



University of Tehran

Effect of poly-DADMAC and polyacrylamide additives on the optical and mechanical properties of chemi-mechanical pulps

Ramin Vaysi^{1*} | Hatef Heydari² | Majid Kiaei³

1. Corresponding Author, Department of Wood and Paper Science and Technology, Chalous Branch, Islamic Azad University, Chalous, Iran. Email: vaysi_r452@iau.ac.ir

2. Department of Wood and Paper Science and Technology, Chalous Branch, Islamic Azad University, Chalous, Iran. Email: h.heidary@cbi.ir

3. Department of Wood and Paper Science and Technology, Chalous Branch, Islamic Azad University, Chalous, Iran. Email: mjd_kia59@iau.ac.ir

ARTICLE INFO

Article type:

Research Article

Article History:

Received: 13 January 2025

Revised: 17 March 2025

Accepted: 14 May 2025

Published online: 17 June 2025

Keywords:

CMP pulp,
Optical and strength properties,
Poly DADMAC,
Polyacrylamide.

ABSTRACT

This study evaluated the effects of poly-DADMAC and polyacrylamide on the optical and mechanical properties of chemi-mechanical pulp (CMP). Bleached CMP samples were obtained from Mazandaran Wood and Paper Industries (MWPI) and used as the control. Poly-DADMAC was applied in powder form at four levels: 0%, 0.3%, 0.5%, and 0.7%. Polyacrylamide was added to pulp suspensions at concentrations of 0%, 0.25%, 0.5%, and 0.75%. Hand-sheets with a basis weight of 60 g/m² were prepared from the treated pulps. Optical and mechanical properties were measured according to TAPPI standard methods. Results showed that poly-DADMAC increased brightness, opacity, a* value, breaking length, and tensile and tear strengths, while decreasing yellowness and greenness. Increasing polyacrylamide content improved a* value, opacity, yellowness, tear strength, burst strength, and tensile strength, but reduced brightness and water absorption. The simultaneous addition of poly-DADMAC and polyacrylamide enhanced brightness, opacity, a* value, burst strength, tear strength, tensile strength, and breaking length, while decreasing yellowness, greenness, and water absorption. Among the tested combinations, the simultaneous addition of 0.7% poly-DADMAC with 0.25% or 0.75% polyacrylamide produced the most significant improvements in paper properties, indicating this treatment as the most effective.

Cite this article: Vaysi, R., Heydari, H., Kiaei, M. (2025). Effect of poly-DADMAC and polyacrylamide additives on the optical and mechanical properties of chemi-mechanical pulps. *Journal of Forest and Wood Products*, 78 (1), 63-75. DOI: <http://doi.org/10.22059/jfwp.2025.387836.1320>



© The Author(s) **Publisher:** University of Tehran Press.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jfwp.2025.387836.1320>



دانشگاه تهران

نشریه جنگل و فرآورده‌های چوب

شاپا الکترونیکی: ۲۳۸۳-۰۵۳۰

سایت نشریه: <https://jfwf.ut.ac.ir>

تأثیر افزودنی‌های پلی‌دادمک و پلی‌آکریلامید بر ویژگی‌های نوری و مقاومتی خمیر کاغذ شیمیایی-مکانیکی

رامین ویسی^{۱*} | هاتف حیدری^۲ | مجید کیایی^۳

۱. نویسنده مسئول، گروه صنایع چوب و کاغذ، واحد چالوس، دانشگاه آزاد اسلامی، ایران. رایانامه: vaysi_r452@iau.ac.ir

۲. گروه صنایع چوب و کاغذ، واحد چالوس، دانشگاه آزاد اسلامی، ایران. رایانامه: h.heidary@cbi.ir

۳. گروه صنایع چوب و کاغذ، واحد چالوس، دانشگاه آزاد اسلامی، ایران. رایانامه: mjd_kia59@iau.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

این تحقیق با هدف تأثیر افزودن پلی‌دادمک و پلی‌آکریلامید بر ویژگی‌های نوری و مقاومتی خمیر کاغذ شیمیایی-مکانیکی (CMP) انجام شد. به همین منظور، ابتدا خمیر کاغذ شیمیایی-مکانیکی رنگبری شده شرکت صنایع چوب و کاغذ مازندران به‌عنوان نمونه شاهد انتخاب شد. سپس پلی‌دادمک در ۴ سطح ۰، ۰/۳، ۰/۵ و ۰/۷ درصد استفاده گردید. همچنین پلی‌آکریلامید در ۴ سطح ۰، ۰/۲۵، ۰/۵ و ۰/۷۵ درصد به سوسپانسیون خمیر کاغذ حاصل اضافه شد. از خمیر کاغذهای مذکور، کاغذهایی با وزن پایه ۶۰ گرم بر متر مربع تهیه و خواص نوری و مقاومتی آنها طبق آزمون‌های استاندارد TAPPI اندازه‌گیری و مقایسه گردید. نتایج نشان داد که با افزودن پلی‌دادمک به خمیر کاغذ روشنی، ماتی، فاکتور *a، طول پارگی، مقاومت کششی و مقاومت به پارگی افزایش و زردی و سبز رنگی کاهش یافت. به‌علاوه، نتایج نشان داد که با افزودن پلی‌آکریلامید به خمیر کاغذ نیز فاکتور *a، ماتی، زردی، مقاومت به پارگی، طول پارگی، مقاومت به ترک‌کندن و مقاومت به کششی در کاغذ حاصل افزایش یافت، اما روشنی و جذب آب، کاهش داشته است. با افزودن همزمان پلی‌دادمک و پلی‌آکریلامید به خمیر کاغذ روشنی، ماتی، فاکتور *a، مقاومت به ترک‌کندن، مقاومت به پارگی، مقاومت کششی و طول پارگی افزایش مناسبی را نشان داد، اما زردی، جذب آب و سبز رنگی کاغذ حاصل کاهش یافت. به‌طوری‌کل، افزودن همزمان ۰/۷ درصد پلی‌دادمک به‌همراه ۰/۲۵ و ۰/۷۵ درصد پلی‌آکریلامید به خمیر کاغذ موجب بهبود اغلب ویژگی‌ها در کاغذ حاصل از خمیر کاغذ شده است، که می‌توان آنها را به‌عنوان تیمار برتر انتخاب و معرفی کرد.

نوع مقاله:

پژوهشی

تاریخ‌های مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۲۴

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۲/۲۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۲/۲۴

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۳/۲۷

کلیدواژه:

پلی‌آکریلامید،

پلی‌دادمک،

خمیر کاغذ CMP،

ویژگی‌های نوری و مقاومتی.

استاد: ویسی؛ رامین، حیدری؛ هاتف، کیایی؛ مجید (۱۴۰۴). تأثیر افزودنی‌های پلی‌دادمک و پلی‌آکریلامید بر ویژگی‌های نوری و مقاومتی خمیر کاغذ شیمیایی-مکانیکی. نشریه جنگل و

فرآورده‌های چوب، ۷۸ (۱)، ۶۳-۷۵. DOI: <https://doi.org/10.22059/jfwf.2025.387836.1320>

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

© نویسندگان.

<https://doi.org/10.22059/jfwf.2025.387836.1320>



۱. مقدمه

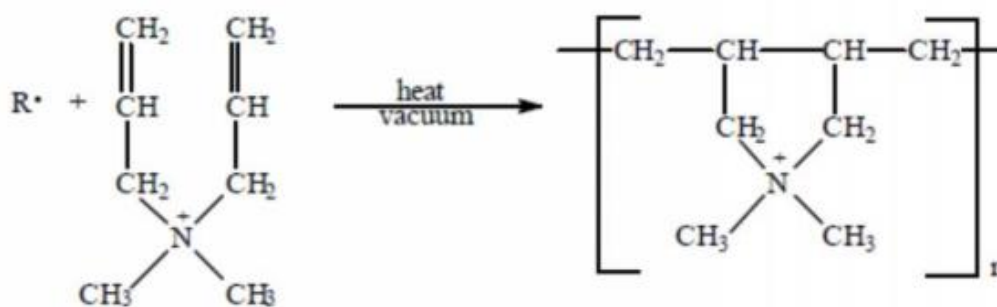
امروزه با افزایش جمعیت، افزایش تقاضای مصرف کاغذ و مقوا و همچنین محدودیت بیشتر مواد اولیه مصرفی تولید کاغذ از خمیر کاغذهای پر بازده^۱ و مکانیکی^۲، جایگاه ویژه و طرفداران خاص خود را پیدا کرده است. این خمیر کاغذها پربازده (راندمان بالا) هستند و راندمان بیش از ۸۵ درصد دارند و مقدار ماده چوبی حل شده در آنها کمتر از خمیرهای شیمیایی و نیمه‌شیمیایی است، اما به‌علت وجود لیگنین، مواد عصاره‌ای و یون‌های فلزی موجود در این خمیر کاغذها، مصرف آنها را به زمان‌های کوتاه‌مدت محدود کرده است و در طولانی‌مدت دچار برگشت روشنی و زردشدگی نوری^۳ می‌شوند. خمیر شیمیایی - مکانیکی (CMP)، معمولاً به‌وسیله چند نوع تیمار تولید می‌شود. این خمیر کاغذها بازدهی حدود ۹۰-۸۰ درصد دارند. در فرآیند CMP، زمان و دمای بیشتری (در مقایسه با روش CTMP) برای پیش‌تیمار نیاز می‌باشد. در این روش، خرده چوب‌ها در یک یا دو مرحله و در دمای کمتر از ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد، پیش‌تیمار می‌شوند. سپس تیمار با مواد شیمیایی سولفیت سدیم (Na_2SO_3) در دمای بالای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد انجام می‌شود. بعد از پخت، از عملیات پالایش در فشار اتمسفر در یک مرحله (برای درجه روانی بیشتر) یا دو مرحله (برای درجه روانی کمتر) استفاده می‌شود. به‌علت استفاده بیشتر مواد شیمیایی، کیفیت خمیر حاصل، بهتر از خمیر کاغذ CTMP می‌باشد. درجه روانی نهایی خمیر CMP، حدود ۳۰۰-۴۰۰ CSF می‌باشد.

خمیر کاغذهای مکانیکی و شیمیایی - مکانیکی در مقایسه با خمیر کاغذهای شیمیایی به‌دلیل تخریب بیشتر در الیاف، متوسط طول الیاف کمتر، نرمه‌های بیشتر و ماندگاری کمتر نرمه‌ها و پرکننده‌ها، لیگنین باقی‌مانده بیشتر و ویژگی‌های مقاومتی کمتر در ساخت کاغذهای با کیفیت و با دوام، از مطلوبیت کمتری برخوردار هستند. اما به‌دلیل بازدهی بیشتر و خصوصیات چاپ‌پذیری بهتر، از این خمیر کاغذها معمولاً برای تولید کاغذهای روزنامه، چاپ و تحریر مدارس و مقوا استفاده می‌گردد. در این راستا، در کارخانه چوب و کاغذ مازندران، سالیانه حدود ۵۲ هزار تن کاغذ روزنامه و ۳۸ هزار تن کاغذ چاپ و تحریر (سفارشی) و از خمیر کاغذ شیمیایی - مکانیکی و از چوب‌های مرمر، راش و صنوبر تولید می‌گردد، اما با عنایت به طرح تنفس جنگل در سال‌های اخیر، در حال حاضر، خمیر کاغذ شیمیایی - مکانیکی در این شرکت از حدود ۵۰ درصد غان، ۲۰ درصد صنوبر و حدود ۳۰ درصد مخلوط سایر گونه‌های چوبی تولید می‌شود. برای بهبود قابلیت حرکت‌پذیری کاغذ در حین تولید و چاپ، نیاز به به‌کارگیری حدود ۱۵ درصد الیاف بلند وارداتی است. این خمیر کاغذ وارداتی که معمولاً خمیر کاغذ کرافت سوزنی برگ است و از سایر کشورها (فنلاند) وارد می‌شود، ضمن ایجاد وابستگی، سالیانه باعث صرف و خروج مقادیر زیادی ارز از کشور می‌گردد [۱]. همچنین برای بهبود ویژگی‌های نوری و چاپ‌پذیری و کاهش قیمت تمام شده کاغذ نهایی، حدود ۵ تا ۱۵ درصد افزودنی‌های غیر فیبری (پرکننده‌ها)^۴ در مخزن اختلاط به این خمیر کاغذها افزوده می‌گردد. اکثر این افزودنی‌ها دارای بار الکتریکی منفی (آنیونی) هستند و در روی الیاف خمیر کاغذ به‌خوبی تثبیت نمی‌شوند و می‌توانند به‌راحتی همراه با آب سفید^۵ از کاغذ تر^۶ در حال شکل‌گیری بر روی توری ماشین کاغذسازی خارج شود. همچنین نرمه‌های (Fines) موجود در خمیر کاغذ که از ساختار سلول‌های چوبی مانند پارانشیم‌ها و یا بعداز پالایش الیاف خمیر کاغذ و بعد از پمپ‌ها تولید و به دوغاب (استاک) افزوده می‌گردند، نیز دارای بار الکتریکی منفی هستند. برای تثبیت و نگهداری^۷ پرکننده‌ها و نرمه‌های بر روی الیاف خمیر کاغذ، نیاز به افزودنی‌هایی با بار مثبت می‌باشد تا بتوان پرکننده‌ها و نرمه‌های دارای بار آنیونی (منفی) را بر روی الیاف خمیر کاغذ تثبیت کرد و مانع از خروج این نرمه‌ها و پرکننده‌ها از توری ماشین کاغذ به داخل آب سفید شد. معرفی افزودنی‌های کاتیونی (با بار الکتریکی مثبت) جدید مانند پلی‌دامگ، نانوکیتوزان، پلی‌آلومینیم کلراید (PAC) و پلی‌آکریلامید، جهت به‌کارگیری در پایانه مرطوب^۸ صنعت کاغذسازی، در کنار آلوم و نشاسته کاتیونی چندین سال مورد استفاده قرار گرفته است. این مواد در داخل دوغاب خمیر کاغذ یا استاک (Stock) و نقشی که می‌توانند در بهبود ماندگاری و ویژگی‌های نوری و مقاومتی کاغذ حاصل از خمیر کاغذ شیمیایی - مکانیکی داشته باشند، باعث گردید تا در این تحقیق مورد بررسی

^۱High- yield pulps^۲Mechanical pulps^۳Photo-yellowing^۴Fillers^۵White water^۶Wet web^۷Retention^۸Wet-end section

و توجه ویژه قرار گیرند.

در این راستا، پلی‌دادمک یا پلی دی آلیل دی متیل آمونیوم کلرید، به صورت کوتاه Poly-DADMAC (PolyDDA)، یک ترکیب شیمیایی با فرمول $(C_8H_{16}NCL)_n$ و با جرم مولی متغیر می‌باشد که در تصفیه فاضلاب به عنوان یک ماده منعقدکننده آلی اولیه و خنثی کننده مواد کلوئیدی دارای بار الکتریکی منفی استفاده می‌شود و در مقایسه با منعقدکننده‌های معدنی، حجم لجن را بیشتر کاهش می‌دهد. پلی‌دادمک (شکل ۱- راست)، از واکنش پلیمریزاسیون رادیکالی دی آلیل دی متیل آمونیوم کلراید در حضور یک شروع کننده، سنتز می‌شود [۲].



شکل ۱. ساختار شیمیایی پلی‌دادمک [۲].

از طرف دیگر، یکی از مواد کمک نگهدارنده پلی‌آکریلامید کاتیونی با نام تجاری Degussa می‌باشد. این پلی‌اکترولیت بر پایه پلیمرهای اکریلیک بوده و دارای وزن مولکولی زیاد و بار کاتیونی متوسط می‌باشد. پلی‌آکریلامید^۱ که مختصراً به آن PAA نیز گفته می‌شود، پلیمری متشکل از مونومرهای آکریلامید است که از انتها به یکدیگر متصل شده‌اند. پلی‌آکریلامید در دمای اتاق به صورت جامد شیشه‌ای است و به دلیل تفاوت در روش های تولید، این محصول می‌تواند به صورت پودر سفید، دانه‌های شفاف و ورقه ورقه تولید شود [۳].

پلی‌آکریلامید پایداری حرارتی خوبی دارد و در آب محلول است. محلول آبی این ترکیب، روشن و شفاف است و با افزایش وزن مولکولی پلیمر، ویسکوزیته آن افزایش می‌یابد. PAA یکی از پرمصرف‌ترین گونه‌های پلیمری محلول در آب است، که تعداد زیادی گروه‌های آمید آزاد در ساختار مولکولی آن وجود دارد. گروه آمید، فعالیت شیمیایی بالایی دارد و می‌تواند یک سری مشتقات را با انواع مختلفی از ترکیبات تشکیل دهد. پلی‌آکریلامید، کاربرد وسیعی در صنعت کاغذسازی به عنوان ماده کمک آگیری دارد. به عنوان سیستم پلیمری منفرد، نقش سستی آن بهبود آگیری با استفاده از سازوکار پل زنی است. مقایسه بین سیستم پلی‌آکریلامید ساده و سیستم مرکب پلی‌آکریلامید/بتونیت در خمیر کاغذ بکر نشان داد که مقدار پلیمر مورد نیاز برای رسیدن به میزان آگیری مشخص، در حالت مرکب تقریباً نصف است [۳].

به منظور کاهش هدر رفت مواد اولیه فیبری (نرمه‌ها) و نیز افزودنی‌های غیر فیبری افزوده شده به سوسپانسیون کاغذسازی، از افزودنی‌های کاتیونی استفاده می‌گردد؛ که نهایتاً منجر به کاهش ورود این مواد آلی به آب‌های فرآیندی، کاهش هزینه مواد اولیه فیبری و غیرفیبری، کاهش مشکلات آلاینده‌گی پساب و نیز کمک به آگیری بیشتر و سریع‌تر از نمد کاغذ در حال شکل‌گیری و در نتیجه افزایش سرعت تولید می‌شود. به عبارت دیگر، با افزودن نشاسته کاتیونی یا پلی‌آکریلامید کاتیونی در سامانه‌های خمیر کاغذی (استاک) و بررسی عملکرد این مواد، می‌توان راهکارهای مناسبی در جهت افزایش مقدار تولید، بهبود کیفیت فرآورده و کاهش مشکلات محیط زیستی ناشی از پساب‌های واحدهای با آلاینده‌گی زیاد را ارائه نمود.

در این راستا، Heydari و همکاران (۲۰۲۴) تأثیر استفاده از پلی‌آکریلامید و نانوکیتوزان بر ویژگی‌های مقاومتی خمیر کاغذ شیمیایی- مکانیکی را بررسی و گزارش دادند که با افزودن هم‌زمان پلی‌آکریلامید و کیتوزان به خمیر کاغذ شیمیایی- مکانیکی، روشنی، جذب آب و سبز رنگی کاغذ حاصل کاهش، ولی ماتی، مقاومت به ترک‌یدن، مقاومت به پارگی و مقاومت به عبور هوا افزایش

^۱Polyacrylamide

مناسبی را نشان داد. به‌طوری کلی، افزودن ۲ درصد نانو کیتوزان (جداگانه)، ۰/۵ درصد پلی‌آکریلامید (جداگانه) و همچنین افزودن همزمان یک درصد کیتوزان و ۰/۵ درصد پلی‌آکریلامید به خمیر کاغذ CMP، باعث بهبود اکثر ویژگی‌ها در کاغذ حاصل از خمیر کاغذ CMP شده است، که می‌توان آنها را به‌عنوان تیمار برتر انتخاب و معرفی کرد [۴]. Rezazadeh و همکاران (۲۰۲۱) با بررسی تأثیر افزودن پلی‌آلومینیم کلراید (PAC) و نانوکیتوزان به خمیر CMP گزارش داد که با افزودن یک درصد پلی‌آلومینیم کلراید (PAC)، ۲ درصد کیتوزان (جداگانه) و همچنین افزودن همزمان ۲ درصد کیتوزان و ۱/۵ درصد پلی‌آلومینیم کلراید (PAC) به خمیر کاغذ CMP باعث بهبود اکثر ویژگی‌ها در کاغذ حاصل شده است [۵]. Ahmadi Lajimi و همکاران (۲۰۲۰) با بررسی تأثیر ماده تثبیت‌کننده کاتیونی بر پایه پلی‌دادمک بر ویژگی‌های مقاومتی خمیر کاغذ OCC گزارش دادند که این پلیمر کاتیونی احتمالاً با متأثر ساختن شکل‌گیری و پیوندیابی بین الیاف با خنثی‌سازی و تثبیت و دلمه کردن نرمه‌ها باعث بهبود ویژگی‌های مقاومتی کاغذ دست‌ساز شده است، این افزایش در مقاومت به کشش، مقاومت به ترکیدن، مقاومت به فشار لهیدگی لبه در حالت حلقه، مقاومت به فشار لبه میانی و مقاومت به پاره شدن محسوس می‌باشد [۶]. Kim و همکاران (۲۰۱۵) رفتار پلی‌دادمک را در پنج سطح ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ درصد به‌همراه پلی‌آلومینیم کلراید در سه سطح ۱، ۲ و ۳ درصد در کنترل مواد چسبی بر پایه آمولسیون پلی‌وینیل استات بررسی کردند و گزارش دادند که این پلیمرهای کاتیونی سبب کنترل مواد چسبناک میکرو شده است، اما با افزایش مقادیر پلیمرهای کاتیونی مجدداً میزان رسوبات مواد چسبناک افزایش می‌یابد [۷].

Rashidi Joybari و همکاران (۲۰۱۵) تأثیر کاتیونی کردن الیاف سوزنی برگ توسط EPTMAC^۱ و اختلاط آن با خمیر کاغذ CMP را بررسی کردند. نتایج این تحقیق نشان داد اختلاط الیاف بلند کاتیونی شده با خمیر کاغذ CMP، خواص مقاومتی و ماندگاری نرمه‌ها را افزایش می‌دهد [۸]. Wang و همکاران (۲۰۰۶) اثرات استفاده از پلی‌آمین، پلی‌دادمک، آلومینیم کلراید و نشاسته کاتیونی را بر ویژگی‌های مقاومتی کاغذ بازیافتی بررسی کردند و گزارش دادند که افزودن این پلیمرهای کاتیونی باعث بهبود مقاومت کششی، مقاومت به پارگی و مقاومت به تاخوردن کاغذ نهایی می‌شود [۹].

در این تحقیق، از پلی‌آکریلامید و پلی‌دادمک به‌صورت مجزا و همزمان برای تیمار و بهبود ویژگی‌های خمیر کاغذ CMP و به‌منظور مثبت (خنثی) کردن بار منفی خمیر کاغذ استفاده شد. هدف اصلی این تحقیق، تأثیر همزمان پلی‌دادمک و پلی‌آکریلامید در بهبود خواص کاغذ حاصل از خمیر شیمیایی- مکانیکی بود.

۲. روش‌شناسی پژوهش

۲-۱. تهیه مواد آزمایشگاهی

در این تحقیق، ابتدا از واحد ماشین کاغذ (واحد ۶۰۰) کارخانه چوب و کاغذ مازندران، خمیر کاغذ CMP رنگبری و پالایش شده با درجه روانی حدود CSF ۳۱۰ تهیه و مقداری از خمیر کاغذ اولیه به‌عنوان نمونه شاهد انتخاب شد [۱]. خمیر کاغذ CMP اولیه تهیه شده، از حدود ۳۷ درصد غان، ۳۷ درصد صنوبر و حدود ۲۶ درصد مخلوط سایر گونه‌های چوبی تولید شده است.

پلی‌دادمک پلیمر کاتیونی با نام تجاری GL ساخت شرکت FINE CHEMICAL COMPANY چین می‌باشد که محلولی بی‌رنگ، متمایل به زرد کم رنگ، دارای گرانیوزی ۲۰۰ ال ۱۰۰۰ سانتی‌پواز و pH ۴ تا ۷ است. پلی‌دی‌آلیل دی‌متیل آمونیوم کلراید (poly-DADMAC) از شرکت سیگما آلدريج به‌صورت محلول آبی با غلظت ۶۰ درصد و وزن مولکولی ۴۰۰ هزار تا ۶۰۰ هزار گرم بر مول تهیه گردید. سپس پلی‌دادمک در ۴ سطح ۰، ۳/۰، ۵/۰ و ۷/۰ درصد استفاده و به دوغاب (استاک) خمیر کاغذ CMP افزوده شد [۵]. پلی‌آکریلامید که مختصراً به آن PAA نیز گفته می‌شود، ماده کمک نگهدارنده پلی‌آکریلامید کاتیونی با نام تجاری مورد مصرف Degussa تولیدی شرکت Farinret K325 است که می‌تواند در آینده در اولویت مصرف کارخانه صنایع چوب و کاغذ مازندران قرار گیرد. در واقع در حال حاضر، آلوم و نشاسته کاتیونی، ماده کمک نگهدارنده مصرفی برای تولید کاغذ روزنامه در کارخانه صنایع چوب و کاغذ مازندران می‌باشد. برای انجام این تحقیق، پلی‌آکریلامید کاتیونی به‌صورت محلول در آب با غلظت ۱/۰ درصد تهیه و با نسبت‌های ۰، ۲۵/۰، ۵/۰ و ۷۵/۰ درصد در دوغاب خمیر (استوک) مورد استفاده قرار گرفت [۴].

^۱Epoxy Propyl Trimethyl Ammonium Chloride

۲-۲. اندازه‌گیری ویژگی‌های نوری و مقاومتی کاغذهای دست‌ساز

برای اندازه‌گیری خواص نوری و مقاومتی کاغذهای حاصل از خمیر کاغذ مذکور و همچنین خمیر کاغذ CMP رنگبری شده کارخانه چوب و کاغذ مازندران (شاهد)، ابتدا طبق آزمون شماره ۸۸-۲۰۵ T استاندارد TAPPI، کاغذهای دست‌ساز با وزن پایه ۶۰ گرم بر متر مربع تهیه شد. برای اندازه‌گیری خواص نوری کاغذهای تهیه شده از دستگاه اسپکتروفتومتری استفاده شد. این دستگاه در سیستم CIElab قادر به تشخیص رنگ فرآورده‌های کاغذی می‌باشد. عملکرد این سیستم براساس خاصیت انعکاس نور از سطح مورد مطالعه استوار است. به‌طوری که بر این اساس درجه روشنایی و ماتی کاغذها با استفاده از آزمون استاندارد ۰۲-۴۵۲ T و ۰۱-۴۲۵ T تعیین شد. سپس ویژگی‌های مقاومتی به‌خصوص مقاومت‌های به پارگی، ترکیدن، کششی و مقاومت به عبور هوای کاغذهای حاصل به‌ترتیب با استفاده از آزمون‌های ۹۸-۴۱۴ T، ۰۲-۴۰۳ T، ۹۶-۴۹۴ T و ۰۲-۴۶۰ T استاندارد TAPPI اندازه‌گیری و مقایسه گردید. در نهایت جذب آب (Cobb 60) کاغذهای دست‌ساز نیز با استفاده از آزمون شماره ۰۴-۴۴۱ T اندازه‌گیری شد [۱۰].

۲-۳. تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها

تجزیه و تحلیل داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار آماری SPSS انجام شد. برای بررسی اثرات مستقل و متقابل متغیرها و گروه‌بندی میانگین‌ها، از طرح فاکتوریل و آزمون تجزیه واریانس چند طرفه و همچنین برای گروه‌بندی میانگین‌ها، از روش دانکن استفاده شد.

۳. یافته‌های پژوهش

۳-۱. مقایسه میانگین مشخصه‌های کمی در سطح متغیرها

نتایج آزمون تجزیه واریانس نشان داد که پلی‌آکریلامید بر روی کلیه مشخصه‌های کاغذ حاصل به‌جز ترکیدن، مقاومت به عبور هوا، مقاومت به پارگی، ماتی، جذب آب و فاکتور L^* تأثیر معنی‌داری دارد. همچنین اثرات مستقل پلی‌دادمک بر کلیه ویژگی‌ها، به‌جز زردی، شفتی (سفیدی) و جذب آب، اختلاف معنی‌داری نشان داد. اثرات متقابل پلی‌آکریلامید و پلی‌دادمک نیز بر روی کلیه ویژگی‌ها به‌جز مقاومت کششی، شقی، مقاومت به ترکیدن، مقاومت به عبور هوا، مقاومت به پارگی و جذب آب اختلاف معنی‌داری داشت (جدول ۱).

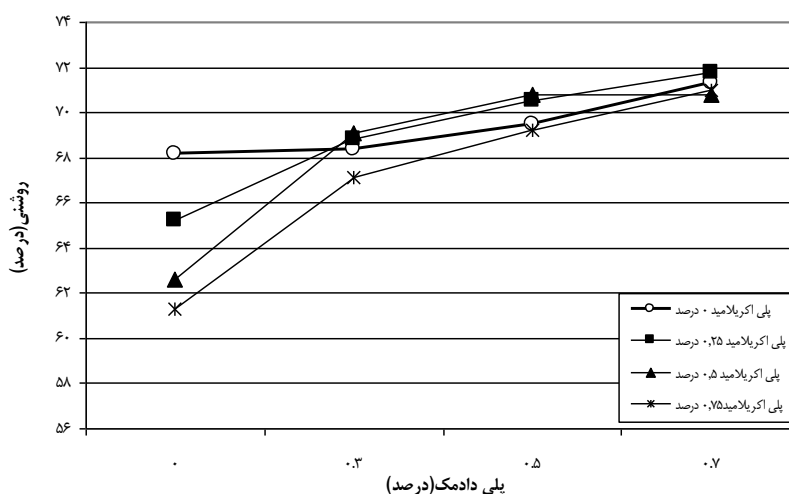
جدول ۱. تجزیه واریانس چند طرفه بین ویژگی‌های خمیر کاغذ CMP طی استفاده از پلی‌دادمک و پلی‌آکریلامید

متغیر	درجه روشنی		فاکتور a^*		مقاومت به پارگی		طول پارگی		مقاومت کششی	
	F	معنی‌داری	F	معنی‌داری	F	معنی‌داری	F	معنی‌داری	F	معنی‌داری
پلی‌آکریلامید (A)	۱۱/۸۱	۰/۰۰۰۱	۰/۵۹۱	۰/۵۵۵	۸/۰۲۵	۰/۰۰۰۱	۲۵/۳۰۹	۰/۰۰۰۱	۴۰/۸۶	۰/۰۰۰۱
پلی‌دادمک (B)	۹۰/۴۷	۰/۰۰۰۱	۴۰/۷۷	۰/۰۰۰۱	۰/۲۹۴	۱/۲۵۱	۲۵/۱۷۶	۰/۰۰۰۱	۹/۲۶۱	۰/۰۰۰۱
A×B	۵/۷۳	۰/۰۰۰۱	۳/۳۶۹	۰/۰۰۰۴	۰/۹۸۱	۰/۲۷۲	۰/۰۱۴	۰/۰۰۰	۱/۲۳	۰/۲۸۳

۳-۲. مقایسه درجه روشنایی کاغذ حاصل از خمیر کاغذهای CMP

نتایج نشان داد که با افزایش پلی‌دادمک، روشنی در کاغذ حاصل از خمیر کاغذ CMP افزایش یافت. با افزودن پلی‌آکریلامید، روشنی کاغذ حاصل از خمیر کاغذ CMP کاهش محسوس را نشان داد. با افزودن همزمان پلی‌دادمک و پلی‌آکریلامید، روشنی کاغذ حاصل از خمیر کاغذ CMP در مقایسه با نمونه شاهد افزایش نشان داد. در بین تیمارهای مختلف، بیشترین درجه روشنایی در کاغذ حاصل از افزودن همزمان ۰/۲۵ درصد پلی‌آکریلامید به همراه ۰/۷ پلی‌دادمک به خمیر کاغذ CMP مشاهده شد. نتایج سایر تحقیقات نیز نشان داد که با افزودن پلی‌آکریلامید، ضریب جذب نور کاغذ افزایش، فاکتور L^* و درجه روشنایی آن کاهش می‌یابد، همچنین، بهبود عملکرد سیستم کیتوزان منجر به تشکیل کلوخه‌های متراکم‌تر، شکل‌گیری بهتر ورقه، ماندگاری بهتر نرمه‌ها، دانسیته ظاهری بهتر شده و در نتیجه افزایش روشنی در کاغذ می‌گردد [۳، ۵، ۱۱]. در این ارتباط، کاغذ حاصل از اکثر تیمارها نیز

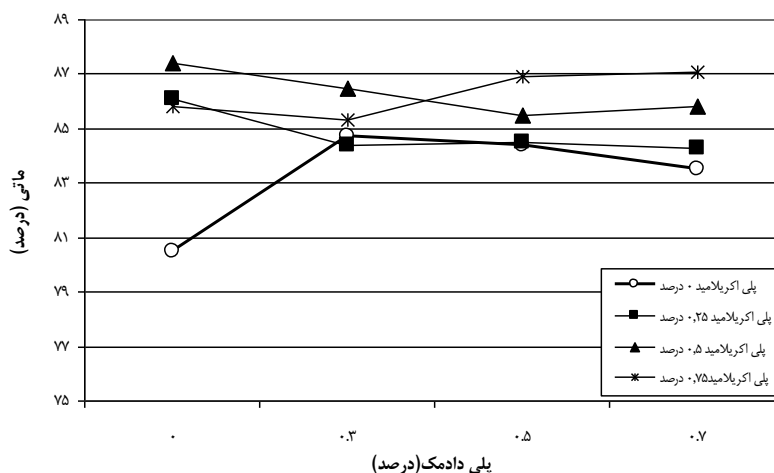
دارای روشنی مناسبی در مقایسه با نمونه شاهد داشت. تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها نشان داد که اثرات مستقل و متقابل پلی‌آکریلامید و پلی‌دادمک بر روی روشنی در سطح ۱ درصد اختلاف معنی‌داری دارد (شکل ۲).



شکل ۲. مقایسه روشنی کاغذ حاصل از افزودن پلی‌دادمک و پلی‌آکریلامید به خمیر کاغذ CMP

۳-۳. مقایسه ماتی کاغذ حاصل از خمیر کاغذهای CMP

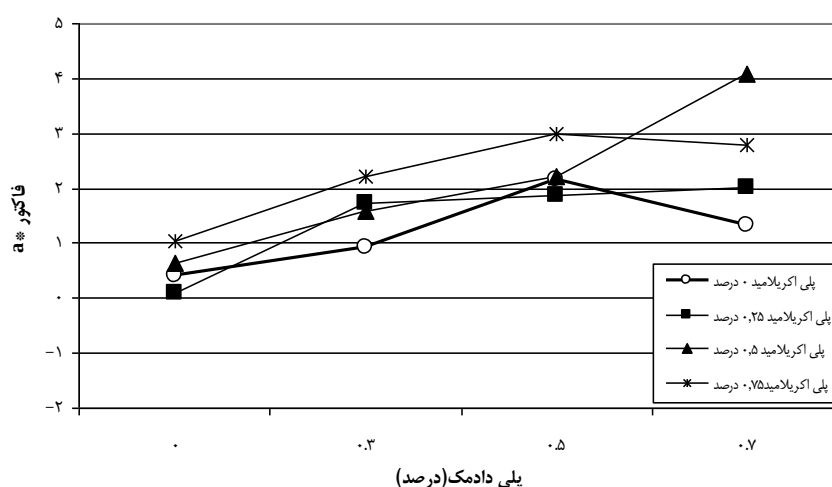
نتایج نشان داد که با افزایش پلی‌دادمک ماتی در کاغذ حاصل از خمیر کاغذ CMP افزایش یافته است. با افزودن پلی‌آکریلامید، ماتی کاغذ حاصل از خمیر کاغذ CMP افزایش نشان داد. با افزودن همزمان پلی‌دادمک و پلی‌آکریلامید نیز ماتی کاغذ حاصل از خمیر کاغذ CMP در مقایسه با نمونه شاهد افزایش نشان داد. در بین تیمارهای مختلف، بیشترین ماتی کاغذ حاصل از افزودن همزمان ۰/۵ و ۰/۷ درصد پلی‌دادمک به همراه ۰/۷۵ درصد پلی‌آکریلامید نسبت به نمونه شاهد مشاهده شد. نتایج سایر تحقیقات نشان داده است، که منعقدکننده‌های کاتیونی علاوه بر عملکرد، به عنوان یک ماده افزایش‌دهنده مقاومت خشک، با افزایش ماندگاری نرמה‌ها، می‌تواند به بهبود ویژگی‌های مقاومتی کاغذ منجر شود، همچنین افزایش ماندگاری نرמה‌ها می‌تواند باعث کاهش عبور نور در کاغذ و افزایش ماتی آن گردد [۳، ۹، ۱۲]. در این ارتباط، کاغذ حاصل از افزودن ۰/۵ درصد پلی‌آکریلامید به خمیر کاغذ CMP کارخانه نیز دارای ماتی مناسبی در مقایسه با نمونه شاهد می‌باشد. تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها نشان داد که اثرات مستقل پلی‌آکریلامید و همچنین اثرات متقابل پلی‌آکریلامید و پلی‌دادمک در سطح یک درصد بر روی ماتی اختلاف معنی‌داری دارد (شکل ۳).



شکل ۳. مقایسه ماتی کاغذ حاصل از افزودن پلی‌دادمک و پلی‌آکریلامید به خمیر کاغذ CMP

۳-۴. مقایسه فاکتور a^* کاغذ حاصل از خمیر کاغذهای CMP

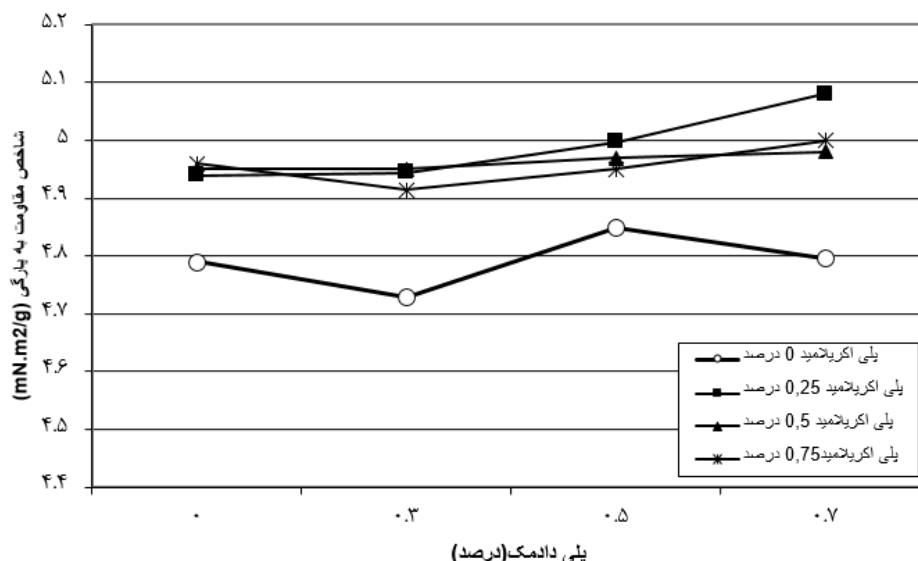
در سیستم جهانی رنگ ($CIE L^*a^*b^*$)، فاکتور a^* ، نشان‌دهنده طیف رنگی سبز تا قرمز در کاغذ می‌باشد. در کاغذ روزنامه و چاپ و تحریر، سبزرنگی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. نتایج نشان داد که با افزایش پلی‌دادمک، فاکتور a^* افزایش و سبزرنگی کاغذ کاهش نشان داد. با افزودن ۰/۵ و ۰/۷۵ درصد پلی‌آکریلامید، فاکتور a^* افزایش و سبزرنگی کاغذ کاهش داشت. با افزودن همزمان پلی‌دادمک و پلی‌آکریلامید نیز فاکتور a^* کاغذ حاصل از خمیر کاغذ CMP در مقایسه با نمونه شاهد افزایش و سبزرنگی کاهش داشته است. در بین تیمارهای مختلف، بیشترین سبزرنگی و کمترین فاکتور a^* در کاغذ حاصل از افزودن ۰/۷ پلی‌دادمک به همراه ۰/۵ پلی‌آکریلامید در مقایسه با نمونه شاهد مشاهده گردید. تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها نشان داد که اثرات مستقل و متقابل پلی‌آکریلامید و پلی‌دادمک نیز بر روی فاکتور a^* در سطح درصد اختلاف معنی‌داری داشت (شکل ۴).



شکل ۴. مقایسه فاکتور a^* کاغذ حاصل از افزودن پلی‌دادمک و پلی‌آکریلامید به خمیر کاغذ CMP

۳-۵. مقایسه مقاومت به پارگی کاغذ حاصل از خمیر کاغذهای CMP

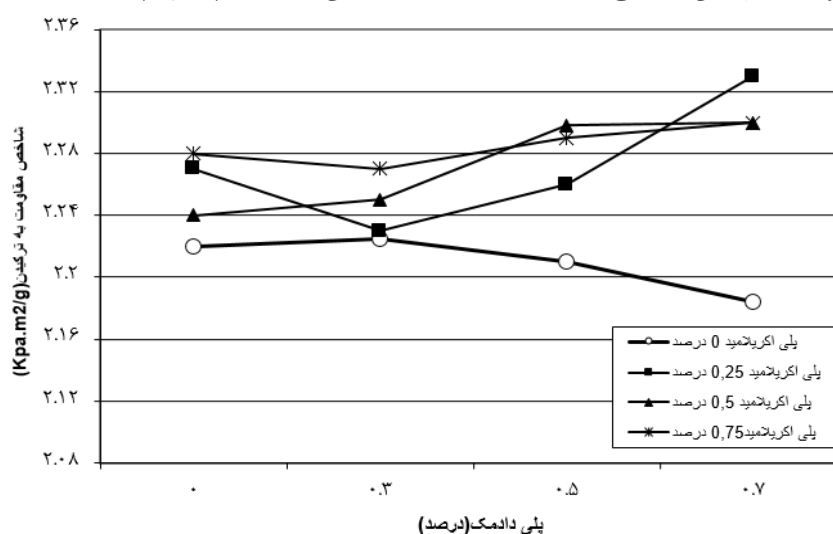
نتایج نشان داد که با افزایش پلی‌دادمک، مقاومت به پارگی در کاغذ حاصل از خمیر کاغذ CMP تقریباً افزایش داشته است. با افزودن پلی‌آکریلامید، مقاومت به پارگی در کاغذ حاصل از خمیر کاغذ CMP افزایش محسوسی را نشان می‌دهد. با افزودن همزمان پلی‌دادمک و پلی‌آکریلامید نیز مقاومت به پارگی کاغذ حاصل از خمیر کاغذ CMP در مقایسه با نمونه شاهد افزایش قابل ملاحظه‌ای نشان داد. در بین تیمارهای مختلف، بیشترین مقاومت به پارگی در کاغذ حاصل از افزودن همزمان ۰/۷ درصد پلی‌دادمک و ۰/۲۵ درصد پلی‌آکریلامید مشاهده شد. در این راستا، در مقایسه با نمونه شاهد، کاغذ حاصل از افزودن همزمان پلی‌دادمک و پلی‌آکریلامید نیز مقاومت به پارگی مناسبی را از خود نشان داد. با عنایت به اینکه گروه‌های آمینی توانایی ایجاد اتصال یونی و کوالانسی با سطح الیاف سلولزی به خصوص الیاف اصلاح شده و دارای گروه‌های عاملی بیشتری را دارند، می‌تواند سازش‌پذیری خوبی با سطح الیاف سلولزی داشته باشد و طیف وسیعی از پیوندهای متفاوت را با آن ایجاد کند [۱۳]. در این ارتباط، پلیمرهای کاتیونی به سبب چگالی بار مثبت بالا و اتصال با الیاف سلولزی، سبب افزایش ماندگاری نرمه‌ها و بهبود ویژگی‌های مقاومتی می‌شوند [۱۱، ۱۴]. افزودن پلیمرهای کاتیونی مقاومت به پارگی را افزایش می‌دهد و دلیل مهم آن در افزایش توان اتصال بین الیاف از طریق پل زنی و شبکه‌سازی به‌ویژه بین نرمه‌ها و الیاف است، که خود موجب افزایش انعطاف‌پذیری و فعال شدن سطوح الیاف و افزایش سطح پیوندی آنها می‌شود [۶، ۱۱]. تجزیه و تحلیل‌های آماری داده‌ها نشان داد که اثرات مستقل پلی‌آکریلامید بر روی مقاومت به پارگی در سطح یک درصد دارای اختلاف معنی‌دار است (شکل ۵).



شکل ۵. مقایسه مقاومت به پارگی در کاغذ حاصل از پلی‌دادمک و پلی‌آکریلامید به خمیر کاغذ فون CMP

۳-۶. مقایسه مقاومت به ترک‌کندن کاغذ حاصل از خمیر کاغذهای CMP

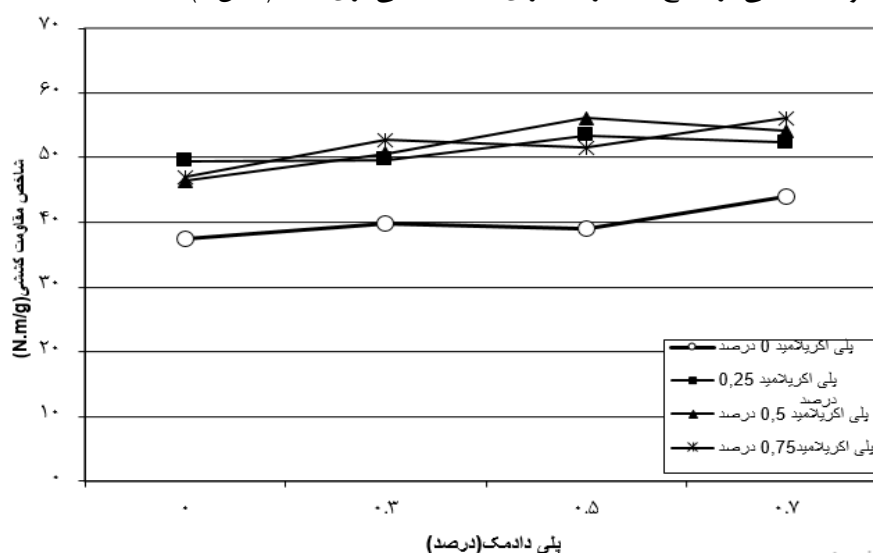
با افزایش پلی‌دادمک، مقاومت به ترک‌کندن در کاغذ حاصل از خمیر کاغذ CMP ابتدا افزایش جزئی و سپس کاهش یافت. با افزودن پلی‌آکریلامید مقاومت به ترک‌کندن در کاغذ حاصل از خمیر کاغذ CMP افزایش را نشان می‌دهد. با افزودن همزمان پلی‌دادمک و پلی‌آکریلامید مقاومت به ترک‌کندن کاغذ حاصل از خمیر کاغذ CMP در اکثر تیمارها در مقایسه با نمونه شاهد افزایش معنی‌داری را نشان داد. در بین تیمارهای مختلف، بیشترین مقاومت به ترک‌کندن در کاغذ حاصل از افزودن همزمان ۰/۷ درصد پلی‌دادمک و ۰/۲۵ درصد پلی‌آکریلامید در مقایسه با نمونه شاهد مشاهده شد. نتایج نشان داد که در تمامی تیمارها به‌جز در کاغذ حاصل از افزودن ۰/۵ و ۰/۷ درصد پلی‌دادمک، مقاومت به ترک‌کندن معنی‌داری نسبت به نمونه شاهد مشاهده گردید. در این ارتباط، پلیمرهای کاتیونی مانند کیتوزان به سبب چگالی بار مثبت زیاد، به راحتی می‌توانند با الیاف سلولزی اتصال ایجاد کنند. این ویژگی سبب افزایش ماندگاری نرמה‌ها می‌شود. از این‌رو، کیتوزان علاوه بر عملکردش، با کمک در افزایش ماندگاری نرמה‌ها نیز می‌تواند به بهبود ویژگی‌های مقاومتی کاغذ منجر شود [۱۲]. هر چه سطح ویژه در الیاف بیشتر، الیاف نازک‌تر و انعطاف‌پذیرتر باشد، به دلیل ایجاد اتصال هیدروژنی بیشتر، پیوندهای بین الیاف افزایش یافته و در نتیجه مقاومت کاغذ به ترک‌کندن افزایش می‌یابد [۱۶]. تجزیه و تحلیل‌های آماری داده‌ها نشان داد که اثرات مستقل پلی‌آکریلامید بر روی مقاومت به ترک‌کندن در سطح یک درصد دارای اختلاف معنی‌داری است (شکل ۶).



شکل ۶. مقایسه مقاومت به ترک‌کندن کاغذ حاصل از افزودن پلی‌دادمک و پلی‌آکریلامید به خمیر کاغذ CMP

۳-۷. مقایسه مقاومت کششی کاغذ حاصل از خمیر کاغذهای CMP

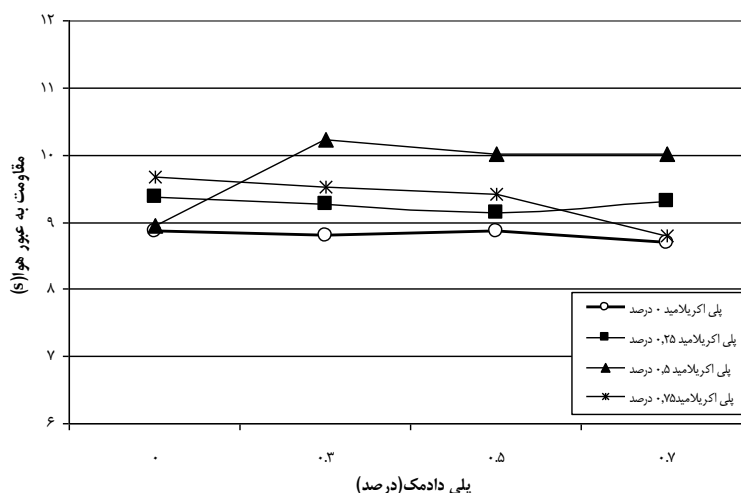
با افزایش پلی‌دادمک، مقاومت کششی در کاغذ حاصل از خمیر کاغذ CMP افزایش یافت. با افزودن پلی‌آکریلامید نیز مقاومت کششی در کاغذ حاصل از خمیر کاغذ CMP افزایش نشان داد. با افزودن همزمان پلی‌دادمک و پلی‌آکریلامید مقاومت کششی کاغذ حاصل از خمیر کاغذ CMP در مقایسه با نمونه شاهد افزایش معنی‌داری را نشان داده است. در بین تیمارهای مختلف، بیشترین مقاومت کششی در کاغذ حاصل از افزودن همزمان ۰/۷ درصد پلی‌دادمک و ۰/۷۵ درصد پلی‌آکریلامید و کمترین آن در نمونه شاهد مشاهده شد. در این راستا، در تمامی تیمارها در مقایسه با نمونه شاهد مقاومت کششی مناسبی مشاهده گردید. از آنجا که مقاومت در برابر کشش از ویژگی‌هایی است که به اتصالات الیاف سلولزی بستگی دارد، پلی‌آکریلامید نیز به‌عنوان یک ماده افزودنی مقاومت خشک، با بهبود پتانسیل زتا و با استفاده از پیوندهای هیدروژنی و واندروالسی، سبب بهبود اتصالات بین الیاف و به‌دنبال آن سبب بهبود مقاومت در برابر کشش می‌شود [۱۷]. پلی‌دادمک دارای گروه‌های آمینی روی منومرهای خود است که با ایجاد پیوندهای احتمالی یونی، هیدروژنی و کووالانسی آمیدی باعث توسعه هر چه بیشتر پیوند بین الیاف می‌شود [۱۵]. تجزیه و تحلیل‌های آماری داده‌ها نشان داد که اثرات مستقل پلی‌آکریلامید و پلی‌دادمک بر روی مقاومت کششی در سطح یک درصد دارای اختلاف معنی‌داری است (شکل ۷).



شکل ۷. مقایسه مقاومت کششی کاغذ حاصل از افزودن پلی‌دادمک و پلی‌آکریلامید به خمیر کاغذ CMP

۳-۸. مقایسه مقاومت به عبور هوا کاغذ حاصل از خمیر کاغذهای CMP

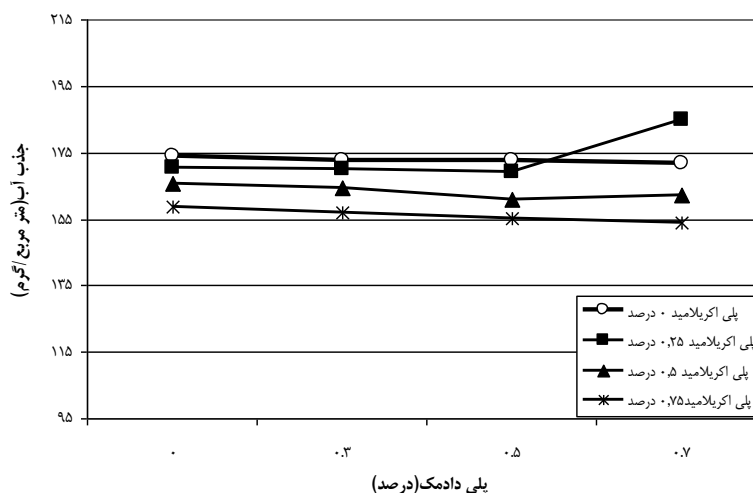
نتایج نشان داد با افزایش پلی‌دادمک، مقاومت به عبور هوا در کاغذ حاصل از خمیر کاغذ CMP تفاوت خاصی را نشان نداد. با افزودن پلی‌آکریلامید نیز مقاومت به عبور هوا در کاغذ حاصل از خمیر کاغذ CMP افزایش نشان داد. با افزودن همزمان پلی‌دادمک و ۰/۵ درصد پلی‌آکریلامید، مقاومت به عبور هوا کاغذ حاصل از خمیر کاغذ CMP در مقایسه با نمونه شاهد افزایش نشان داد. در بین تیمارهای مختلف، بیشترین مقاومت به عبور هوا در کاغذ حاصل از افزودن همزمان ۰/۳ درصد پلی‌دادمک و ۰/۲۵ درصد پلی‌آکریلامید و کمترین آن در کاغذ حاصل از کارخانه چوب و کاغذ مازندران (نمونه شاهد) مشاهده شد. در این راستا، عملکرد منعقدکننده‌ها از طریق فشردگی لایه مضاعف الکتریکی در اطراف ذره کلئیدی انجام می‌شود. این سازوکار موجب افزایش سرعت ناپایدارسازی ذره‌ای و در نتیجه رشد سریع‌تر دلمه‌شدن ذرات و نهایتاً بهبود ماندگاری ذرات می‌گردد [۱۸، ۱۹]. پراکندگی یکنواخت تر نانوفیبرهای سلولزی و در نتیجه افزایش شبکه و سطح پیوندی بین الیاف، باعث کاهش خلل و فرج و روزه‌ها موجود در ساختار کاغذ شده، همچنین افزایش مسیر عبور ملکول‌های هوا از کاغذ به‌دلیل ایجاد مسیر زیگزاگی طی شده در کاغذ بیشتر می‌شود، در نتیجه حجم مشخصی از هوا به زمان بیشتری برای عبور از کاغذ نیاز دارد، نفوذپذیری در کاغذ کاهش و مقاومت به عبور هوا افزایش می‌یابد [۲۰]. تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها نشان داد که اثرات مستقل پلی‌آکریلامید بر روی مقاومت به عبور هوا در سطح ۵ درصد دارای اختلاف معنی‌داری است (شکل ۸).



شکل ۸. مقایسه مقاومت به عبور هوا در کاغذ حاصل از افزودن پلی‌دادمک و پلی‌آکریلامید به خمیر کاغذ CMP

۳-۹. مقایسه جذب آب (Cobb 60) کاغذ حاصل از خمیر کاغذهای CMP

نتایج نشان داد که با افزایش پلی‌دادمک، جذب آب کاغذ حاصل از خمیر کاغذ CMP کاهش داشته است. با افزودن پلی‌آکریلامید، جذب آب کاغذ حاصل از خمیر کاغذ CMP در مقایسه با نمونه شاهد کاهش نشان داد. در بین تیمارهای مختلف، بیشترین جذب آب در کاغذ حاصل از افزودن همزمان ۰/۷ پلی‌دادمک و ۰/۲۵ درصد پلی‌آکریلامید به خمیر کاغذ CMP و کمترین آن در کاغذ با افزودن همزمان ۰/۷ درصد پلی‌دادمک و ۰/۷۵ درصد پلی‌آکریلامید به خمیر کاغذ CMP مشاهده شد. این کاهش جذب آب در کاغذ بیشتر می‌تواند تحت تأثیر پلی‌آکریلامید باشد. توانایی برقراری پیوند هیدروژنی بین گروه‌های آمینی پلی‌آکریلامید و گروه‌های هیدروکسیل الیاف، امکان تشکیل پیوندهای الکتروستاتیکی بین آنیون‌های سطح الیاف به‌ویژه گروه‌های کربوکسیل و گروه‌های کاتیونی آمینی را افزایش می‌دهد؛ همچنین قابلیت تشکیل پیوند کووالانسی از طریق واکنش گروه‌های پلی‌دادمک با گروه آلدهیدی الیاف، از جمله تئوری‌های پیونددهی کیتوزان با سطح الیاف سلولزی، کاهش برخی گروه‌های جذب کننده آب در کاغذ حاصل می‌باشند [۵، ۱۹]. تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها نشان داد که اثرات مستقل و متقابل پلی‌آکریلامید و پلی‌دادمک بر روی جذب آب دارای اختلاف معنی‌داری نیست (شکل ۹).



شکل ۹. مقایسه جذب آب (Cobb 60) کاغذ حاصل از افزودن پلی‌دادمک و پلی‌آکریلامید به خمیر کاغذ CMP

۴. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

این تحقیق با هدف تأثیر استفاده از پلی‌دادمک و پلی‌آکریلامید بر ویژگی‌های نوری و مقاومتی خمیر کاغذ شیمیایی-مکانیکی انجام شد. با افزودن پلی‌دادمک به خمیر کاغذ CMP روشنی، ماتی، فاکتور a^* طول پارگی، مقاومت کششی و مقاومت به پارگی افزایش و زردی و سبزرنگی کاهش یافت، اما تغییرات محسوسی در جذب آب در کاغذ حاصل مشاهده نشد. نتایج نشان داد که با افزودن پلی‌آکریلامید به خمیر کاغذ CMP نیز فاکتور a^* مات، زردی، مقاومت به پارگی، طول پارگی، مقاومت به ترکیدن و مقاومت به کششی در کاغذ حاصل افزایش یافت، اما روشنی و جذب آب کاهش نشان داد. در این حالت، مناسب‌ترین ویژگی‌ها در کاغذ حاصل از افزودن ۰/۲۵ درصد پلی‌آکریلامید به خمیر کاغذ CMP مشاهده شد. با افزودن همزمان پلی‌دادمک و پلی‌آکریلامید به خمیر کاغذ CMP روشنی، مات، فاکتور a^* مقاومت به ترکیدن، مقاومت به پارگی، مقاومت کششی و طول پارگی افزایش را نشان داد، اما زردی، جذب آب و سبزرنگی کاغذ حاصل کاهش داشت. به‌طور کلی، افزودن ۰/۲۵ درصد پلی‌آکریلامید (جداگانه) و ۰/۷ درصد پلی‌دادمک (جداگانه) و همچنین افزودن همزمان ۰/۷ درصد پلی‌دادمک به‌همراه ۰/۲۵ و ۰/۷۵ درصد پلی‌آکریلامید به خمیر کاغذ CMP باعث بهبود اکثر ویژگی‌ها در کاغذ حاصل از خمیر کاغذ CMP شد، که می‌توان آنها را به‌عنوان تیمار برتر انتخاب و معرفی کرد. بنابراین، افزودن پلی‌دادمک با پتانسیل بار مثبت، به‌عنوان یک ماده منعقدکننده آلی اولیه و خنثی‌کننده مواد کلئیدی دارای بار الکتریکی منفی، استفاده می‌شود، سپس در مرحله بعد با افزودن پلی‌آکریلامید و با پتانسیل بار مثبت (بارکاتیونی) نرمه‌ها و پرکننده‌ها را در کنار الیاف جذب خواهد کرد. در واقع، استفاده متوالی از پلی‌الکترولیت‌های مثبت و دو تایی، مقدار بیشتری از اجزای کلئیدی و ذرات ریز را بر الیاف ماندگار می‌کند و مقاومت خشک بیشتری در کاغذ حاصل می‌شود [۴، ۲۰].

۵. منابع

- [1] Vaysi, R., Rezazadeh, I., & Ebadi, S. E. (2024). The effect of nano-chitosan, nano-cellulose and DTPA spray on the optical properties of paper obtained from chemical-mechanical pulp (CMP). , *Iranian Journal of Wood and Paper Science Research*, 39(1), 55-71.
- [2] John W., Buckley, C.A., Jacobs, E.P. & Sanderson, R.D. (2002). Synthesis and use of poly-DADMAC for water purification paper. In: The Biennial Conference of the water. May. 19-23 Duban, South Africa, 1-13.
- [3]. Wagberg, L., Forsberg, S., Johansson, A., & Juntti, P. (2002). Engineering of fiber surface properties by application of polyelectrolyte multilayer concept, Part 1. Modification of paper strength. *Journal of Pulp and Paper Science*, 28(7), 222-228.
- [4]. Heydari, H., Vaysi, R., Hosseinzadeh, A., Bakhshi, R. & Kiaei, M. (2024). Effect of chitosan and cationic polyacrylamide on optical and mechanical properties of paper made from chemi-mechanical pulps, *BioResource*, 19(2), 2909-2915.
- [5] Rezazadeh, E., Vaysi, R. & Ebadi, S.E. Soltani, M., & Najafi, A. (2022). Comparison of the internal functionalization and surface modification methods of chemi-mechanical pulp handsheets using cellulose-chitosan nano-biopolymers and DTPA. *BioResources*, 17, 2810-2826.
- [6] Ahmadi Lajimi, A., Azadfallah, M., Hamzeh, Y. & Rahmaninia, M. (2020). Effect of cationic poly-DADMAC based fixing agent on strength properties of OCC pulp. *Iranian Journal of Wood and Paper Industries*, 10(4), 605-616. (In Persian)
- [7] Kim, J. & Lee, H. (2007). Influence of several physicochemical conditions on the flocculation of micro stickies. *Journal of Korean TAPPI*, 40(5), 20-26.
- [8] Rashidi Joybari, I., Azadfallah, M., Resalati, H., Hamzeh, Y. & Yosofi, H. (2015). Investigation of effect cationic soft wood fiber by EPTMAC and mixed it's with CMP pulp. *Journal of Forest and Wood Products*, 68(2), 235-245.
- [9] Wang, L., Chen, S. & Zhou, J. (2006). Performance of fixing agents in controlling micro stickies in recycled newsprint pulp. *China Pulp and Paper*, 25(7), 1-4.
- [10] Technical Association of Pulp and Paper Industry, Standard Test Methods. TAPPI Press, Atlanta, GA. USA. 2009.

- [11] Ashoori, A., Harun, J., Raverty, J.D., Zin, W.M. & Nor, M. (2005). Effect of chitosan addition on the surface properties of kenaf (*Hibiscus cannabinus*) paper. *Iranian Polymer Journal*, 9, 807-814.
- [12] Nicu, R., Bobu, E. & Desbrieres, J. (2010). Chitosan as cationic polyelectrolyte in wet-end papermaking system. *Cellulose Chemistry and Technology Journal*, 10, 102-108.
- [13] Nada, A. M. A., El-Sakhawy, M., Kamel, S., & Eid, M.A.M. (2005). Effect of chitosan and its derivatives on the mechanical and electrical properties of paper sheets. *Egyptian Journal of Solids*, 28(2), 202-208.
- [14] Steckel, H., & Nogly, F. M. (2003). Production of chitosan pellets by extrusion/Herinization. *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics*, 46, 1-6.
- [15] Vanerek, A., Alince, B. & Van de ven, T.G.M. (2006). Bentonite delamination induced by pulp fibers under high shear monitored by calcium carbonate deposition. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 280 (1-3), 1-8.
- [16] Vaysi, R. & Kord, B. (2013). The effects of H₂O₂ bleaching and DTPA spraying on the brightness stability of hornbeam CMP pulp following accelerated irradiation aging, *BioResource*, 8(2), 1909-1917.
- [17] Li, H., Du, Y. & Xu, Y. (2004). Interaction of cationized chitiosan with components in a chemical pulp suspension. *Carbohydrate Polymers Journal*, 58, 205-214.
- [18] Nasir, N., & Daud, Z. (2014). Performance of aluminum sulphate and polyaluminium chloride in biodiesel wastewater. *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*, 7, 1189-1195.
- [19] Heermann, M., Welter, S. & Hubbe M. A. (2006). Effect of high treatment levels in dry-strength additives: program based on deposition on polyelectrolyte complexes, how much glue is too much. *TAPPI Journal*, 5(6), 9-14.
- [20] Fosso-Kankeu, E., Webster, A., Ntwampe, I.O. & Waanders, F.B. (2017). Coagulation/flocculation potential of polyaluminium chloride and Bentonite clay tested in the removal of methyl red and crystal violet. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 42, 1389-1397.