Iranian Journal of Wood and Paper Science Research

Print ISSN: 1735-0913
Online ISSN: 2383-112X

Vol. 40, No. 4, Page 379-394 (2025)

DOI: 10.22092/ijwpr.2025.371038.1817

(OPEN ACCESS)

Effect of p-DADMAC-nano cellulose complex on properties of pulp and paper recycled from old corrugated containers (OCC)

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

1-M.Sc. Dept. of Biorefinery Eng, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran
2*-Corresponding author, Associate Prof., Dept. of Biorefinery Eng, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran,
Email: H_Jalali@sbu.ac.ir
3- Associate Prof., Dept. of Biorefinery Eng, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

Article Info

Article type:
Full Length Research Paper

Article history:
Received: 14 October 2025
Revised: 18 November 2025
Accepted: 21 November 2025
Published online: 19 December 2025

Keywords:
p-DADMAC,
nanoCellulose,
retention,
drainage,
mechanical strengths,
Recycled Pulp & Paper.
.

ABSTRACT

Background and Objective: The accessibility and shortage to virgin pulps and recycled pulps with lower reusing cycles in recent years has led to adverse effects on the quality of recycled paper products which are used for packaging. The use of chemical additives is considered as an effective strategy to improve properties of the pulp and the recycled papers. In the meantime, the use of biomass-based materials such as nanocellulose and multifunctional materials such as cationic poly diallyldimethylammonium chloride (p-DADMAC) is growing and attracting attention from various technical and environmental aspects. Therefore, in order to improve the properties of the product and the production process, the effect of nanocellulose and p-DADMAC as polymers with the aforementioned potential was studied on a laboratory scale.

Material and Methodology: Recycled brown pulp was prepared from an OCC domestic mill without any additives and with a Canadian standard freeness (CSF) of 350 ml. Medium molecular weight cationic polydiallyldimethylammonium chloride (poly DADMAC) from Sigma Aldrich and cellulose nanofibers with an average diameter of 35 nm from Nano Novin Polymer Co. were purchased. The addition of chemicals to the pulp slurry was studied at four levels: 0, 0.1, 0.15, and 0.2 based on oven dry (O.D) mass of pulp. Effects of the polymer additions, individually and in combination, on pulp properties including CSF, total retention, and material loss in the DDJ analyzer, as well as on the properties of laboratory handsheets including density, tensile, bursting, and tearing strength indices, were investigated according to TAPPI standards procedures.

Results: The individual addition of cationic p-DADMAC (patching system) resulted in an increment of total retention of the recycled pulp ingredients, but increasing the amount of addition did not significantly change the total retention. It also reduced the amount of material loss through passing the DDJ screen and increased the pulp CSF from 350 ml in the control sample without any additives to 430 ml at the lowest level of p-DADMAC usage (0.1%). It

also significantly improved the apparent density, but higher levels of p-DADMAC did not have a significant effect on this structural property of the recycled paper. Regarding the tensile and bursting strengths of the recycled paper, the single application of p-DADMAC and increasing its dosage caused some changes, mainly increasing but relatively limited. Cellulose nanofibers, when used alone, also resulted in an increase in the total retention and density, tensile and bursting indices of the paper; and a decrease in tear index, CSF, and material loss from the pulp in the DDJ analyzer. The anionic nature, high specific surface area, and hydrogen bonding potential were reported to be the reasons for such results. The use of cellulose nanofibers after p-DADMAC to the pulp as a complex system in the wet end of papermaking has increased the total retention of the pulp ingredients on the wire of the laboratory handsheet maker, which can be reported in the form of reduced material loss. It also often has a significant and severe adverse effect on CSF and has made drainage slower and longer. The use of nanocellulose after p-DADMAC has also had different effects, mainly increasing, on the tensile, bursting, and tearing resistance of the produced recycled packaging paper, depending on the percentage of each of the additives.

Conclusion: It was shown that, except for the undesirable reducing effect of the single application of nanocellulose on the tear index and CSF freeness, in other single and complex addition treatments of chemical additives of nanocellulose and poly-DADMAC, an increase in all strength properties and paper density, improvement of drainage ease of recycled pulp, increase in pulp retention during paper formation, and reduction of material loss can be achieved compared to the control treatment. However, the single application of the cationic polymer showed better results in pulp in terms of retention and drainage than the single application of nanocellulose and their combination. The trend of changes in strength properties also depended on the percentages of combined application of two different chemicals.

Cite this article: Hossein Pourkarim Dodangeh, Hossein Jalali Torshizi and Hamidreza Rudi. 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. DOI: http//doi.org/10.22092/ijwpr.2025.371038.1817

Copyright: © 2025 by the authors. This is an open access, peer-reviewed article published by Research Institute of Forests and Rangelands (http://ijwpr.areeo.ac.ir/) and distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

تأثیر کمپلکس نانوسلولز پلی‌دادمک (p-DADMAC) بر ویژگی‌های خمیرکاغذ و کاغذ بازیافتی از آخال قهوه‌ای (OCC)

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

۱- کارشناسی ارشد، گروه مهندسی پالایش زیستی، دانشگاه شهید بهشتی. ایران

۲*-دانشیار، گروه مهندسی پالایش زیستی، دانشگاه شهید بهشتی. ایران، پست الکترونیک: mailto:H_Jalali@sbu.ac.ir

۳- دانشیار، گروه مهندسی پالایش زیستی، دانشگاه شهید بهشتی. ایران

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مقاله کامل علمی - پژوهشی

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۲۲
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۸/۲۷
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۳۰
تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۹/۲۸

واژه‌های کلیدی:
پلی‌دادمک،
نانوسلولز،
ماندگاری،
آبگیری،
مقاومت‌های مکانیکی،
خمیرکاغذ
و کاغذ بازیافتی.

چکیده

سابقه و هدف: نقصان دسترسی به آخال‌های تمیز و با پیشینه بازیابی اندک و نیز الیاف بکر در سالیان اخیر در کشور، منجر به کاهش شدید کیفیت فراورده‌های کاغذی بسته‌بندی و نیز فرایند تولید کاغذ بازیافتی شده است. استفاده از مواد افزودنی شیمیایی راهکاری کارآمد در بهبود ویژگی‌های خمیرکاغذ و کاغذهای بازیافتی محسوب می‌شود. در این میان کاربرد مواد مبتنی بر زیست‌توده مانند نانوسلولز و نیز مواد چند کاربردی مانند پلیمر کاتیونی دی‌آلیل دی‌متیل آمونیوم کلراید (پلی دادماک) از جنبه‌های مختلف فنی و زیست‌محیطی رو به گسترش و مورد توجه است. بنابراین در راستای بهبود ویژگی‌های فراورده و فرایند تولید، تأثیر نانوسلولز و پلی‌دادمک به‌عنوان پلیمرهای دارای ظرفیت های مزبور، در مقیاس آزمایشگاهی مورد پژوهش قرار گرفت.

مواد و روش‌ها: خمیرکاغذ بازیافتی از آخال قهوه‌ای OCC از کارخانه‌های داخلی و بدون هرگونه افزودنی و با درجه روانی ۳۵۰ میلی‌لیتر تهیه شد. مواد شیمیایی پلی دی‌آلیل دی‌متیل آمونیوم کلراید کاتیونی (پلی‌دادماک) با وزن مولکولی متوسط از شرکت Sigma Aldrich و نانوالیاف سلولزی با میانگین قطر ۳۵ نانومتر از شرکت نانونوین پلیمر خریداری شد. مواد شیمیایی مزبور در چهار سطح مصرف صفر، ۰/۱، ۰/۱۵ و ۰/۲ بر مبنای جرم خشک خمیرکاغذ بررسی گردید. تأثیر کاربرد پلیمرهای مزبور به‌صورت منفرد و ترکیبی بر ویژگی‌های خمیرکاغذ شامل درجه روانی، ماندگاری کل و اتلاف مواد در آنالیزگر DDJ و نیز ویژگی‌های کاغذ بازیافتی دست‌ساز آزمایشگاهی مشتمل بر دانسیته و شاخص‌های مقاومت کششی، ترکیدن و پارگی برابر استانداردهای TAPPI مورد پژوهش قرار گرفت.

نتایج: کاربرد منفرد پلیمرکاتیونی p-DADMAC (سامانه وصله‌زنی) منجر به افزایش درصد ماندگاری کل اجزای دوغاب خمیرکاغذ بازیافتی شد، اما افزایش میزان مصرف تغییر محسوسی را در ماندگاری کل نداشت. همچنین میزان مواد عبورکرده از توری DDJ را کاهش داده و نیز افزایش درجه روانی خمیرکاغذ از ۳۵۰ میلی‌لیتر در نمونه شاهد و فاقد هرگونه افزودنی به ۴۳۰ میلی‌لیتر در کمترین سطح کاربرد آن (۰/۱٪) را سبب شده است. همچنین به‌طور چشمگیری دانسیته ظاهری را ارتقا داده که افزایش سطح مصرف آن نیز تأثیر معنی‌داری بر این ویژگی ساختاری کاغذ نداشته است. کاربرد منفرد p-DADMAC و افزایش درصد افزودن آن به خمیرکاغذ بازیافتی به‌طور نسبی تغییراتی را عمدتاً افزایشی اما محدود، در مقاومت به کشش و ترکیدن کاغذ بازیافتی به وجود آورده است. نانوالیاف سلولزی نیز به‌صورت کاربرد منفرد منجر به افزایش ماندگاری خمیرکاغذ، دانسیته، شاخص‌های کشش و ترکیدن کاغذ، کاهش درجه‌روانی و اتلاف مواد از خمیرکاغذ و نیز افت شاخص پارگی گردید. ماهیت آنیونی، سطح ویژه بالا و دارای ظرفیت پیوندهای هیدروژنی سبب این نتایج گزارش شد. کاربرد نانوالیاف سلولزی پس از پلی‌دادمک به خمیرکاغذ به‌عنوان سامانه مرکب در پایانه تر کاغذسازی، بر ماندگاری روی توری افزوده است که در قالب کاهش اتلاف مواد قابل گزارش است. همچنین غالباً از تأثیر معنی‌داری نامطلوب شدیدی بر درجه روانی برخوردار بوده و آبگیری را کندتر و سخت‌تر کرده است. کاربرد نانوسلولز پس از p-DADMAC نیز با توجه به درصد افزودن هریک از افزودنی‌های مزبور، تأثیرات متفاوتی عمدتاً افزایشی بر ویژگی‌های مقاومتی

کششی، ترکیدن و پارگی داشته است.

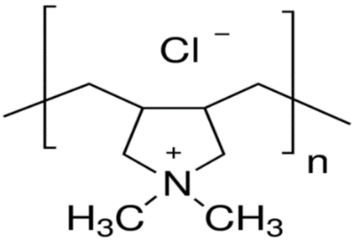
نتیجه‌گیری: نشان داده شد که به‌استثنای تأثیر نامطلوب کاهنده کاربرد منفرد نانوسلولز بر شاخص پارگی و درجه روانی، در سایر حالت‌های کاربرد منفرد و ترکیبی افزودنی‌های شیمیایی نانوسلولز و پلی دادماک، افزایش تمامی ویژگی‌های مقاومتی و دانسیته کاغذ، بهبود سهولت آبگیری از خمیرکاغذ، افزایش ماندگاری خمیرکاغذ به هنگام شکل‌گیری و کاهش اتلاف مواد در مقایسه با تیمار شاهد قابل دستیابی است. بااین‌حال، کاربرد منفرد پلیمر کاتیونی نسبت به کاربرد منفرد نانوسلولز و نیز ترکیبی آنها، شرایط بهتری را در خمیرکاغذ از منظر ماندگاری و آبگیری پدیدار نمود. البته روند تغییرات ویژگی‌های مقاومتی نیز وابسته به درصدهای کاربرد ترکیبی دو ماده شیمیایی متفاوت بوده است.

استناد: حسین پورکریم دودانگه، حسین جلالی ترشیزی و حمیدرضا رودی. ۱۴۰۴. تأثیر کمپلکس نانوسلولز- پلی‌دادمک **(p-DADMAC)** بر ویژگی‌های خمیرکاغذ و کاغذ بازیافتی از آخال قهوه‌ای **(OCC)**. نشریه تحقیقات علوم چوب و کاغذ ایران، ۴۰(۴)، ۳۹۴-۳۷۹. **DOI: http//doi.org/10.22092/ijwpr.2025.371038.1817**

مقدمه

مشکلات و محدودیت‌های اخیر در دسترسی به منابع آبی که به‌طور روزافزونی در حال تشدید است، منجر به الزام صنایع کاغذسازی و نیز بازیافت کاغذ در گردش هرچه بسته‌تر سیستم آب‌های فرایندی شده که درنتیجه آن میزان مواد مزاحم محلول و معلق در پایانه تَر ماشین کاغذ به‌شدت افزایش‌یافته است (Nakib Hossen *et al.*, 2024; Askarabadi, *et al.*, 2025). این موضوع معمولاً توأم با کاهش اثربخشی افزودنی‌های کاغذسازی است و منجر به نیاز کاتیون خواهی بالایی در کارخانه کاغذ می‌شود (Gullichsen & Paulapuro, 1999; Tajik *et al.*, 2017). به‌عنوان پلیمر کاتیونی محلول در آب، پلی دی‌آلیل‌دی‌متیل آمونیوم کلراید (Poly DADMAC) مزایایی ازجمله چگالی بالای بار کاتیونی، حلالیت خوب در آب، وزن مولکولی قابل کنترل، بازدهی بالا، عدم سمیت و هزینه کم را داراست (Lindstrom *et al.*, 2005) بنابراین به‌طور گسترده‌ای در حفاری چاه‌های نفت، کاغذسازی، معدن، چاپ و رنگرزی پارچه، صنایع شیمیایی روزمره، استریلیزاسیون، ضد خوردگی فلزات، تصفیه آب و سایر زمینه‌ها استفاده می‌شود. PolyDADMAC (شکل ۱) عمدتاً به‌عنوان جاذب آشغال‌های آنیونی و لخته‌ساز در صنعت کاغذسازی استفاده می‌شود (Gullichsen & Paulapuro, 1999; Ahmadi *et al.*, 2020; Lajimi *et al.*, 2020)؛ که از طریق جذب سطحی بین Poly DADMAC و ذرات کلوئیدی مانند الیاف و نرمه‌های سلولزی ایجاد می‌شود. افزایش مصرف p-DADMAC در تهیه خمیرکاغذهای حل شونده سبب افزایش میزان حذف لیگنین شده است (Wu *et al.*, 2016). امروزه صنایع بازیافت کاغذ در ایران علاوه بر فشارهای زیست‌محیطی و مشکلات تأمین آب تازه، از فقدان دسترسی به منابع بکر لیفی نیز رنج برده و مجبور به بازچرخانی‌های متعدد کاغذهای بازیافتی در چرخه‌ای شبه بسته‌شده است. این موضوع به‌شدت بر کیفیت خمیرکاغذ و کاغذ بازیافتی حاصل تأثیر منفی داشته و منجر به عدم‌کفایت در تأمین ویژگی‌های مقاومتی موردنیاز در کاربردهای بسته‌بندی‌شده است (Pourkarim Dodangeh *et al.*, 2016; Pourkarim Dodangeh *et al.*, 2018). زیرا الیاف بازیافتی در مقایسه با الیاف بکر؛ ضعیف‌تر، کوتاه‌تر و دارای دیواره‌ای نازک‌تر بوده و در برابر پالایش نیز دچار تخریب بالایی می‌شوند. بنابراین پیوندیابی بین الیافی با کیفیت موصوف، به‌طور چشمگیری ضعیف‌تر بوده و ویژگی‌های بسیار پائینی را به‌صورت مقاومت‌های ترکیدن، کشش و پارگی در کاغذ تولیدی برجای می‌گذارند. این افت در کیفیت با تکرار بازیافت تشدید می‌گردد (Jalali Torshizi *et al.*, 2014). بنابراین نکته کلیدی در تولید کاغذهای بسته‌بندی

به‌ویژه از الیاف بازیافتی، توسعه روش‌هایی به‌منظور بهبود اتصال بین الیاف و افزایش ویژگی‌های مقاومتی فراورده تولیدی است (Yang *et al.*, 2021; Hassan *et al.*, 2011). بنابراین، باوجود مزایای اقتصادی و زیست‌محیطی کاربرد کاغذهای بازیافتی، بایستی توجه داشت که این نوع الیاف، ویژگی‌های کم‌وبیش متفاوتی نسبت به الیاف بکر دارا دارند (Jalali Torshizi *et al.*, 2009). بازیافت کارتن‌های کنگره‌ای کهنه (Old Corrugated Container)(OCC) برای تولید کاغذ لاینر و کنگره‌ای مورد استفاده در کارتن‌سازی، بخش اعظم بازار بازیافت مواد را در دنیا شامل می‌گردد و بیش از بازیافت سایر انواع درجات کاغذ نیز در ایران و جهان رواج دارد (Jalali Torshizi *et al.*, 2010). ازاین‌رو و بنا به اهمیت صنایع تولید کاغذهای بسته‌بندی به‌عنوان زیربنای دیگر صنایع و صادرات و نیز اهمیت و حساسیت تهیه کاغذهای مزبور از بازیافت آخال‌های قهوه‌ای، در این پژوهش تأثیر منفرد و مرکب دو ماده شیمیایی بر ویژگی‌های فراورده و فرایند تولید کاغذهای بسته‌بندی قهوه‌ای بازیافتی بررسی شد.



شکل ۱- ساختار پلیمرکاتیونی p-DADMAC

Figure 1. Structure of the cationic p-DADMAC

مواد و روش‌ها

خمیرکاغذ مورد استفاده در این پژوهش از نوع OCC و از کارخانه پارس کاغذ نکا (مازندران-شهرک صنعتی نکا) تهیه گردید. خمیرکاغذ مزبور از نقطه قبل از جعبه تغذیه ماشین کاغذ و بدون هرگونه افزودنی جمع‌آوری و درجه روانی (Canadian Standard Freeness)(CSF) (mL) ۳۵۰، pH ~ ۸ و دمای ۱۶ °C برای تهیه کاغذهای دست‌ساز آزمایشگاهی تنظیم گردید. نانوسلولز از نوع نانوالیاف سلولز (Nano Fibrillated Cellulose)(NFC) و تهیه‌شده به روش مکانیکی از الیاف رنگبری‌شده کرافت سوزنی‌برگ، از شرکت دانش‌بنیان 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 قرار گرفت. پلی دادماک مصرفی نیز از شرکت Sigma Aldrich با CAS Number: 26062-79-3 و با ظاهر محلول کرم‌رنگ و نیمه شفاف، وزن مولکولی متوسط (۲۰۰،۰۰۰-۳۵۰،۰۰۰ دالتون) خریداری و پس از رقیق‌سازی با درصد خشکی ۰/۱٪ مورد استفاده قرار گرفت. سایر ویژگی‌های آن به شرح جدول ۱ است.

جدول ۱ - مشخصات پلیمر پلی دی‌آلیل دی‌متیل آمونیوم کلراید (P-DADMAC)
Table 1- Poly DiAllylDiMethylAmmonium Chloride Properties

Viscosity (cP)	Solid Content	pH	Mw	states of matter	color
350-950	19-21	5-8	Medium	Liquid	Creamy

به هنگام ساخت کاغذ دست‌ساز آزمایشگاهی، ابتدا پلیمر پلی دادماک به خمیرکاغذ در حال تلاطم با شدت دورانی ۳۰۰-۵۰۰ دور بر دقیقه افزوده و پس از ۱۰-۵ ثانیه، به‌شدت دوران ۱۰۰۰-۸۰۰ رسانیده و پس از کاهش به سطح حدود ۵۰۰ دور بر دقیقه، نانوذره سلولزی اضافه گردید. درنهایت و بلافاصله دوغاب مزبور به دستگاه ساخت کاغذ دست‌ساز منتقل و کاغذ آزمایشگاهی بر اساس استاندارد TAPPI به شماره T۲۰۵ sp -۰۲ تهیه شد. در این پژوهش اندازه‌گیری تمامی ویژگی‌ها منطبق بر استانداردهای آئین‌نامه TAPPI انجام شد و شامل میزان ماندگاری در دستگاه DDJ (Dynamic Drainage Jar) (T۲۶۱ cm -۰۰) و درجه روانی CSF (T۲۲۷ om-۰۴)، شاخص مقاومت در برابر کشش (T۴۹۴ om -۰۱)، ترکیدن (T۴۰۳ om -۰۲)، پاره شدن (T۴۱۴ om -۰۴)، گرماژ (T۴۱۰om -۰۲) و ضخامت کاغذ (T۴۱۱ om -۰۵) انجام شده و از تقسیم گرماژ بر ضخامت اندازه‌گیری شده کاغذ، دانسیته محاسبه گردید. درصد ماندگاری کل در ماشین کاغذساز آزمایشگاهی نیز از نسبت بین جرم خشک کاغذ تولیدی به جرم خشک کل مواد به‌کاررفته در تولید کاغذ (مواد لیفی و افزودنی) محاسبه شد. یادآوری می‌شود که نانوالیاف سلولز در چهار سطح صفر (شاهد)، ۰/۱، ۰/۱۵ و ۰/۲ درصد بر اساس وزن خشک خمیرکاغذ مصرفی به‌صورت منفرد و نیز به همراه پلی دادماک مورد ارزیابی قرار گرفت. پلی دادماک نیز در چهار سطح صفر (شاهد)، ۰/۱، ۰/۱۵ و ۰/۲ درصد بر اساس وزن خشک خمیرکاغذ به‌صورت منفرد و نیز به همراه نانوالیاف سلولز استفاده گردید.

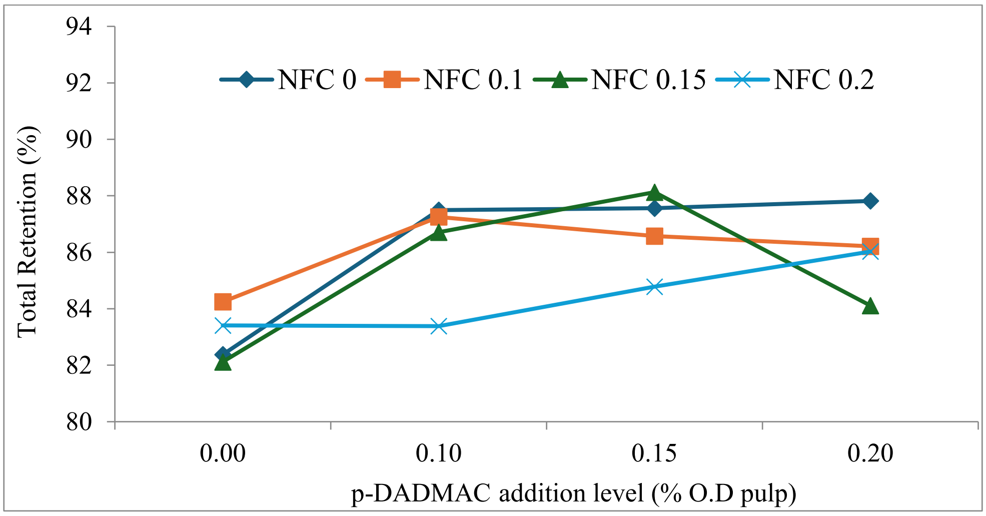
نتایج

در شکل‌های ۸-۲، نتایج استفاده از هر یک از پلیمرهای پلی دادماک و نانوالیاف سلولزی در سطوح مورد مطالعه و نیز کاربرد توأم آنها در خمیرکاغذ بازیافتی از آخال قهوه‌ای (OCC) ارائه شده است. تیمار شاهد نیز در سطح مصرف صفر پلی دادماک و خط روند صفر درصد NFC نمایان شده است. بررسی روند تغییرات بوجود آمده، حکایت از تأثیر پذیرفتن ویژگی‌های خمیرکاغذ و کاغذ بازیافتی از کاربرد پلیمرهای موردمطالعه در هر دو حالت افزودن منفرد و ترکیبی است.

ماندگاری کل خمیرکاغذ

برای اندازه‌گیری و رصد میزان حفظ الیاف و افزودنی‌های غیرلیفی در کاغذ و به‌عبارتی بهره‌وری تولید، از پارامتر ماندگاری کل استفاده می‌شود. بنابراین ماندگاری کل، معیاری از میزان کل مواد جامد باقی‌مانده شامل الیاف، نرمه‌ها و مواد افزودنی در کاغذ نهایی نسبت به وزن خشک مواد اولیه مصرف‌شده در ساخت کاغذ است (Baradaran Khaksaar *et al.*, 2023). همان‌گونه که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، درصد ماندگاری کل با افزایش میزان کاربرد منفرد p-DADMAC ارتقا معنی‌داری یافته و بیشترین میزان و درصد افزایش در ماندگاری کل نیز در پایین‌ترین سطح آن یعنی ۰/۱٪ پدید آمده (حدود ۶٪ بهبود ماندگاری و بهره‌وری تولید) و پس‌ازآن، افزایش میزان مصرف تغییر معنی‌داری را در ماندگاری کاغذ موجب نشده است. کاربرد منفرد نانوالیاف سلولز نیز افزایش ماندگاری را دربر داشته است. نانوالیاف سلولز با قرارگیری در فضای بین شبکه الیاف، افزایش اتصال و پیوندپذیری هیدروژنی و نیز تراکم و ماندگاری الیاف و

نرمه‌ها را به وجود می‌آورد. تغییر سازوکار ماندگاری- آبگیری از سامانه وصله‌زنی به سامانه مرکب مبتنی بر نانوالیاف نیز نه‌تنها هیچ‌گونه بهبود معنی‌داری را در ماندگاری به همراه نداشت، بلکه منجر به کاهش گاهی معنی‌دار ویژگی ماندگاری نیز گردید. همان‌گونه که در بخش مواد و روش‌ها اشاره شد، پس از افزودن p-DADMAC اعمال تنش برشی (هم زدن دوغاب خمیرکاغذ) منجر به شکستن فلاک‌های تشکیل شده توسط زنجیره پلیمری p-DADMAC می‌گردد که با توجه به ناهمگنی پلیمر دی آلیل دی متیل آمونیوم کلراید، پلیمر به قطعات شکسته‌شده با وزن مولکولی و طول زنجیره پلیمری متنوعی تبدیل و به‌دلیل پلی کاتیون بودن، بر سطوح اجزای دوغاب خمیرکاغذ، مسطح شده و می‌خوابد. درنتیجه از طول و شرایط مناسبی برای تشکیل دوباره فلاک و حفظ ماندگاری برخوردار نمی‌گردد. همچنین پلی کاتیون بودن این پلیمر و فراهم‌بودن نقاط متعدد واکنش با نانوالیاف آنیونی سلولز، احتمال هم انباشتگی و خنثی‌شدن دو افزودنی با یکدیگر را تقویت کرده و انتظار عملکرد ماندگاری را ابتر می‌نماید؛ بنابراین به نظر می‌رسد استفاده منفرد این پلیمر کاتیونی و عدم استفاده از نیروی برشی، به دلیل ایجاد و ثبات فلاک و به دام انداختن نرمه‌های الیاف، سبب افزایش ماندگاری می‌شود که در خط روند NFC 0 به‌خوبی آشکار شده است (شکل ۲).

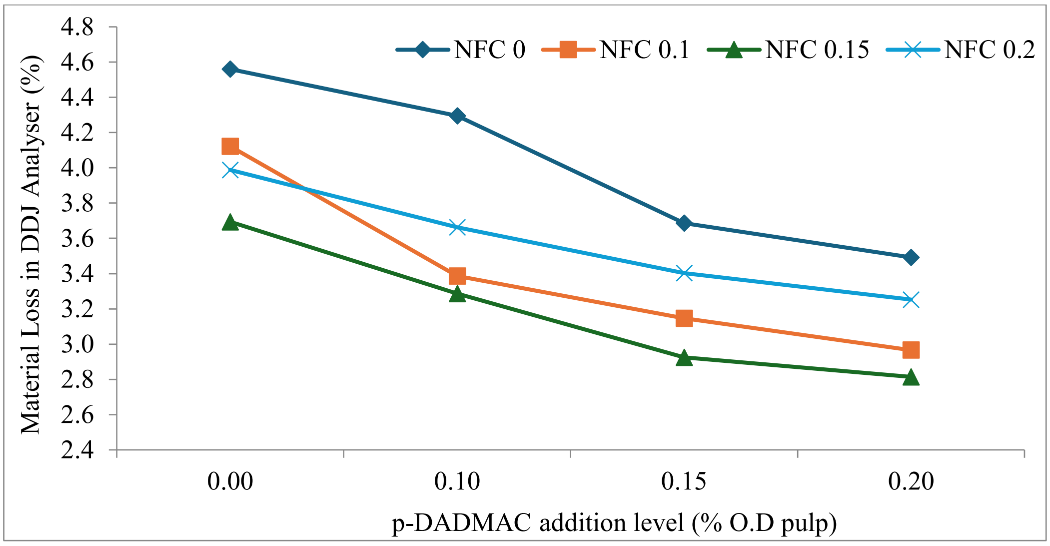


شکل ۲- تأثیر کمپلکس پلی دادماک و نانوسلولز بر درصد ماندگاری کل خمیرکاغذ بازیافتی از آخال OCC

Figure 2. Effect of p-DADMAC- nano cellulose complex on total retention of OCC recycled pulp

درصد اتلاف مواد در آزمونگر DDJ

با عنایت به اینکه پیگیری درصد مواد عبورکرده (درصد اتلاف مواد) از توری ماشین کاغذ آزمایشگاهی برای تحکیم استدلال‌های ارائه‌شده در بخش نتایج ماندگاری به‌راحتی میسر نیست، از شبیه‌سازی فرایند در دستگاه تحلیل‌گر آبگیری دینامیکی (DDJ) استفاده شد. همان‌گونه که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، کاربرد منفرد پلیمرکاتیونی p-DADMAC (سامانه وصله‌زنی) به‌طور معنی‌داری، میزان مواد عبورکرده از توری DDJ را کاهش داده است و کاربرد منفرد نانوالیاف نیز از درصد عبور و اتلاف مواد کاسته است. کاربرد توأمان دو بیوپلیمر مورد مطالعه در بیشتر موارد روندی را همانند ویژگی ماندگاری رصدشده در ماشین کاغذساز آزمایشگاهی رقم‌زده که در قالب کاهش اتلاف مواد قابل گزارش است. افزودن نانوالیاف پس از پلی دادماک نیز برشدت نگهداشت مواد بر روی توری افزوده است که در قالب کاهش اتلاف مواد قابل گزارش می‌باشد (شکل ۳).



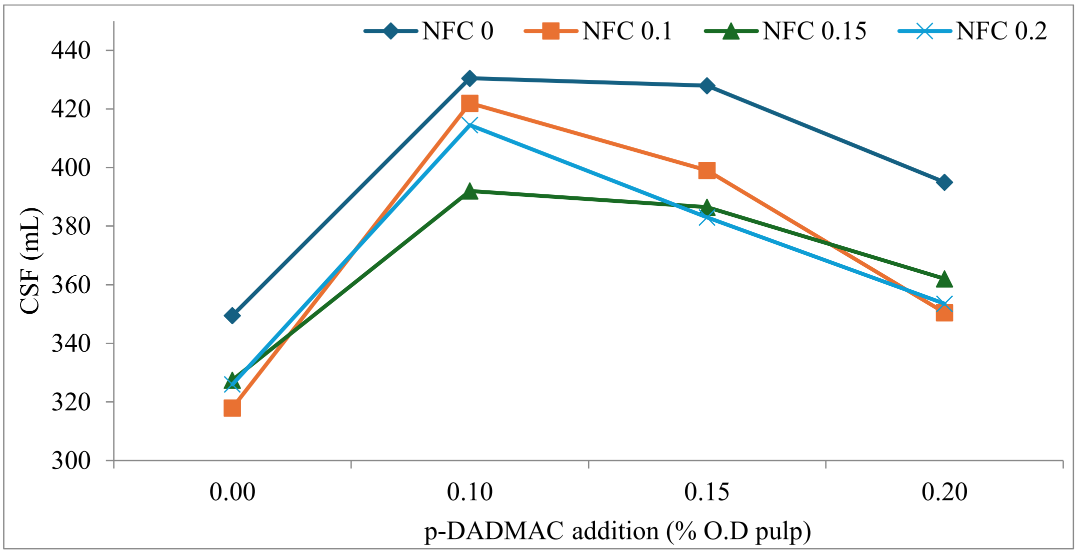
شکل ۳- تأثیر کمپلکس پلی دادماک و نانوسلولز بر درصد اتلاف مواد خمیرکاغذ بازیافتی از آخال OCC در دستگاه DDJ

Figure 3. Effect of p-DADMAC- nano cellulose complex on material loss of OCC recycled pulp in DDJ analyzer

درجه روانی خمیرکاغذ

آبگیری در ماشین کاغذ سوای از ماهیت الیاف، به میزان زیادی تحت تأثیر شدت و ساختار دلمه‌های (Floc) تشکیل‌شده بین اجزای سوسپانسیون و نیز سیستم ماندگاری است. افزایش توانایی آبگیری از خمیرکاغذ، مزایای بسیاری برای صنعت کاغذسازی به همراه دارد؛ زیرا امکان افزایش سرعت ماشین، افزایش تولید، کاهش مصرف انرژی در جعبه‌های مکشی، پرس‌ها و خشک‌کن‌ها و به‌طورکلی کاهش هزینه‌های تولید و افزایش بهره‌وری را فراهم می‌کند (Baradaran Khaksaar *et al.*, 2023; Cai, *et al.*, 2023; Chiani, *et al.*, 2023). تأثیرات اعمال سامانه‌های مورد مطالعه بر کیفیت آبگیری از خمیرکاغذ، در شکل ۴ آمده است. کاربرد منفرد p-DADMAC افزایش درجه روانی خمیرکاغذ از میانگین حدودی ۳۵۰ میلی‌لیتر در نمونه شاهد و فاقد هرگونه افزودنی به ۴۳۰ میلی‌لیتر در کمترین سطح کاربرد آن (۰/۱٪) را سبب شده است که تفسیرهای قبلاً گفته‌شده در مورد این پلیمر کاتیونی نیز صدق می‌نماید. بااین‌حال افزایش درصد کاربرد p-DADMAC، محبوس‌شدن بیشتر آب و افزایش کندی خمیرکاغذ را به‌همراه داشته و افت درجه روانی خمیرکاغذ به سطح ۳۹۵ میلی‌لیتر را رقم زده‌است. تشکیل فلاک‌هایی درشت و حجیم و دارای میزان بالاتری آب درگیرشده ناشی از ماهیت پلی‌کاتیونی بودن شدید این پلیمر و اتصال و نگهداشت مقدار زیادی از اجزای آنیونی سلولزی به‌صورت دلمه‌ای درشت، در سطوح بالاتر کاربرد قابل استدلال است. کاربرد منفرد نانوالیاف نیز 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 ویسکوزیته سوسپانسیون و قرارگیری نانوالیاف در حفره‌های شبکه الیاف سبب کاهش پیوستگی بین حفره‌ها و کاهش درجه روانی می‌شود (Tajik *et al.*, 2017). همچـنین احتم((ال گرفتگی کلی یا جزئی منافذ توری نیز قابل گزارش است. در مقایسه با عدم کاربرد نانوسلولز، کاربرد نانوالیاف سلولزی پس از ایجاد تنش برشی در دوغاب خمیرکاغذ بازیافتی حاوی پلیمر کاتیونی p-DADMAC اغلب از تأثیر معنی‌دار نامطلوب شدیدی بر درجه روانی برخوردار بوده و آبگیری را کندتر و سخت‌تر کرده است، جائی‌که درجه روانی خمیرکاغذ متأثر از سامانه مرکب p-DADMAC/نانوسلولز، برابر با خمیرکاغذ شاهد فاقد هرگونه افزودنی گردید، که در میان تمامی تیمارهای مورد

بررسی، استثنا و بی‌بدیل است (شکل ۴). با مراجعه به نتایج ماندگاری و DDJ تیمارهای سامانه مرکب این پلی الکترولیت، پدیده‌هایی دال بر کاهش ماندگاری گزارش گردید که ناشی از شکستن شدید فلاک‌ها در تنش برشی و تشکیل‌نشدن فلاک دوباره به همان سطح اولیه، پس از افزودن نانوسلولز است. بنابراین، اجزای پراکنده‌شده علاوه بر عبور از توری و کاهش ماندگاری و افزایش اتلاف مواد، موجبات انسداد مجاری و منافذ عبور آب را فراهم کرده و کاهش درجه روانی را رقم می‌زنند.



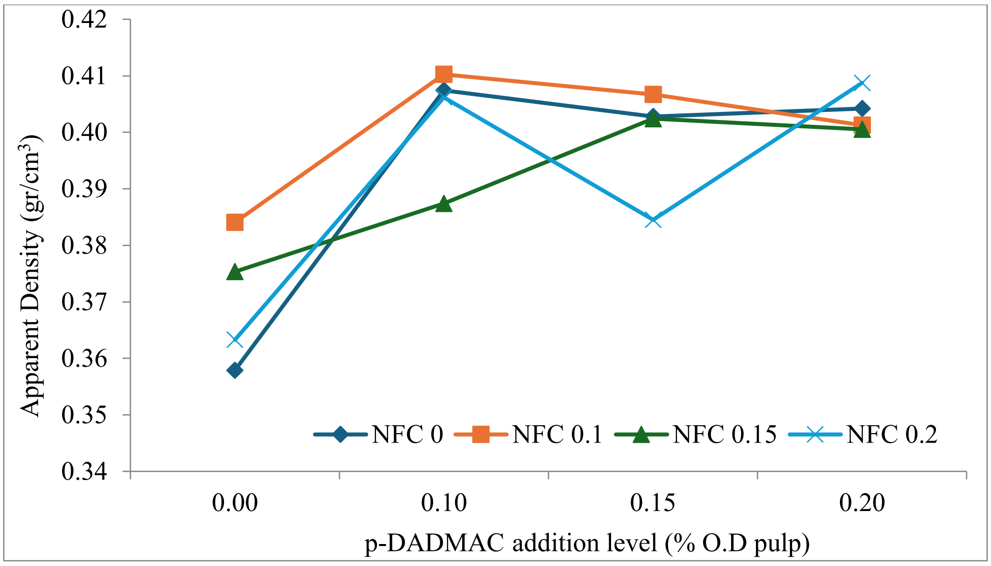
شکل ۴- تأثیر کمپلکس پلی دادماک و نانوسلولز بر درجه روانی CSF خمیرکاغذ بازیافتی از آخال OCC

Figure 4. Effect of p-DADMAC- nano cellulose complex on CSF freeness of OCC recycled pulp

دانسیته ظاهری کاغذ

دانسیته کاغذ ازجمله مهم‌ترین ویژگی‌های کاغذ به‌ویژه در کاربردهای بسته‌بندی محسوب می‌گردد. دانسیته کاغذ بر ویژگی‌های مدول‌الاستیسیته، مقاومت کششی و فشاری کاغذ تأثیرگذار بوده و در شبکه متراکم و با دانسیته بالای کاغذ، پیچ‌خوردگی و تابیدگی الیاف؛ کمتر بروز یافته و مقاومت کاغذ را در برابر تنش‌های خمشی نیز ارتقا می‌دهد (Baradaran & Khaksaar *et al.*, 2017). البته در مورد کاغذهای بسته‌بندی، دانسیته بسیار بالا نامناسب تلقی می‌گردد، زیرا منجر به کاهش سفتی خمشی شده و در فرایندهای تبدیلی کنگره‌سازی نیز منجر به پارگی در هنگام خیس‌شدن می‌گردد (Gullichsen & Paulapuro, 1999; Elyasi Bakhtyari *et al.*, 2015). دانسیته کاغذ با پالایش و نیز افزودن مواد شیمیایی افزایش یافته که از جنبه‌های مختلف مواد شیمیایی از برتری و رجحان برخوردار می‌باشد. همچنین افزایش ماندگاری اجزای دوغاب، به‌ویژه نرمه‌های الیاف منجر به افزایش دانسیته کاغذ تولیدی می‌گردد (Jalali Torshizi *et al.*, 2014). یادآوری می‌شود که افزایش دانسیته در ورقه در حال شکل‌گیری کاغذ، به انتقال مطلوب‌تر و بهینه حرارت در خشک‌کن نیز کمک می‌کند (Gullichsen & Paulapuro, 1999). همان‌گونه که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، کاربرد منفرد افزودنی p-DADMAC نیز به‌طور چشمگیر و معنی‌داری دانسیته ظاهری را ارتقا داده که افزایش سطح مصرف آن نیز تأثیر معنی‌داری بر این ویژگی ساختاری کاغذ نداشته است. کاربرد منفرد نانوالیاف نیز ارتقای دانسیته را به همراه داشته، اما افزایش مصرف آن از میزان دانسیته کاسته و کاغذی حجیم‌تر

را ارائه نموده که با داده‌های ماندگاری سازگار است. زیرا دررونـد مشابه، ماندگاری کاغذهای حاوی سطوح بالاتر کاربرد منفرد نانوالیاف، از میزان ماندگاری کمتری برخوردار شده‌اند. تبدیل سامانه ماندگاری–آبگیری مبتنی بر وصله‌زنی p-DADMAC به سامانه مرکب p-DADMAC/ نانوالیاف سلولزی، نیز غالباً از تأثیر معنی‌داری بر دانسیته برخوردار نشده (شکل ۵) و به عبارتی پلیمر کاتیونی مهم‌ترین نقش را در تغییرات این ویژگی ایفا نموده است.



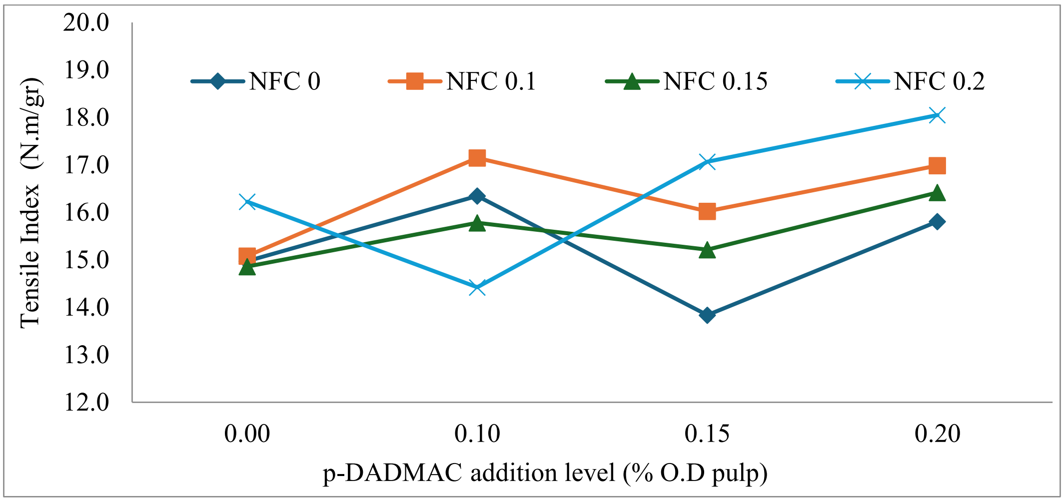
شکل ۵- تأثیر کمپلکس پلی دادماک و نانوسلولز بر دانسیته ظاهری کاغذ بازیافتی از آخال OCC

Figure 5. Effect of p-DADMAC- nano cellulose complex on apparent density of OCC recycled paper

مقاومت به کشش

مقاومت به کشش از مهم‌ترین ویژگی‌های کاربردی انواع کاغذ و مقواست که تحت تأثیر عواملی ازجمله مقاومت ذاتی الیاف، مقاومت پیوند بین الیاف، تعداد پیوند (سطح پیوندیافته) و کیفیت توزیع اجزا و شکل‌گیری کاغذ است (Khosravani *et al.*, 2014). از بین عوامل ذکر شده، نوع و میزان افزودنی‌های پایانه تر کاغذسازی بر نحوه توزیع اجزای دوغاب خمیرکاغذ و درپی آن شکل‌گیری کاغذ، تعداد و مقاومت پیوندها تأثیرگذار است که به‌دلیل نقش این مواد در تشکیل دلمه‌ها، آبگیری و پیوندیابی می‌باشد (Baradaran Khaksaar *et al.*, 2017). کاربرد منفرد p-DADMAC و افزایش درصد افزودن آن به خمیرکاغذ بازیافتی به‌طور نسبی تغییراتی را عمدتاً افزایشی اما محدود، در مقاومت به کشش کاغذ بازیافتی به وجود آورده است؛ که میزان آن در بهترین حالت (سطح ۰/۱٪) در حدود ۱۰ درصد بوده است (شکل ۶). همچنین یادآوری می‌شود که کاربرد منفرد نانوسلولز در سطح ۰/۲ درصد نیز حدود ۱۰٪ افزایش مقاومتی را به همراه داشته است. نانو الیاف سلولزی به دلیل سطح ویژه بالا و ایجاد درگیری فیزیکی با الیاف خمیرکاغذ، سبب افزایش تعداد پیوند هیدروژنی و افزایش سطح پیوند بین الیاف و استحکام بالاتر شبکه الیاف می‌گردد. Hassan و همکاران (۲۰۱۱) با کاربرد میکرو الیاف سلولزی در خمیرکاغذ باگاس، بهبود مقاومت خشک و تر کششی و کاهش مقاومت پارگی را گزارش نمودند. Hadilam و همکاران (۲۰۱۳) نیز با افزودن ۲۰ درصد نانوسلولز به خمیرکاغذ باگاس، شاهد افزایش مقاومت کششی بوده‌اند. در سایر سطوح پایین‌تر افزودن منفرد نانوالیاف، تأثیر ملموسی بر شاخص کشش مشاهده نشد، همان‌گونه که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، افزودن سطوح مختلف نانوسلولز نیز باتوجه به سطح کاربرد p-DADMAC تأثیراتی عمدتاً افزایشی را بر شاخص مقاومت به کشش

داشته، به‌طوری‌که در برخی موارد نسبت به کاربرد منفرد پلیمرکاتیونی افزایش و گاهی کاهش مقاومت مشاهده می‌شود.

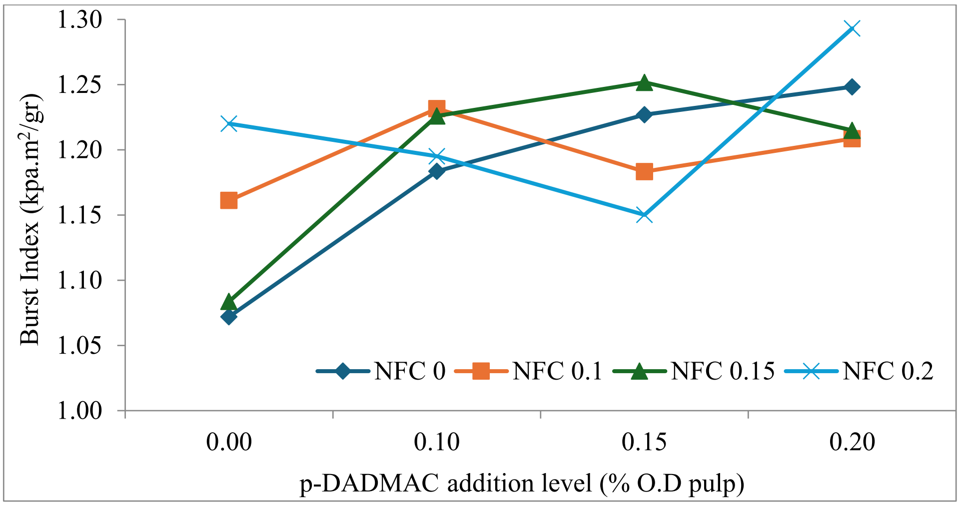


شکل ۶- تأثیر کمپلکس پلی دادماک و نانوسلولز بر شاخص مقاومت به کشش کاغذ بازیافتی از آخال OCC

Figure 6. Effect of p-DADMAC- nano cellulose complex on tensile strength of OCC recycled paper

مقاومت به ترکیدن

شاخص مقاومت به ترکیدن نیز از عواملی همانند مقاومت کششی کاغذ پیروی می‌کند (Chiaani *et al.*, 2018). شاخص مقاومت به ترکیدن با حضور p-DADMAC به‌طور معنی‌داری افزایش می‌یابد و ارتقایی در حدود بیش از ۱۵٪ را تجربه می‌نماید. با افزایش میزان کاربرد این پلیمر کاتیونی نیز روند بهبود مقاومتی ترکیدن حفظ و امتداد می‌یابد. همانند روند شاخص کششی کاغذ بازیافتی، افزودن منفرد نانوالیاف سلولز بهبود شاخص ترکیدن را سبب گردیده و در سطح کاربرد ۰/۲٪ نانو الیاف سلولزی، بیش از ۱۰٪ ارتقای شاخص کشش را به‌همراه داشته است. بااین‌حال، کاربرد نانوالیاف سلولزی پس از p-DADMAC هیچ‌گونه بهبود معنی‌داری را نسبت به کاربرد منفرد p-DADMAC به همراه نداشته و در برخی موارد منجر به کاهش معنی‌دار تأثیر بهبوددهندگی p-DADMAC کاتیونی نیز شده است (شکل ۷).



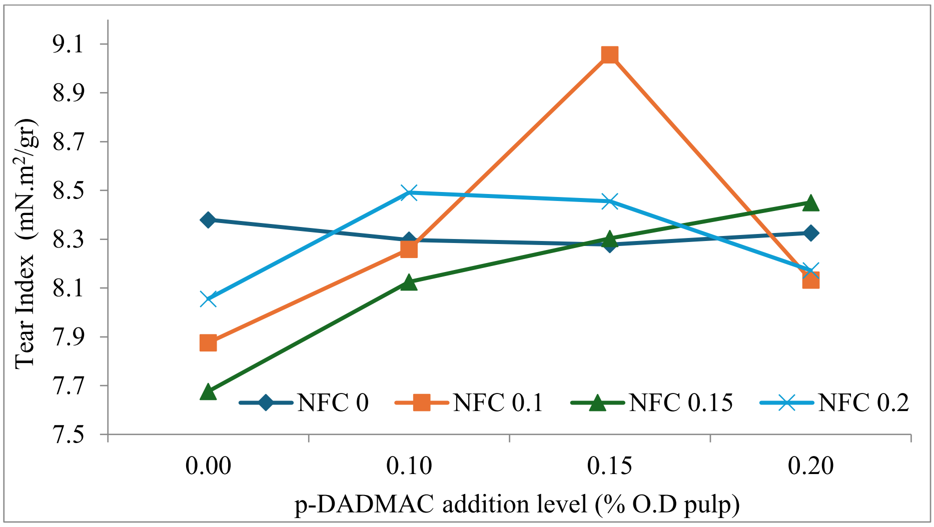
شکل ۷- تأثیر کمپلکس پلی دادماک و نانوسلولز بر شاخص مقاومت به ترکیدن کاغذ بازیافتی از آخال OCC

Figure 7. Effect of p-DADMAC- nano cellulose complex on burst strength of OCC recycled paper

مقاومت به پاره‌شدن

این ویژگی ازجمله پارامترهای مورد ارزیابی کیفی 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 (Tajik *et al.*, 2015) که البته میزان پیوندیابی اجزا و نیز جهت‌یافتگی آنها در ساختار کاغذ نیز تأثیرگذار می‌باشند. به‌طوری‌که در خمیرکاغذهایی با قابلیت پائین پیوندیابی و تحمل پائین به پالایش مانند خمیرکاغذهای مکانیکی، بهبود شاخص پارگی از طریق توسعه و افزایش پیوندها امکان‌پذیر است. اما در خمیرکاغذهای با میزان پیوندیابی زیاد، ویژگی‌های ذاتی الیاف عامل تعیین‌کننده بوده، بنابراین میانگین بلندتر طول و ضخامت بیشتر الیاف، مقاومت به پاره‌شدن مناسب‌تری را ارائه می‌دهد (Nakib Hossen *et al.*, 2024)؛ بنابراین انتظار می‌رود که حضور الیافی با میانگین طول و ضخامت کمتر در دوغاب خمیرکاغذ، کاهش این ویژگی را به‌همراه داشته باشد (González-Pérez *et al.*, 2021). همان‌گونه که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، در تمامی سطوح مختلف کاربرد منفرد نانوالیاف سلولز، شاخص پارگی کاغذ پایین‌تر از تیمار شاهد فاقد هرگونه افزودنی گزارش می‌گردد.

همچنین با درنظرگرفتن نتایج ماندگاری خمیرکاغذ (شکل ۲)، مشخص می‌گردد که میزان ماندگاری نیز در تیمارهای 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 را درپی داشته که به‌صورت تنزل شاخص پارگی کاغذ نمود می‌یابد. در حالت کاربرد منفرد p-DADMAC با وجود کاهش اندک شاخص پارگی، تأثیر معنی‌داری مشاهده نگردید. حضور نانوالیاف سلولزی پس از کاربرد p-DADMAC نیز با توجه به درصد افزودن هریک از افزودنی‌های مزبور، تأثیرات متفاوتی بر این ویژگی داشته است (شکل ۸). همانند دیگر پلیمرهای مورد مطالعه، سامانه‌های کمک ماندگاری-آبگیری مرکب مبتنی بر میکرو یا نانو ذرات/پلیمرهای کاتیونی با توجه به سطح مصرف افزودنی‌های مزبور و نیز ماهیت خمیرکاغذ و نیز شرایط فرایندی، شکل‌گیری دلمه‌هایی با استحکام و اندازه متفاوت را رقم خواهد زد که انرژی لازم برای گسیختن ساختار شبکه لیفی متنوع خواهد بود.



شکل ۸ - تأثیر کمپلکس پلی دادماک و نانوسلولز بر شاخص مقاومت به پاره‌شدن کاغذ بازیافتی از آخال OCC

Figure 8. Effect of p-DADMAC- nano cellulose complex on tear strength of OCC recycled paper

بحث

ضرورت بازیافت کاغذ از جنبه‌های مختلف زیست‌محیطی، اقتصادی و اجتماعی از یکسو و الزام به تأمین ویژگی‌های فرایند و فراورده تولیدی از سوی دیگر به افزایش استفاده از مواد افزودنی منجر گردیده است (Elyasi Bakhtyari *et al.*, 2017). استفاده از ذرات نانو هم از رویکردهای جدید در این زمینه بوده که البته در مقیاس تجاری با چالش‌هایی مانند هزینه بالاتر، قابلیت پراکندگی و ماندگاری پایین، برهمکنش‌های نامطلوب احتمالی، دانش ناکافی در رابطه با استفاده مؤثر از آنها و ... نیز مواجه است. با افزایش میزان کاربرد منفرد (سامانه وصله‌زنی) p-DADMAC، ویژگی درصد ماندگاری کل اجزای دوغاب خمیرکاغذ ارتقای معنی‌داری یافته و بیشترین میزان افزایش در ماندگاری کل نیز در پایین‌ترین سطح آن یعنی ۰/۱٪ پدید آمده (حدود ۶٪ بهبود ماندگاری و بهره‌وری تولید) و پس‌ازآن، افزایش میزان مصرف تغییر معنی‌داری را در ماندگاری کاغذ ندارد و میزان مواد عبورکرده از توری DDJ را کاهش داده است. چگالی بالای بار p-DADMAC آن را قادر می‌سازد تا مواد جامد معلق با ذرات کلوئیدی دارای بار آنیونی را به‌طور مؤثرتری جذب کرده و بر روی الیاف نگه دارد و علاوه بر اینکه بازدهی تولید را بهبود می‌بخشد، آلودگی آب‌های فرایندی و نیز پساب صنعت بازیافت کاغذ را کاهش دهد.

درجه روانی خمیرکاغذ از ۳۵۰ میلی‌لیتر در نمونه شاهد و فاقد هرگونه افزودنی به ۴۳۰ میلی‌لیتر در کمترین سطح کاربرد آن (۰/۱٪) را سبب شده است که حکایت از نقش بارز دلمه‌سازی این پلیمر کاتیونی دارد. کاربرد منفرد افزودنی p-DADMAC نیز به‌طور چشمگیر و معنی‌داری دانسیته ظاهری را ارتقا داده که افزایش سطح مصرف آن نیز تأثیر معنی‌داری بر این ویژگی ساختاری کاغذ نداشته‌است. به‌طور نسبی تغییرات مقاومتی عمدتاً افزایشی اما محدود، در مقاومت به کشش کاغذ بازیافتی به وجود آورده است؛ که میزان آن در بهترین حالت (سطح ۰/۱٪) در حدود ۱۰ درصد بوده است. شاخص مقاومت به ترکیدن با حضور p-DADMAC به‌طور معنی‌داری افزایش می‌یابد و ارتقایی در حدود بیش از ۱۵٪ را تجربه می‌نماید. با افزایش میزان کاربرد این پلیمر کاتیونی نیز روند بهبود مقاومتی ترکیدن حفظ و امتداد می‌یابد. کاربرد منفرد نانوالیاف سلولزی نیز افزایش در ماندگاری خمیرکاغذ، دانسیته شاخص‌های کشش و ترکیدن کاغذ؛ کاهش درجه روانی و اتلاف مواد از خمیرکاغذ و نیز افت شاخص پارگی را سبب می‌گردد. سطح بهینه مصرف

منفرد نانوبیوپلیمر سلولزی، ۰/۲٪ گزارش می‌گردد که کمترین افت شاخص پارگی و غالباً بیشترین بهبود را در سایر ویژگی‌های موردمطالعه به همراه داشته است. افزودن نانوالیاف پس از پلی–دادماک نیز بر ماندگاری روی توری افزوده است که در قالب کاهش اتلاف مواد قابل گزارش است. کاربرد نانوالیاف سلولزی پس از ایجاد تنش برشی در دوغاب خمیرکاغذ بازیافتی حاوی پلیمر کاتیونی p-DADMAC اغلب از تأثیر معنی‌داری نامطلوب شدیدی بر درجه روانی برخوردار بوده و آبگیری را کندتر و سخت‌تر نموده است، تا جایی درجه‌روانی خمیرکاغذ متأثر از سامانه مرکب p-DADMAC/نانوسلولز، برابر با خمیرکاغذ شاهد فاقد هرگونه افزودنی گردید که در میان تمامی تیمارهای مورد بررسی، استثنا و بی‌بدیل است. با توجه به درصد افزودن هریک از افزودنی‌های مزبور، تأثیرات متفاوتی بر ویژگی‌های مقاومتی ترکیدن و پارگی داشته است. کاربرد نانوالیاف سلولزی پس از p-DADMAC هیچ‌گونه بهبود معنی‌داری را نسبت به کاربرد منفرد p-DADMAC به همراه نداشته و در برخی موارد منجر به کاهش معنی‌دار تأثیر بهبوددهندگی p-DADMAC کاتیونی نیز شده است. به‌طوری‌که در حالت کاربرد منفرد p-DADMAC با وجود کاهش اندک شاخص پارگی، تأثیر معنی‌داری مشاهده نشد.

References

-Ahmadi Lajimi, A. Azadfallah, M. Hamzeh, Y. and Rahmaninia, M., 2020. Effect of cationic polyDADMAC-based fixing agent on strength properties of OCC pulp. Iranian Journal of Wood and Paper Industries, 10(4): 605-616.

-Askarabadi, S. A., Talaeipour, M., Jalali Torshizi, H., and 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. https://doi.org/10.15376/biores.20.4.8993-9007

-Baradaran Khaksar, A., Jalali Torshizi, H. and E. Rasooly Garmaroody, 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.

-Baradaran Khaksaar, A., Jalali Torshizi, H. and 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. https://doi.org/10.1007/s12649-022-01912-9

-Cai, H., Sha, J., Lu, C., Qiu, W., Liu, J. and Liu, Y., 2023. High Performance of paper strength and energy savings in occ pulp papermaking via MFC addition. Paper & Biomaterials, 8(2): 66-77. https://doi.org/10.26599/pbm.2023.9260010

-Chiaani, E., Jalali Torshizi, H., Rudi H. and 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.

-Chiani, E., Jalali Torshizi, H., Ashori, A., Rudi, H. and 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. https://doi.org/10.1177/08927057241271760

-Elyasi Bakhtyari, S., Jalali Torshizi, H. and Resalati, H., 2015. Investigation on the effect of different levels of alum consumption in alun-rosin sizing on the properties of paperboard. Journal of forest and wood products, 69 (2): 375-385.

-Elyasi Bakhtyari, S. and 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.

-González-Pérez, M.M., Manríquez-González, R., Robledo-Ortíz, J.R., Silva-Guzmán, J.A., de Muniz, G.I.B. and 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. https://doi.org/10.1080/15440478.2021.1982820

-Gullichsen, J. and Paulapuro, H., 1999. Papermaking Chemistry, Papermaking science and technology 19 series, 229 p.

-Hadilam, M.M., Afra, E. and Yousefi, H., 2013. Effect of Cellulose nanofibers on the properties of bagasse paper, Journal of Forest and Wood Products 66(3): 351-366.

-Hassan, E.A., Hassan, M.L. and Oksman, K., 2011. Improvement of paper sheets properties of bagasse pulp with microfibrillated cellulose isolated from *xylanase* treated bagasse. Wood and Fiber Science, 43(1):1-7.

-Khosravani, A., Jahan Latibari, A., Mirshokraei, A., Rahmania, M. and Nazhad, M., 2010. Studying the effect cationic starch- anionic Nano silica system on detention and drainage. Bioresearches, 5(2): 939-950. https://doi.org/10.15376/biores.5.2.939-950

-Jalali Torshizi, H., Jahan-Latibari, A., Mirshokraei, S.A. and 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.

-Jalali Torshizi, H., Mirshokraie, S.A., Faezipour, M., Hamzeh, Y. and Resalati, H., 2010. Application of Galbanum gum 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 23 (4): 345-353.

-Jalali Torshizi, H. Zare Bidok, S., Ramezani, O. and 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. https://doi.org/10.22092/ijwpr.2014.7544

-Jalali Torshizi, H. Zare Bidok, S., Ramezani, O. and 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.

-Lindstrom, T., Wagberg, L. and 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, Sept. 2005, p 457- 562. https://doi.org/10.15376/frc.2005.1.457

-Nakib Hossen, M., Mostafizur Rahman, M., Islam, S. and Sarwar Jahan, M., 2024. Alkaline treatment and fractionation of OCC for strength improvement. Nordic Pulp & Paper Research Journal, 39(3): 493-499. https://doi.org/10.1515/npprj-2024-0008

-Pourkarim Dodangeh, H., Jalali Torshizi, H., Rudi, H. and 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.

-Pourkarim Dodangeh, H. and 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.

-Tajik, M., Kiaei, M. and 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.

-Tajik, M., Resalati, H., Hamzeh, Y., Jalali Torshizi, H., Kermanian, H. and Kord B., 2017. Effect of cationic nanofibrillated cellulose and nanofibrillated cellulose-cationic starch on properties of soda bagasse pulp. Forest and Wood Products, 70 (3): 529-537. https://doi.org/10.15376/biores.11.4.9126-9141

-Wu, C., Bing, L., Li, S., Yu, D. and Wang, D., 2016. Effect of coagulating agents on lignin and oligosaccharide contents in pre-hydrolysis liquor obtained in the production of dissolving pulp from poplar Residual Slabs. Bioresources, 11(1): 87-94. https://doi.org/10.15376/biores.11.1.87-94

-Yang, J., Huang, L., Ni, Y., Chen, L. and Miao, Q., 2021. Nano-SiO2 used with cationic polymer to improve the strength of sack paper. BioResources 16(2): 3348-3359. https://doi.org/10.15376/biores.16.2.3348-3359