترین سطوح مورد مطالعه) نه‌تنها افزایش معنی‌داری را در شاخص پارگی پدید نیاورده، کاهش استحکام کاغذ بازیافتی در برابر تنش‌های پارگی را نیز موجب شده است. به‌نظر می‌رسد افزایش تعداد یا استحکام پیوندها با افزودن نانو الیاف، CPAM و نیز هر دو افزودنی پلیمری، با توجه به سازوکار عمل آزمون پارگی، موجب انتقال نقطه بروز پارگی از پیوندها و لخته‌ها، به الیاف شده و با توجه به ضعیف‌تربودن الیاف به‌ویژه از نوع بازیافتی در مقایسه با پیوندها، افت نیروی لازم برای برش کاغذ از طریق برش توده الیاف سلولزی حاصل می‌شود. به‌همین دلیل در صنعت نیز پالایش تعلیقه الیاف با هدف افزایش لیف‌سازی و توسعه پیوندیابی، تا حد مشخصی انجام می‌شود که جایگزینی سازوکار

[Downloaded from arcpe.modares.ac.ir on 2025-07-16]



شکل ۸ تأثیر پلی‌اکریل‌آمید کاتیونی بر مقاومت پارگی کاغذ بازیافتی در حضور و عدم حضور نانولیفچه سلولزی

Fig. 8 Effect of cationic Polyacrylamide on tear index of recycled paper in absence and presence of cellulose nano fibrils

پارگی از شکستن پیوندها به برش الیاف اتفاق نیفتد. با این‌حال پیرامون تنها افزایش بروزیافته در شاخص پارگی که در سطح ۰/۲٪ مصرف CPAM و نانولیفچه سلولز (NFC) مشاهده و به میزان ۸ درصد سبب افزایش شاخص مقاومت به پارگی شده‌است؛ چنین استدلال می‌شود که در این نمونه لخته‌های محکم و فشرده‌ای شکل گرفته که انرژی لازم برای شکستن لخته‌های قوی‌تر شکل‌یافته نسبت به حالات دیگر، بیش‌تر خواهد بود. همان‌طور که پیش‌تر نیز اشاره شد، بسته به بار خالص الکترواستاتیکی سامانه در حالت حضور سطوح متغیر نانوذرات و پلیمرهای مختلف، واکنش سامانه به افزایش سطوح کاربرد بالاتر نانولیفچه سلولزی متفاوت خواهد بود. نتایج متمایز و بالاتر شاخص‌های کششی و ترکیدن در شرایط عمل‌آوری نمونه مزبور نیز در سازگاری با استدلال بیان‌شده است.

نتیجه‌گیری

کاربرد پلیمرها در صنایع سلولزی از دیرباز مورد توجه بوده که علاوه بر الزام به کاربرد آن‌ها برای تأمین ویژگی‌های فرایندی و نیز فراورده تولیدی، مزایای مختلف فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی را نیز به‌همراه دارند. کاربرد پلیمرهای مختلف کاتیونی برای به‌دام انداختن و نگه‌داشت اجزای ریز تعلیقه‌های متنوع الیاف در سازوکارهای متنوع الکتروشیمیایی، در حین جداکردن آب از ساختار نمدی در حال شکل‌گیری مورد جستجو و پژوهش است [۴]. کاربرد نانوذرات از رویکردهای اخیر در این زمینه بوده که تأثیر منفرد و تلفیقی پلیمرهای کاتیونی اکریلامید و آنیونی نانولیفچه سلولز بر ویژگی‌های مهم تعلیقه لیفی و کاغذ بازیافتی بسته‌بندی بررسی شد. نتایج نشان‌داد که کاربرد منفرد پلیمر کاتیونی، میزان ماندگاری کل اجزای تعلیقه را افزایش و میزان مواد هدررفته در حین شکل‌گیری ساختار سلولزی را کاهش می‌دهد. همچنین افزایش روانی و سهولت جدایش آب از تعلیقه الیاف، از ۳۵۰ میلی‌لیتر در نمونه شاهد و فاقد هرگونه افزودنی به ۴۴۵ میلی‌لیتر در پائین‌ترین سطح کاربرد پلیمر کاتیونی آکریلامیدی (۰/۱٪) مشاهده شد که حدود ۳۰٪ بهبود سرعت آب‌گیری را نشان می‌دهد. افزایش کاربرد پلی اکریل‌امید کاتیونی نیز به‌طور پیوسته و معنی‌داری تقویت توان آب‌گیری از تعلیقه الیاف را موجب شد. همچنین ارتقای چگالی ظاهری و ویژگی‌های مقاومت به کشش و ترکیدن ساختار لیفی را درپی داشته، لیکن سطوح بالاتر کاربرد، تأثیر چشمگیری بر چگالی نداشته است. کاربرد منفرد CPAM منجر به کاهش حدود ۴ درصدی مقاومت پارگی شبکه لیفی شد. کاربرد منفرد نانولیفچه سلولزی نیز افزایش در ماندگاری خمیرکاغذ، چگالی و مقاومت‌های کشش و ترکیدن کاغذ و نیز کاهش درجه روانی، اتلاف و عبور اجزای جامد تعلیقه از منافذ توری و نیز مقاومت پارگی را موجب شد. سطح بهینه مصرف منفرد نانوزیست‌پلیمر سلولزی، ۰/۲٪ گزارش می‌شود که کم‌ترین افت شاخص پارگی و غالباً بیش‌ترین بهبود را در سایر ویژگی‌های مورد مطالعه به‌همراه داشته است. در نمونه‌های تلفیقی CPAM کاتیونی و نانولیفچه سلولزی، ماندگاری و کاهش اتلاف مواد جامد تعلیقه در میزان افزودن ۰/۱٪ نانوالیاف از تأثیر مثبتی در تمامی سطوح حضور CPAM برخوردار بوده است. نکته جالب و دور از انتظار، کاهش معنی‌دار درجه روانی تعلیقه الیاف در سامانه الکتروشیمیایی همتافت CPAM/نانولیفچه سلولز در مقایسه با سامانه الکتروشیمیایی پل‌زنی CPAM است که البته گاهاً در مورد پلیمر اکریلامیدی نیز مشاهده شد. افزودن نانولیفچه سلولزی پس از CPAM، غالبا افزایش تراکم و چگالی کاغذ را به‌همراه داشته که علاوه بر افزایش ماندگاری اجزا، از تراکم و نزدیکی بیش‌تر اجزا نیز نشأت می‌گیرد. افزودن نانولیفچه سلولزی پس از CPAM در سطوح ۰/۲٪ و ۰/۱۵٪ به تعلیقه الیاف، عمدتاً موجب بهبود مقاومت کششی کاغذ در مقایسه با

[Downloaded from arcpe.modares.ac.ir on 2025-07-16]

کاربـرد منفـرد پلیمـر کاتیونـی شـد. کاربـرد تـوأم پلیمرهـای CPAM و نانولیفچـه سـلولزی در مقاومـت ترکیـدن نیـز بسـته بـه تعامـل نانـوذره بـا پلیمـر کاتیونـی و تعلیقـه الیـاف، اثـرات متفاوتـی را برجـای گذاشـته اسـت؛ به‌نحوی‌کـه در برخـی از سـطوح تلفیقـی، نه‌تنهـا برتـری زیـادی نسـبت بـه کاربـرد منفـرد پلیمـر به‌همـراه نداشته‌اسـت، بلکـه منجـر بـه کاهـش تأثیـر بهبوددهندگـی CPAM کاتیونـی نیـز شـده اسـت. همراهـی نانولیفچـه سـلولز نیـز عمدتـاً (بـه اسـتثنای بالاتریـن سـطوح مـورد مطالعـه) نه‌تنهـا افزایـش معنـی‌داری را در شـاخص پارگـی پدیـد نیـاورده کـه کاهـش اسـتحکام کاغـذ بازیافتـی در برابـر تنش‌هـای پارگـی را نیـز موجـب شـده اسـت.

[Downloaded from arcpe.modares.ac.ir on 2025-07-16]

مراجع

[1] Smook G.A., Handbook for Pulp and Paper Technologists. 2nd Ed. TAPPI Press, 2001. (Translated by MirShokraei S.A. Persian, AEEIZH, 2003).

[2] Jalali Torshizi H., Mirshokraie S.A., Faezipour M.M., Hamzeh Y. and Resalati H., Application of Galbanum Gum (Ferula Gummosa) Polysaccharide as a Natural Polymer to Improve Dry Strength Properties of Recycled Papers Obtained from Old Corrugated Cartons. Iranian Journal of Polymer Science and Technology, 2010 ,353-345 ,(4)23.

[3] Jalali Torshizi H., Zarea Bidoki S., Ramezani O ., Rudi H., 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, 483-474 ,(3) 29 ,2014.

[4] Gullichsen J. and Paulapuro H., Papermaking Chemistry, Papermaking Science and Technology 19 series, 1999 ,35-25.

[5] Hamzeh Y., and Rostampuor A. Principals of Papermaking Chemistry, Tehran University Press, Tehran (in Persian), 2008.

[6] Habibie S., Hamzah M., Anggaravidya M., and Kalembang E. The Effect of Chitosan on Physical and Mechanical Properties of Paper. Journal of Chemical Engineering and Materials Science, 2016 ,10-1 ,(1)7.

[7] Jalali Torshizi H., Chiaani E., Rudi H., and Nabid M.R. Performance of Chitosan and Polyamide Epichlorohydrin (pae) on Wet Strength and Water Absorption of Deinked Pulp. Journal of Forest and Wood Products, 70 2017 ,717-709 ,(4).

[8] Tajik M., Jalali Torshizi H., Resalati H., and Hamzeh Y., Effects of Cationic Starch in the Presence of Cellulose Nanofibrils on Structural, Optical and Strength Properties of Paper from Soda Bagasse Pulp, Carbohydrate Polymers, 2018 ,8-1 ,194.

[9] Ordóñez R., Hermosilla, D., de la Fuente E., and Blanco Á., Influence of Water Quality on the Efficiency of Retention Aids Systems for the Paper Industry, Industrial & Engineering Chemistry Research, ,10252-10247 ,(23) 48 2009.

[10] Khosravani A., Jahan latibari A., Mirshokraei. S.A., Rahmaninia M., and Nazhad M., Studying the Effect of Cationic Starch-Anionic Nano Silica System on Retention and Drainage. Bioresearches 2010 ,950-939 ,(2)5.

[11] Rezayati Charani P., Dehghani-Firouzabadi, M., Afra, E., Blademo, Å., Naderi, A., and Lindström, T. Production of Microfibrillated Cellulose from Unbleached Kraft Pulp of Kenaf and Scotch Pine and its Effect on the Properties of Hardwood Kraft: Microfibrillated Cellulose Paper. Cellulose, 2013 ,2567-2559 ,(5)20.

[12] Pourkarim Dodangeh H., Jalali Torshizi H., Rudi H., and Ramezani O., 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, 2016 ,309-297 ,(2)7.

[13] Jalali Torshizi H., Jahan- Latibari A., Mirshokraie S.A., and Faezipour M.M., Investigation on the Performance of Cationic Starch and CMC Addition on Strength Properties of Fluting Paper Produced from OCC. Journal of Pajouhesh & Sazandegi, 2009 ,76-69 ,81.

[14] Alinia Lakani, S., Afra, E., and Yousefi, H. Properties of Chemi-Mechanical Pulp Filled with Nanofibrillated and Microcrystalline Cellulose. Journal of Biobased Materials and Bioenergy, 2014 ,494-489 ,(5)8.

[15] Balea A., Blanco, A., Concepción Monte M., Merayo N., and Negro C. Effect of Bleached Eucalyptus and Pine Cellulose Nanofibers on the Physico-Mechanical Properties of Cartonboard. BioResources, 2016 ,8138-8123 ,(4)11.

[16] Balea A., Merayo N., De La Fuente E., Negro C., and Blanco Á. Assessing the Influence of Refining, Bleaching and TEMPO-Mediated Oxidation on the Production of More Sustainable Cellulose Nanofibers and Their Application as Paper Additives. Industrial Crops and Products, 2017 ,387–374 ,97.

[17] Pourkarim Dodangeh H. and Jalali Torshizi H., The Effect of Cellulose Nanofibers on Cationic Starch Efficiency in Pulp and Paper Recycled from Packaging Waste Paper. Iranian Journal of Wood and Paper Industries, ,(2)9 2017 ,197-187.

[18] Gullichsen J. and Paulapuro H., Paper physics, Papermaking Science and Technology 19 series, 1999 ,85-70.

[19] Hassan E.A., Hassan M.L., and Oksman K., Improvement of Paper Sheets Properties of Bagasse Pulp with Microfibrillated Cellulose Isolated from Xylanase Treated Bagasse. Wood

[Downloaded from arcpe.modares.ac.ir on 2025-07-16]

and Fiber Science, 2011 ,7-1 ,(1)43.
[20] Hadilam M.M., Afra E. and Yousefi H., Effect of Cellulose Nanofibers on the Properties of Bagasse Paper, Journal of Forest and Wood Products 2013 ,366-351 ,(3)66.
[21] Su J., Mosse W., Sharman S., Batchelor W., Garnier G. Paper Strength Development and Recyclability with Polyamide Amine-Epichlorohydrin (PAE). Bio Resources ,(1)7 2012 ,924-913.

[Downloaded from arcpe.modares.ac.ir on 2025-07-16]