

The effect of fiber oxidation on the properties of corrugated paperboard

Esmail Rasooly Garmaroody^{1*}, Omid Esmaeili² and Seyed Rahman Djafari Petroudy³

1*-Corresponding Author, Assistant Professor, Department of Bio-refinery Engineering, Faculty of New Technologies Engineering, Shahid Beheshti University, Zirab, Mazandaran, Iran, Email: e_rasooly@sbu.ac.ir

2-Graduated Student, Department of Bio-refinery Engineering, Faculty of New Technologies Engineering, Shahid Beheshti University, Zirab, Mazandaran, Iran

3-Assistant Professor, Department of Bio-refinery Engineering, Faculty of New Technologies Engineering, Shahid Beheshti University, Zirab, Mazandaran, Iran

Received: October 2024

Revised: February 2025

Accepted: February 2025

Abstract

Background and purpose: The strength properties of paper during the production and consumption has always been a particular interest for paper makers. In the case of NSSC pulp, it is very important to maintain the strength for the production of floating papers or also its mixture in the production of different types of liner boards. The use of recycled papers in alone or in combination with virgin papers has shown that the strength properties of the resulting papers are reduced. Therefore, in order to use recycled paper, either alone or combined with virgin pulp, it is necessary to take measures to improve the quality of the final paper.

Materials and methods: This research was conducted to investigate the effects of using oxidation methods with hydrogen peroxide and hypochlorite to improve the characteristics of corrugated board by combining NSSC and OCC pulps. In this research, first, the pulps were oxidized using hydrogen peroxide and sodium hypochlorite in different dosages, and then according to the TAPPI standard, handmade papers of 127 g/cm² were made. Finally, the papers properties in terms of physical characteristics such as Cobb-60 and Air resistance; And the mechanical strength were evaluated

Results: The control sample showed higher water absorption and its amount decreased with the oxidation treatment of the pulps. Papers obtained from pulps oxidized with hypochlorite have higher air resistance than with peroxide and the paper obtained from pure OCC pulp has the lowest air resistance. Papers obtained from pulps oxidized with peroxide showed higher tear index. Therefore, peroxide is preferred in terms of tearing properties compared to hypochlorite. In most cases, papers obtained from hypochlorite treatment have higher tensile index. The use of oxidation with hypochlorite increases the folding resistance. In terms of CMT, RCT and CCT resistances, combined oxidation processes have been more effective, especially in treatments containing long fibers. The effect of oxidation with peroxide and hypochlorite on the resistance of the paper surface in NSSC and OCC papers are completely different and act in the opposite direction. But in combined treatments, higher CMT is obtained. The effect of both oxidants on the characteristics ring crush strength (RCT) in NSSC and OCC papers in pure treatments has an upward trend, and in the combined state, it causes a decrease in RCT in the papers. The effect of oxidation with hypochlorite on the paper edge cramp resistance (CCT) has been higher compared to peroxide

Conclusion: The use of oxidation treatment with peroxide for all pulps produces papers with higher tearing index. However, in the use of using hypochlorite, the strength characteristics affected by the bond between fibers, such as tensile strength and folding resistance, have been improved. In terms of resistance characteristics such as CMT, RCT and CCT resistance, the combination of peroxide and hypochlorite treatments along with long fibers have shown more effective, therefore, considering the importance of these characteristics in the production of paper it is suggested that these treatments should be prioritized.

Keywords: Oxidation, congress paper, alkali, mechanical strength.

تأثیر اکسیداسیون قلیایی الیاف بر ویژگی های مقوای کنگره‌ای

اسماعیل رسولی گرمارودی^{۱*}، امید اسمعیلی^۲ و سید رحمان جعفری پطردی^۳

*۱- نویسنده مسئول، استادیار، گروه پالایش زیستی، دانشکده مهندسی فناوری های نوین، پردیس زیرآب، دانشگاه شهید بهشتی، ایران،
پست الکترونیک: e_rasooly@sbu.ac.ir

۲- دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه پالایش زیستی، دانشکده مهندسی فناوری های نوین، پردیس زیرآب، دانشگاه شهید بهشتی، ایران

۳- استادیار، گروه پالایش زیستی، دانشکده مهندسی فناوری های نوین، پردیس زیرآب، دانشگاه شهید بهشتی، ایران

تاریخ پذیرش: شهریور ۱۴۰۳

تاریخ اصلاح نهایی: مرداد ۱۴۰۳

تاریخ دریافت: خرداد ۱۴۰۳

چکیده

سابقه و هدف: توجه به خواص مقاومتی کاغذ در هنگام تولید و مصرف آن، به‌طور ویژه مدنظر کاغذسازان بوده است. در مورد خمیر کاغذ NSSC برای تولید کاغذهای کنگره‌ای و یا ترکیب آن در تولید انواع کاغذ لاینر، حفظ مقاومت و پیوستگی در حین تولید آن بسیار حائز اهمیت است. استفاده از کاغذهای بازیافتی به‌صورت خالص و یا در ترکیب با خمیر کاغذهای بکر نشان داده است که خواص مقاومتی کاغذهای حاصل کاهش می‌یابد. از این رو، برای استفاده از کاغذ بازیافتی، چه به‌صورت خالص و چه به‌صورت ترکیب با خمیر بکر، لازم است تمهیداتی در جهت بهبود کیفیت کاغذ نهایی در نظر گرفته شود.

مواد و روش‌ها: این تحقیق برای بررسی اثر استفاده از روش‌های اکسیداسیون با دو ماده پروکسید هیدروژن و هیپوکلریت برای بهبود ویژگی‌های خمیر مقوای کنگره‌ای با ترکیب دو خمیر NSSC و OCC انجام شد. در این تحقیق، ابتدا خمیرهای مورد نظر با استفاده از پروکسید هیدروژن و هیپوکلریت سدیم به نسبت‌های مختلف اکسید شده و بعد طبق استاندارد TAPPI از آنها کاغذهای دست‌ساز با وزن پایه حدود ۱۲۷ گرم بر مترمربع ساخته شد. در پایان، کاغذهای مذکور از نظر ویژگی‌های فیزیکی مانند مقاومت به جذب آب و مقاومت به عبور هوا و ویژگی‌های مقاومتی ارزیابی شدند.

نتایج: تیمارهای شاهد دارای ویژگی مقاومت به جذب آب بالاتری هستند و با تیمار اکسیداسیون خمیرها از مقدار آن کم می‌شود. کاغذهای حاصل از خمیرهای اکسید شده با هیپوکلریت در مقایسه با پروکسید از مقاومت به عبور هوای بالاتری برخوردارند. از این نظر، کاغذ حاصل از تیمار خالص OCC دارای کمترین مقاومت به عبور هواست. کاغذهای حاصل از خمیرهای اکسید شده با پروکسید از شاخص پارگی بالاتری برخوردار می‌باشند. از این رو، به نظر می‌رسد که پروکسید در مقایسه با هیپوکلریت از نظر ویژگی پارگی ترجیح دارد. در بیشتر موارد کاغذهای حاصل از تیمار هیپوکلریت دارای شاخص کشش بالاتری هستند. با استفاده از اکسیداسیون با هیپوکلریت، مقاومت به تا شدن الیاف بیشتر می‌شود. از نظر میزان مقاومت‌های CMT، RCT و CCT، فرایندهای اکسیداسیون ترکیبی به‌ویژه در تیمارهای حاوی الیاف بلند اثرگذاری بیشتری داشته‌اند. اثر اکسیداسیون با پروکسید و هیپوکلریت بر روی میزان مقاومت لهیدگی سطح کاغذ در کاغذهای NSSC و OCC کاملاً متفاوت و در جهت عکس هم عمل می‌کنند. ولی در تیمارهای ترکیبی CMT بیشتری حاصل می‌شود. اثر هر دو اکسیدکننده بر ویژگی مقاومت به لهیدگی حلقه‌ای (RCT) در کاغذهای NSSC و OCC در تیمارهای خالص سیر صعودی داشته و در حالت ترکیبی باعث کاهش RCT در کاغذها می‌شود. اثر اکسیداسیون با هیپوکلریت در ویژگی مقاومت به لهیدگی لبه کاغذ (CCT) در مقایسه با پروکسید بیشتر بوده است.

نتیجه‌گیری: استفاده از تیمار اکسیداسیون با پروکسید برای کلیه خمیرها باعث می‌شود که کاغذهای حاصل از شاخص پارگی بالاتری برخوردار باشند؛ اما در استفاده از هیپوکلریت ویژگی‌های مقاومتی متأثر از پیوند بین الیاف مانند مقاومت کشش و مقاومت به تا شدن بیشتر بهبود پیدا کرده‌اند. از نظر ویژگی‌های مقاومتی مانند مقاومت CMT، RCT و CCT، ترکیب تیمارهای پروکسید و هیپوکلریت به همراه الیاف بلند اثرگذاری بیشتری داشته‌اند. از این رو، با توجه به اهمیت این ویژگی‌ها در تولید کاغذ کنگره‌ای، پیشنهاد می‌شود این

تیمارها در اولویت توجه قرار گیرند.

واژه‌های کلیدی: اکسیداسیون، مقوای کنگره‌ای، قلبیایی، ویژگی‌های مقاومتی.

مقدمه

به منظور کاهش استفاده از مواد فسیلی، بایستی کاهش قابل توجهی در استفاده از مواد پلاستیکی انجام شود. یک رویکرد برای دستیابی به این هدف، جایگزینی پلاستیک با مواد مبتنی بر الیاف سلولزی در کاربردهایی مانند بسته‌بندی یا کامپوزیت‌های مورد استفاده برای ساخت دستگاه‌های مختلف است. با این حال، مواد سلولزی یک اشکال عمده دارند و آن این است که الیاف فیبری هنگامی که در شرایط مرطوب قرار می‌گیرند بیش از ۹۰ درصد استحکام اولیه خود را از دست می‌دهند که دلیل آن شکست پیوندهای هیدروژنی بین الیاف است. برای جلوگیری از این پدیده، روش‌های مختلفی مانند پالایش الیاف، استفاده از مواد افزاینده مقاومت تر و نیز اکسیداسیون الیاف استفاده شده‌اند که هر یک به طرق مختلف در جهت تقویت ویژگی‌های مقاومتی الیاف حرکت می‌نمایند (Martinson *et al.*, 2022).

در این ارتباط، پژوهشگران در تیمار اسیدی خمیر کرافت سوزنی برگ کاملاً سفید شده با پروکسید هیدروژن به این نتیجه رسیدند که اساساً اکسیداسیون عمدتاً منجر به تشکیل آلدئیدها یا کتون‌ها می‌شود که می‌توانند به صورت پیوندهای عرضی همی‌استال به گروه‌های هیدروکسیل مجاور پیوند گردند. بعلاوه، با افزایش فرایند اکسیداسیون الیاف، بیشتر گروه‌های کربوکسیل تشکیل می‌شوند. از آنجایی که این گروه‌های همی‌استال مانند پیوندهای هیدروژنی به آسانی تخریب نمی‌شوند؛ بنابراین می‌توانند بر مقاومت تر کاغذهای حاصل بیفزایند (Kim, 2000).

بعلاوه، نتایج تحقیقات نشان می‌دهد که تیمار خمیر کرافت سوزنی برگ با کمک پروکسید هیدروژن قلبیایی باعث افزایش گروه‌های کربوکسیل می‌شود. بعلاوه، اگر پروکسید به عنوان مرحله پایانی رنگبری در توالی‌های مختلف استفاده شود باعث افزایش گروه‌های کربوکسیل تا ۲۰ درصد شده که این

موضوع منجر به افزایش مقاومت کاغذ از جمله افزایش شاخص کشش کاغذ می‌شود (Zhang *et al.*, 2005; Zhang *et al.*, 2006).

همچنین، هیپوکلریت نیز سال‌هاست که برای رنگبری خمیرهای شیمیایی و به دلیل روشن‌سازی خمیر مورد استفاده قرار می‌گیرد. شایان ذکر است که در موارد معدودی برای خمیرهای مکانیکی پربازده نیز استفاده شده است (Sharma *et al.*, 2020). محلول هیپوکلریت سدیم نقش مهمی در رنگبری دوغاب خمیر، از طریق اکسیداسیون گروه‌های رنگ‌ساز لیگنین و رنگ‌زدایی آنها به طور مؤثر ایفا می‌کند (Xian *et al.*, 2020). به‌طور کلی استفاده از هیپوکلریت برای دستیابی به بیشترین کارایی بایستی در pH بالای ۱۰ انجام شود (Dence and Douglas, 1996).

از سوی دیگر، توجه به خواص مقاومتی کاغذ در هنگام تولید و مصرف آن، همیشه به‌طور ویژه مدنظر کاغذسازان بوده است. در مورد خمیر NSSC برای تولید کاغذهای کنگره‌ای (سبک و سنگین) و یا ترکیب در تولید انواع کاغذ لاینر، حفظ مقاومت و تولید مستمر آن بسیار حائز اهمیت است (Rasoulpour Hedayati *et al.*, 2014). استفاده از کاغذهای بازیافتی به صورت خالص و یا در ترکیب با کاغذهای بکر نشان داده است که خواص مقاومتی کاغذهای حاصل کاهش می‌یابد (Talaipour and Qorbhani, 2012).

از منظر اقتصادی، اختلاف قابل توجهی بین هزینه تولید خمیر بکر و بازیافتی وجود دارد، به طوری که این ویژگی به موتور محرکه‌ای برای کارخانه‌های مختلف برای سرمایه‌گذاری در راستای استفاده از الیاف بازیافتی تبدیل شده است (Zeb *et al.*, 2021). از این رو، برای استفاده از کاغذ بازیافتی، چه به صورت خالص و چه به صورت ترکیب با خمیر بکر، با توجه به اینکه ممکن است چندین بار

پروکسید هیدروژن ۳۵٪ (کیمیا پترو)، هیپوکلریت سدیم ۱۶٪ (شرکت کلران) و سیلیکات سدیم ۵ آبه (شرکت سیلیکات گستر) استفاده شد. برای انجام فرایند اکسیداسیون، خمیر کاغذ NSSC و OCC (به ترتیب با کدهای NC و OC) با پروکسید هیدروژن با مقادیر مصرف ۳، ۴ و ۵ درصد (به ترتیب با کدهای H3, H4, H5) و هیپوکلریت سدیم با مقادیر ۰/۵، ۱، ۱/۵، ۳، ۴ و ۵ درصد (به ترتیب با کدهای Na0.5, Na1, Na1.5, Na3, Na4, Na5) تیمار و بعد مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند که شرایط و نتایج آن در مقاله Esmaili و همکاران (۲۰۲۳) آمده است.

بعد از آن، از خمیرهای مذکور، طبق استاندارد T205 sp-02 و براساس جدول تیمارها (شماره ۱) کاغذهای دست‌ساز 127 ± 3 گرم بر مترمربع ساخته شد. یادآوری می‌شود که در کارخانه چوب و کاغذ مازندران ۱۰-۲۰ درصد الیاف بلند وارداتی به خمیرها اضافه می‌شود که در این تحقیق نیز از دو تیمار ۱۰ و ۲۰ درصد الیاف بلند در ساخت کاغذ استفاده شده است. در پایان ویژگی‌های کاغذ براساس استانداردهای TAPPI و ISO انجام شد، به طوری که ویژگی‌های فیزیکی کاغذ شامل مقاومت در برابر نفوذپذیری هوا (T 460 om-02) و مقاومت در برابر جذب آب (ISO 535) و ویژگی‌های مقاومتی کاغذ شامل شاخص مقاومت در برابر کشش (T 404 wd-03)، شاخص مقاومت در برابر پاره شدن (T 413 om-02)، مقاومت در برابر ناشدن (T 511 om-02)، مقاومت به لهیدگی سطح مقوای کنگره‌ای (ISO 19192)، مقاومت به لهیدگی لبه حلقوی کاغذ (ISO 19192) و مقاومت به لهیدگی لبه مقوای کنگره-ای کاغذ (T843-m09) مورد ارزیابی قرار گرفتند.

چرخه بازیافت را طی کرده باشد، لازم است تمهیداتی در جهت بهبود خمیر، به‌ویژه خمیر مخلوط، در نظر گرفته شود تا محصول نهایی در هنگام مصرف با محدودیت مواجه نشود.

در این راستا، کارخانه چوب و کاغذ مازندران به منظور جبران بخشی از کمبود چوب مورد نیاز خود از مقوای کنگره‌ای کهنه (OCC) به صورت اختلاط با خمیر بکر برای تولید کاغذ کنگره‌ای استفاده می‌نماید. از آنجایی که اختلاط الیاف بازیافتی و بکر باعث افت ویژگی‌های کاغذ کنگره‌ای نهایی می‌گردد، از این رو، بایستی با اتخاذ روش‌های مناسب مانند پالایش و استفاده از مواد شیمیایی افزایش مقاومت و یا اکسیداسیون، این نقیصه را جبران نمود. در میان روش‌های مذکور، اکسیداسیون با افزایش گروه‌های کربوکسیل بر روی الیاف خمیر کاغذ قادر است قابلیت واکنش‌پذیری الیاف را افزایش داده که این موضوع می‌تواند با ایجاد نقاط پیوندی بیشتر به بهبود ویژگی‌های کاغذ کمک نماید؛ بنابراین، در این پژوهش، از پروکسید هیدروژن و هیپوکلریت به عنوان دو اکسیدکننده در محیط قلیایی برای اکسیداسیون خمیرهای NSSC و OCC به منظور بهبود ویژگی‌های کاغذ کنگره‌ای نهایی استفاده شد.

مواد و روش‌ها

در این تحقیق، خمیر NSSC (به صورت رنگبری نشده) و خمیر OCC از کارخانه چوب و کاغذ مازندران تهیه گردید. برای خمیرهای مورد نظر، درصد خشکی (CPPA Useful Method D.6u) و درجه روانی اولیه خمیر (T227 om-94) اندازه‌گیری شد. برای مواد شیمیایی مورد نیاز این تحقیق، از سود پرک ۹۹٪ (آراکس شیمی)،

جدول ۱- تیمارهای ساخت کاغذ دست‌ساز
Table 1- Treatment of handsheet making

Num.	Code	NSSC	OCC	Long fiber	H2O2	NaClO
1	NC	100%	—	—	—	—
2	OC	—	100%	—	—	—
3	NC70-OC30	70%	30%	—	—	—
4	NC60-OC20-L20	60%	20%	20%	—	—
5	NC70-OC20-L10	70%	20%	10%	—	—
6	N-H	100%	—	—	√	—
7	O-H	—	100%	—	√	—
8	NH70+OH30	70%	30%	—	√	—
9	NH60-OH20-L20	60%	20%	20%	√	—
10	NH70-OH20-L10	70%	20%	10%	√	—
11	N.Na	100%	—	—	—	√
12	O.Na	—	100%	—	—	√
13	N.Na70+O.Na30	70%	30%	—	—	√
14	N.Na60-O.Na20+L20	60%	20%	20%	—	√
15	N.Na70-O.Na20-L10	70%	20%	10%	—	√
16	NH.Na	100%	—	—	√	√
17	OH.Na	—	100%	—	√	√
18	NH.Na70-OH.Na30	70%	30%	—	√	√
19	NH.Na60-OH.Na20-L20	60%	20%	20%	√	√
20	NH.Na70-OH.Na 20-L10	70%	20%	10%	√	√

طرح آماری مورد استفاده در این تحقیق از نوع کاملاً تصادفی است و برای مقایسه بین میانگین‌ها از آزمون دانکن استفاده گردید.

استفاده شد. برای تجزیه و تحلیل آماری نیز از نرم‌افزار SPSS استفاده گردید.

جدول ۲- خلاصه نتایج اکسیداسیون الیاف خمیر کاغذ
Table 2- Summary of pulp fiber oxidation results

Treatments	oxidation with NaOCl				treatment	oxidation with H ₂ O ₂			
	Kappa number	WRV (g/g)	Viscosity (ml/g)	Carboxyl group (mmol/g)		Kappa number	WRV (g/g)	Viscosity (ml/g)	Carboxyl group (mmol/g)
NC	52.33	0.891	310.5	0.0457	NC	52.33	0.891	310.50	0.0457
NC-Na3	12.3	0.911	587.3	0.0431	NC-H3	48.43	0.902	482.50	0.0465
NC-Na4	10.09	0.903	513.7	0.04388	NC-H4	51.46	0.901	482.50	0.0465
NC-Na5	8.75	0.901	731.8	0.04544	NC-H5	50.07	0.908	524.20	0.0464
OC	24.977	0.879	462	0.04493	Oc	24.98	0.879	462.00	0.0449
OC-Na0.5	18.4	0.88	394.8	0.04606	OC-H3	23.68	0.883	497.33	0.0454
OC-Na1	14.67	0.86	464.6	0.04644	OC-H4	16.33	0.876	524.20	0.0459
OC-Na1.5	10.82	0.879	337	0.04666	OC-H5	18.31	0.887	476.40	0.0458

نتایج

خلاصه نتایج بخش اکسیداسیون خمیر کاغذ

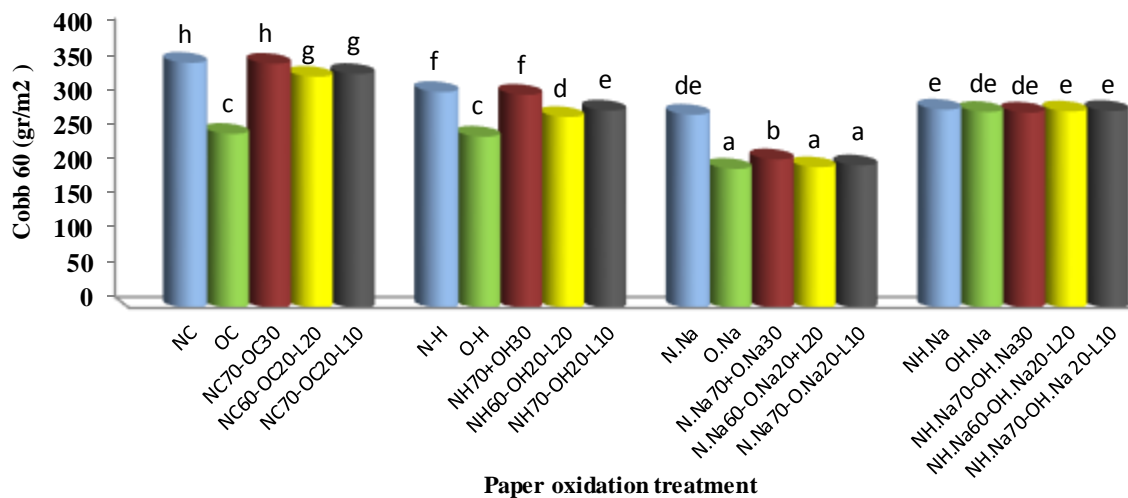
خلاصه‌ای از نتایج اثر اکسیداسیون الیاف با دو ماده هیپوکلریت سدیم و پروکسید هیدروژن در جدول شماره ۱ آمده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود با افزایش میزان مصرف هر دو ماده شیمیایی، در هر دو نوع خمیر کاغذ عدد کاپا کاهش داشته که در این ارتباط اثرگذاری هیپوکلریت بیشتر بوده است.

میزان نگهداری آب در الیاف خمیر کاغذ در تیمارهای خمیر کاغذ NSSC نسبت به خمیر کاغذ شاهد روند افزایشی داشته، در صورتی که در مورد تیمارهای OCC نسبت به تیمار شاهد آن تغییر محسوسی نداشته است. با افزایش سطح مصرف هیپوکلریت، روند افزایش معنی‌دار بین گرانروی خمیر کاغذهای ذکر شده مشاهده می‌شود ولی با افزایش مصرف پروکسید، این ویژگی در خمیرهای NSSC افزایش و در خمیرهای OCC کاهش می‌یابد. مقدار گروه‌های

کربوکسیل خمیر کاغذهای تیمار شده با پروکسید در هر دو نوع خمیر کاغذ NSSC و OCC نسبت به نمونه شاهد افزایش یافت. به‌طور خلاصه می‌توان گفت که اثرگذاری هیپوکلریت در مقایسه با پروکسید در ایجاد گروه‌های کربوکسیل در هر دو نوع خمیر کاغذ بیشتر بوده است.

نتایج مقاومت به جذب آب

شکل ۱ نشان می‌دهد که تیمار اکسیداسیون هیپوکلریت باعث کاهش مقاومت به جذب آب در کاغذهای حاصل می‌گردد. خمیرهای OCC از مقاومت به جذب آب کمتری برخوردارند. بعلاوه، وقتی که تیمارهای ترکیبی اکسیداسیون بر روی خمیرها اعمال می‌شود میزان مقاومت به جذب آب ارتقاء می‌یابد. به‌طور کلی، تیمارهای شاهد دارای ویژگی مقاومت به جذب آب بالاتری هستند.



شکل ۱- اثر فرایند اکسیداسیون بر میزان جذب آب در کاغذ

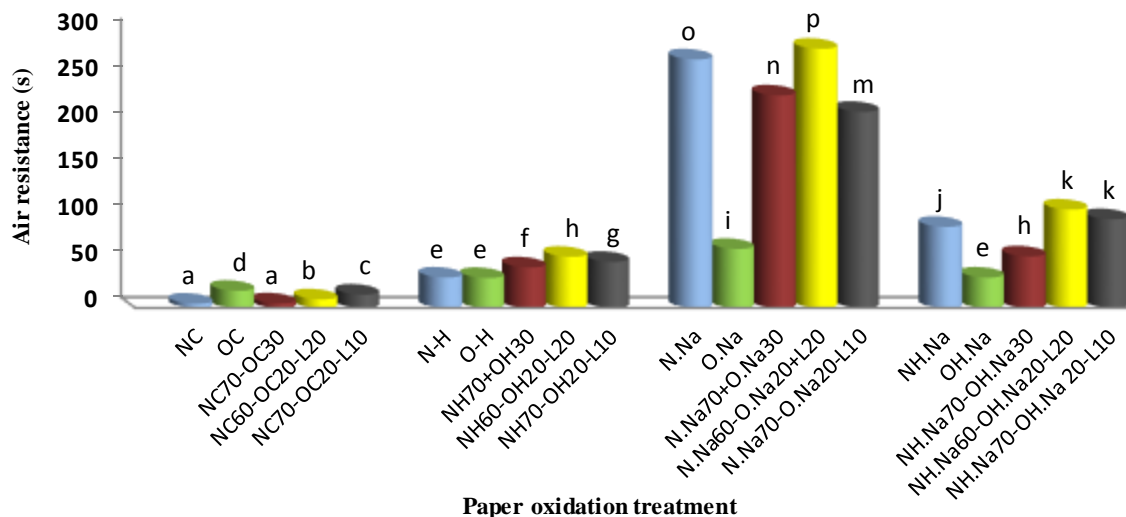
Fig. 1. The effect of the oxidation process on the amount of water absorption in paper

OCC دارای کمترین مقاومت به عبور هواست. در کلیه تیمارهای اکسیداسیون با پروکسید خالص، هیپوکلریت خالص و نیز ترکیب هر دو ماده اخیر، با اضافه شدن خمیر OCC و الیاف بلند به خمیر NSSC، مقاومت به عبور هوا

نتایج مقاومت به نفوذپذیری هوا

براساس نتایج ارائه شده در شکل ۲ کاغذهای حاصل از خمیرهای اکسیدشده با هیپوکلریت از مقاومت به عبور هوای بالاتری برخوردارند. کاغذ حاصل از تیمار خالص

سیر صعودی می یابد. همان گونه که ملاحظه می شود تیمار حاوی ۲۰٪ الیاف بلند (N.Na60-O.Na20-L20) بالاترین مقاومت به عبور هوا برخوردار است.



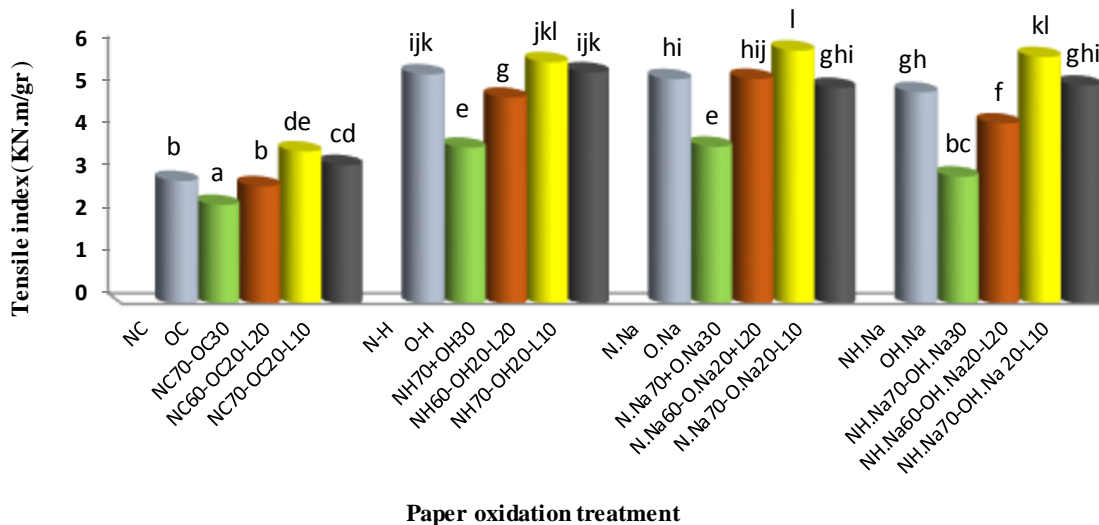
شکل ۲- اثر فرایند اکسیداسیون بر مقاومت به عبور هوا در کاغذ

Fig. 2. The effect of the oxidation process on Air resistance of paper

خمیر OCC به خمیر NSSC باعث افت ویژگی پارگی کاغذ می شود که البته با اضافه کردن الیاف بلند این افت جبران شده و مقدار این ویژگی افزایش می یابد. اثر اکسیداسیون خمیرهای مختلف با پروکسید و هیپوکلریت و نیز تیمارهای ترکیبی هر دو ماده اکسیدکننده بر خمیرهای گوناگون به صورت کلی باعث ارتقای ویژگی پارگی کاغذها در مقایسه با نمونه های شاهد شده است. در کاغذهای حاصل از خمیرهای اکسیدشده با پروکسید نمونه ترکیبی NH70-OH30 دارای شاخص پارگی بیشتری در مقایسه با نمونه های خالص NSSC و OCC است. البته اضافه کردن ۱۰ تا ۲۰ درصد الیاف بلند به خمیر مذکور شاخص پارگی را به طور معنی داری ارتقا می دهد و این موضوع در مورد نمونه های تیمار شده با پروکسید و هیپوکلریت نیز مصداق دارد.

نتایج مقاومت به شاخص کشش شکل ۳ بیانگر آن است که استفاده از فرایند اکسیداسیون برای کلیه تیمارها اثر معنی داری بر روی ویژگی شاخص کشش کلیه کاغذها داشته است. در مقایسه بین سه نوع تیمار اکسیداسیون، مشاهده می شود که تیمار پروکسید و هیپوکلریت از ویژگی های بهتری برخوردارند، به طوری که در بیشتر موارد کاغذهای حاصل از تیمار هیپوکلریت دارای شاخص کشش بیشتری هستند و از سویی بین بیشتر ویژگی های آن با کاغذهای حاصل از خمیرهای تیمار شده با پروکسید اختلاف معنی داری مشاهده نشد. شایان ذکر است که تیمارهای N.Na60-O.Na20-L20 و N.Na60-OH.Na20-L20 در مقایسه با سایر تیمارهای اکسیداسیونی از شاخص کشش بالاتری برخوردارند.

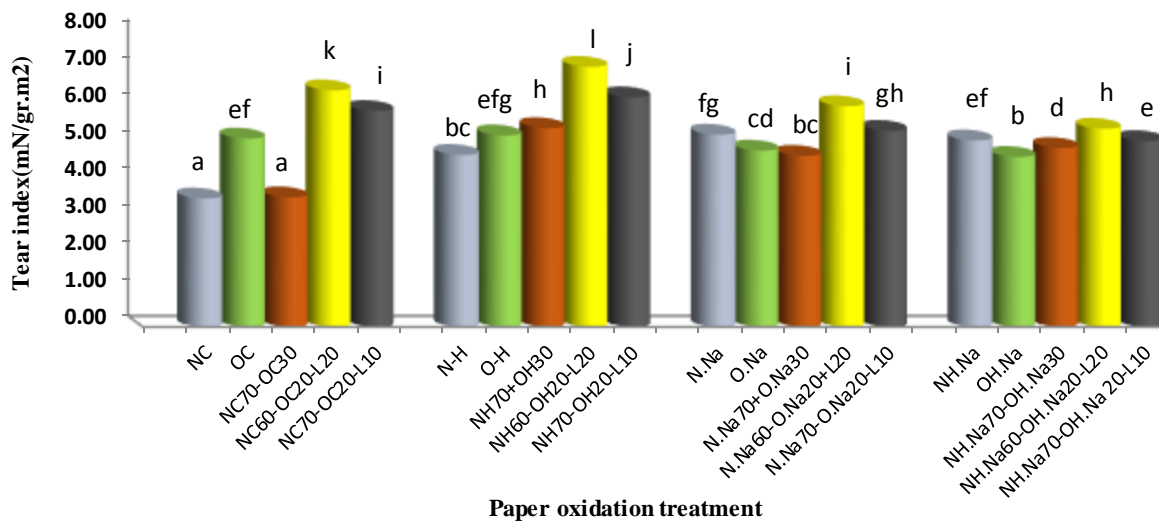
نتایج مقاومت به شاخص پارگی همان گونه که در شکل ۴ مشاهده می شود اضافه کردن



شکل ۳- اثر فرایند اکسیداسیون بر شاخص مقاومت کششی در کاغذ
 Fig. 3. Effect of oxidation process on tensile strength index of paper

شاخص پارگی ارتقا پیدا کرد. این موضوع نشان می‌دهد که خمیر OCC در اثر اکسیداسیون با هیپوکلریت دچار ضعف می‌شود که با اضافه شدن خمیر NSSC این ضعف جبران می‌شود.

در مورد کاغذهای حاصل از خمیرهای تیمار شده با هیپوکلریت، اضافه شدن OCC به NSSC به صورت N.Na70-O.Na30 شاخص پارگی دچار افت می‌شود و زمانی که از ترکیب پروکسید و هیپوکلریت استفاده شد



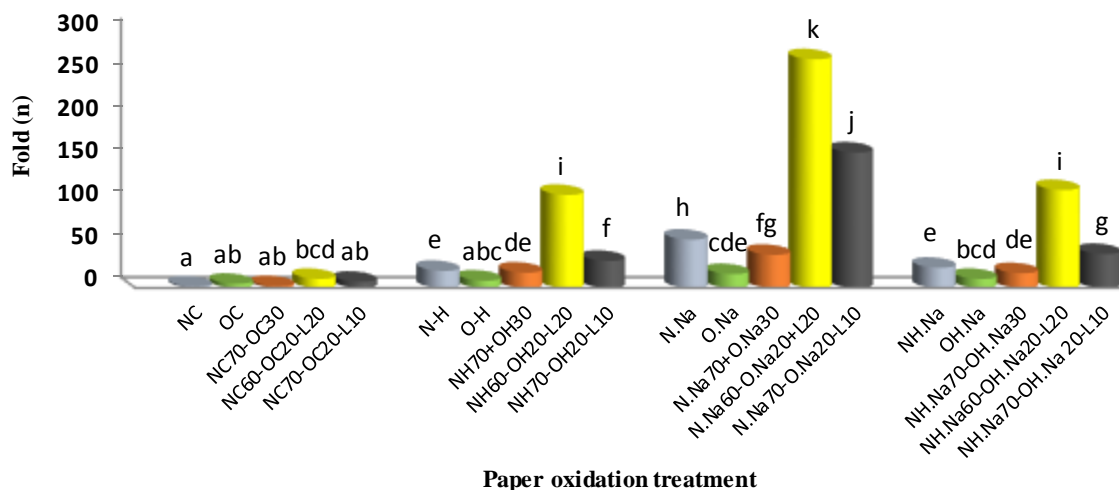
شکل ۴- اثر فرایند اکسیداسیون بر شاخص مقاومت پارگی در کاغذ
 Fig. 4. Effect of oxidation process on tear index of paper

توسط پروکسید و هیپوکلریت نسبت به نمونه شاهد سیر افزایشی داشته است که در تیمارهای اکسیداسیون با

نتایج مقاومت به تاشدگی براساس نتایج ارائه شده در شکل ۵، کاغذهای اکسیدشده

بلند (N.Na60-O.Na20-L20) است که حضور الیاف بلند باعث پیوندیابی بیشتر الیاف در شبکه کاغذ می گردد.

هیپوکلریت این روند خیلی بیشتر بوده است. شایان ذکر است که بهترین تیمار، تیمار حاوی ۲۰٪ الیاف



شکل ۵- اثر فرایند اکسیداسیون بر مقاومت به تاشدگی در کاغذ

Fig. 5. The effect of the oxidation process on the fold resistance of paper

نسبت به نمونه های شاهد سیر صعودی داشته است که در اکسیداسیون با هیپوکلریت نسبت به پروکسید این ویژگی از مقادیر بیشتری برخوردار بوده است. همچنین، ترکیب دو ماده اکسیدکننده نیز باعث افزایش RCT در کاغذها در مقایسه با نمونه شاهد شده ولی در مقایسه با استفاده از مواد اکسیدکننده به صورت تنها، این ویژگی با نقصان مواجه شده است. در این میان بهترین تیمار از نظر این ویژگی، تیمار N.Na70-O.Na20-L10 بوده است.

نمودار پایین شکل ۶ نشان می دهد که در کاغذهای NSSC و OCC با تیمارهای مختلف اکسیداسیون با پروکسید و هیپوکلریت سدیم نسبت به نمونه های شاهد ویژگی مقاومت به لهیدگی لبه کنگره ای (CCT) سیر صعودی داشته است که در رنگبری NSSC و OCC با هیپوکلریت نسبت به پروکسید از نظر ویژگی مقاومت به لهیدگی لبه کنگره کاغذ (CCT) بیشتر بوده است. شایان ذکر آن است که میزان CCT کاغذهای حاصل از تیمارهای هیپوکلریت به تنهایی در مقایسه با بقیه تیمارها از مقادیر بیشتری برخوردارند، به طوری که بیشترین مقدار آن به تیمار N.Na اختصاص یافته

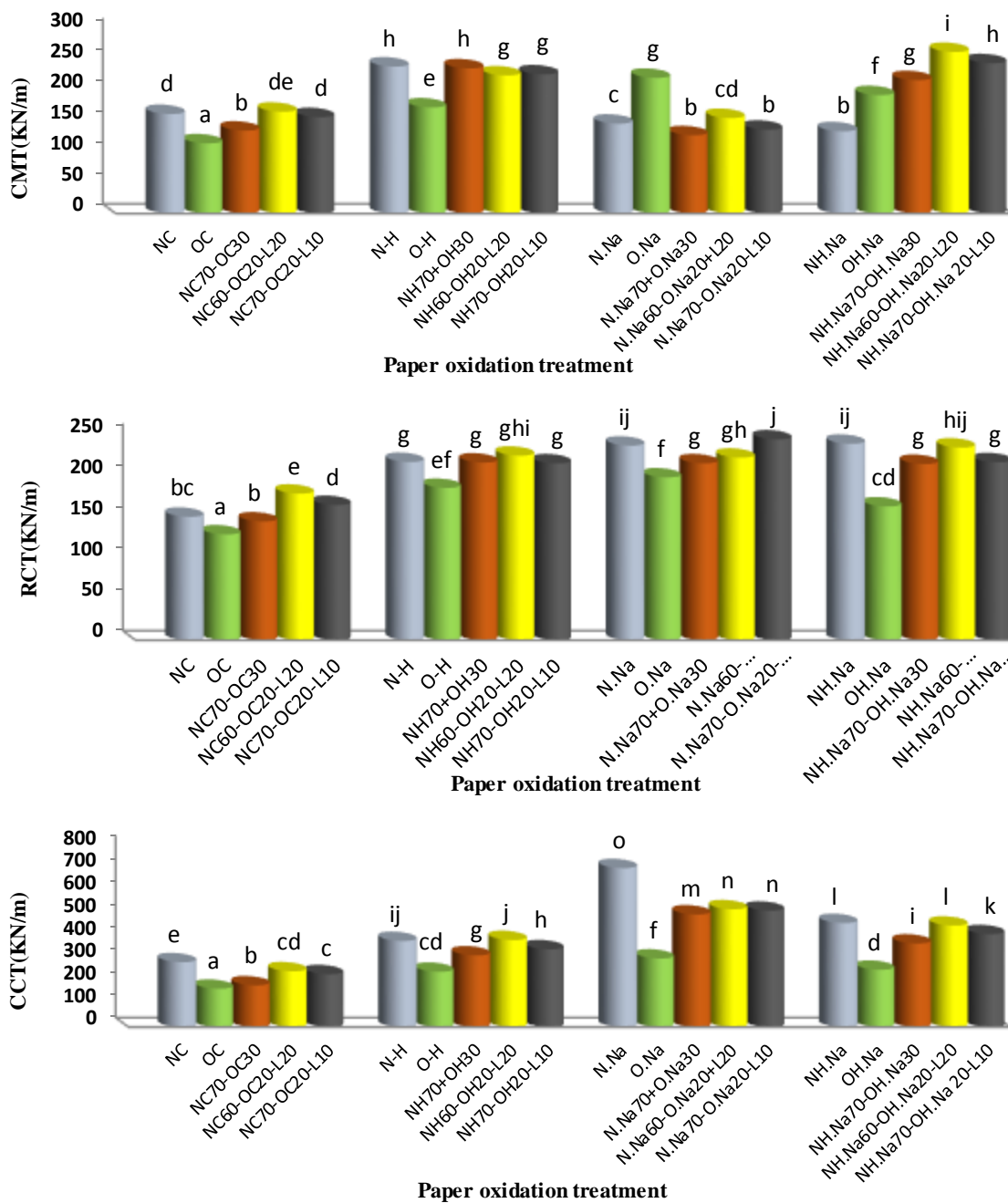
نتایج مقاومت های لهیدگی سطح کاغذ کنگره ای (CMT)، لهیدگی حلقه ای کاغذ (RCT) و لهیدگی لبه کنگره ای کاغذ (CCT)

بر اساس نتایج ارائه شده در نمودار بالای شکل ۶، میزان مقاومت لهیدگی سطح کاغذ (CMT) در کاغذهای NSSC با پروکسید دارای روند افزایشی و کاغذهای NSSC با هیپوکلریت دارای روند کاهشی بوده ولی در کاغذهای OCC با هیپوکلریت سیر صعودی دارد.

و کاغذهای OCC با پروکسید سیر نزولی داشته است. نکته جالب توجه این است که وقتی فرایند اکسیداسیون ترکیبی استفاده می شود ویژگی CMT افزایش می یابد، به طوری که به ویژه در تیمارهای حاوی الیاف بلند این افزایش به طور معنی داری بیشتر است. بنابراین، بهترین تیمار از نظر این ویژگی، -NH.Na60-OH.Na20-L20 است.

همان گونه که در نمودار وسط شکل ۶ نشان داده شده، ویژگی مقاومت به لهیدگی حلقه ای (RCT) در کاغذهای NSSC و OCC با تیمارهای مختلف اکسیداسیون با پروکسید و هیپوکلریت سدیم

افزایش می‌یابد که تیمار N.Na60-O.Na20-L20 دارای ویژگی‌های بهتری است. است. در خمیرهای مخلوط OCC و NSSC، زمانی که با الیاف بلند مخلوط می‌شوند، مقادیر CCT به‌طور معنی‌داری



شکل ۶- اثر فرایند اکسیداسیون بر مقاومت به CMT، RCT و CCT کاغذ

Fig. 6. The effect of the oxidation process on the resistance to CMT, RCT and CCT of paper

بحث

این پژوهش برای بررسی بهبود ویژگی‌های مقاومتی کاغذهای حاصل از خمیرهای NSSC و OCC با استفاده از فرایند اکسیداسیون الیاف انجام شد.

به‌طور کلی تیمارهای شاهد به دلیل داشتن لیگنین بالاتر دارای ویژگی مقاومت به جذب آب بیشتری هستند و با تیمار اکسیداسیون خمیرها و با خروج لیگنین (جدول ۲) از مقدار فاکتور ذکر شده کاسته می‌شود. همچنین، کاغذهای حاصل از خمیرهای اکسید شده با هیپوکلریت از مقاومت به عبور هوای بیشتری برخوردارند. این موضوع می‌تواند به دلیل خروج لیگنین بیشتر باشد، زیرا با خروج لیگنین انعطاف‌پذیری الیاف بیشتر شده و با افزایش گروه‌های کربوکسیل، با ایجاد نقاط پیوندی (Relative Bonded Area) بیشتر، تعداد بیشتری پیوند بین الیاف برقرار می‌شود (Zhang et al., 1994) و فضاهای خالی بین الیاف در شبکه کاغذ کمتر می‌گردد. در بین کاغذهای حاصل از این تیمار، کاغذ حاصل از تیمار خالص OCC دارای کمترین مقاومت به عبور هواست که به نظر می‌رسد که این موضوع به دلیل ویژگی استخوانی شدن الیاف آن باشد که نتوانسته به اندازه تیمارهای حاوی الیاف بکر پیوندهای قوی‌تری برقرار نماید، از این رو در مقایسه با سایر تیمارهای این دسته دارای مقاومت کمتری به عبور هواست. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود تیمار حاوی ۲۰٪ الیاف بلند (N.Na60-O.Na20-L20) از بیشترین مقاومت به عبور هوا برخوردار است.

استفاده از تیمار اکسیداسیون با پروکسید برای کلیه خمیرها باعث می‌شود که کاغذهای حاصل از شاخص پارگی بالاتری برخوردار باشند. از این رو، به نظر می‌رسد که پروکسید در مقایسه با هیپوکلریت از نظر ویژگی پارگی ترجیح دارد. دلیل این موضوع، شاید به ماهیت این دو ماده ارتباط پیدا کند، زیرا با توجه به نتایج ارائه شده در جدول ۲، هیپوکلریت باعث خروج بیشتر لیگنین و متعاقب آن صدمه به زنجیره سلولزی شده و از مقاومت ذات الیاف که مستقیماً بر پارگی کاغذ مؤثر است، می‌کاهد. افزایش گروه‌های کربوکسیل در فرایند اکسیداسیون با هیپوکلریت (جدول ۲) باعث کاهش پارگی و

افزایش مقاومت به کشش می‌شود (Mao et al., 2008). علاوه، بدون حضور الیاف بلند در ترکیب خمیر کاغذ، تیمار NH70-OH30 گزینه مناسب است و با در نظر گرفتن حضور الیاف بلند، تیمار NH60-OH30-L20 دارای بیشترین شاخص پارگی است، هرچند تیمار NH70-OH20-L10 نیز در مقایسه با تیمارهای شاهد از جایگاه مناسبی برخوردار است.

در بیشتر موارد کاغذهای حاصل از تیمار هیپوکلریت دارای شاخص کشش بالاتری هستند، به طوری که تیمارهای N.Na60-O.Na20-L20 و N.Na70-O.Na30 بیشتری برخوردارند. با اثرگذاری هیپوکلریت بر خمیر کاغذ و خروج بیشتر لیگنین، انعطاف‌پذیری الیاف بیشتر شده و در هنگام تشکیل ورقه کاغذ می‌تواند در هم‌رفتگی و شکل‌گیری بهتری یافته و متعاقب آن پیوندهای بیشتر و بهتری برقرار نموده و شاخص کشش را افزایش دهد. همان‌گونه که در جدول ۲ نیز دیده می‌شود افزایش گروه‌های کربوکسیل در اثر اکسیداسیون با هیپوکلریت نیز می‌تواند دلیل دیگری بر افزایش میزان کشش باشد، زیرا گروه‌های اخیر به دلیل واکنش‌پذیری بیشتر باعث ایجاد پیوندهای قوی‌تری در کاغذ نهایی می‌گردند. Saito و همکاران (۲۰۱۰) در فرایند اکسیداسیون خمیر کرافت پهن‌برگ صنعتی گزارش کردند که استفاده از سیستم TEMPO/NaClO/NaClO₂ در این ارتباط باعث شده گروه‌های کربوکسیل تا 0.6 mmol/g در مدت ۶ ساعت رنگبری افزایش یابد. علاوه، Zhang و همکاران (۱۹۹۴) در اکسیداسیون خمیر CTMP با کمک پروکسید هیدروژن به این نتیجه رسیدند که در اثر اکسیداسیون، گروه‌های کربوکسیل زیادتر شده که این موضوع ناشی از خروج لیگنین و افزایش انعطاف‌پذیری الیاف است.

استفاده از اکسیداسیون با هیپوکلریت، با ایجاد نقاط پیوندی بیشتری برای اتصال بین الیاف، مقاومت به تاشدن الیاف بیشتر می‌شود، به طوری که تیمار حاوی ۲۰٪ الیاف بلند (N.Na60-O.Na20-L20) در بین سایر تیمارها از میزان بیشتری از این مقاومت برخوردار است. از آنجایی که افزایش پیوندیابی بین الیاف و افزایش نسبی سطح اتصال

اینکه در این آزمون فشار در حالت حلقه کنگره‌ای بر لبه مقوا وارد می‌شود کاغذی که دارای دانسیته بیشتری باشد مقاومت به لهیدگی لبه کنگره بالاتری خواهد داشت که اکسیداسیون با هیپوکلریت با خروج لیگنین بیشتر می‌تواند باعث فشردگی شبکه کاغذ شده و به این موضوع کمک کند. این ویژگی با مقاومت به له شدن حلقوی کاغذ (RCT) همبستگی مثبتی دارد و نشان‌دهنده میزان سفتی لبه کاغذ کنگره‌ای است و روند آن نیز مانند روند RCT در کاغذهای حاصل از اکسیداسیون با هیپوکلریت است. از این رو، از آنجایی که RCT با اتصال بین الیاف رابطه مستقیم دارد و در اثر خروج لیگنین انعطاف-پذیری الیاف بیشتر می‌شود، به این دلیل پیوند بین الیاف بیشتر شده و این موضوع باعث بهبود ویژگی CCT کاغذ می‌گردد (Tahmasebi et al., 2015; Sarkhosh Rahmani and Talaeipoor, 2011; Roy et al., 2009)؛ بنابراین، می‌توان گفت که اثرگذاری هیپوکلریت بیشتر از پروکسید بوده است و نسبت N.Na70-O.Na20-L10، ترکیب مناسبی برای این تیمار اکسیداسیونی بوده است.

در یک نتیجه‌گیری کلی، استفاده از تیمار اکسیداسیون با پروکسید برای کلیه خمیرها باعث می‌شود که کاغذهای حاصل از شاخص پارگی بیشتری برخوردار باشند؛ اما در استفاده از هیپوکلریت ویژگی‌های مقاومتی متأثر از پیوند بین الیاف مانند مقاومت کشش و مقاومت به تابش بیشتر بهبود پیدا کرده‌اند. از نظر میزان مقاومت CMT، RCT و CCT، فرایندهای اکسیداسیون ترکیبی به‌ویژه در تیمارهای حاوی الیاف بلند اثرگذاری بیشتری داشته‌اند؛ بنابراین، در بین خمیرهای اکسید نشده تیمار NC60-OC20-L20، در خمیرهای اکسید شده با پروکسید تیمار NH60-OH20-L20، در خمیرهای اکسید شده با هیپوکلریت تیمار N.Na60-O.Na20-L20 و در خمیرهای اکسید شده با ترکیب هر دو ماده اکسیدکننده تیمار NH.Na60-OH.Na20-L20 را می‌توان به‌عنوان گزینه‌های منتخب انتخاب نمود.

در پایان، می‌توان گفت که اثرگذاری هیپوکلریت در اکسیداسیون الیاف برای بهبود ویژگی‌های کاغذ کنگره‌ای

الیاف باعث ایجاد مقاومت به تابش بیشتر می‌شود (Andalibian et al., 2013)، در اثر اکسیداسیون با هیپوکلریت نقاط پیوندی بیشتری برای اتصال بین الیاف فراهم می‌گردد (خروج لیگنین بیشتر و ایجاد گروه‌های کربوکسیل بیشتر)، به طوری که با پیوندهای بیشتر استحکام بیشتری برای کاغذ فراهم می‌شود و همین موضوع باعث بهبود مقاومت به تابش الیاف می‌گردد.

از نظر میزان مقاومت‌های CMT، RCT و CCT، فرایندهای اکسیداسیون ترکیبی به‌ویژه در تیمارهای حاوی الیاف بلند اثرگذاری بیشتری داشته‌اند. اثر اکسیداسیون با پروکسید و هیپوکلریت بر روی میزان مقاومت لهیدگی سطح کاغذ در کاغذهای NSSC و OCC کاملاً متفاوت و در جهت عکس هم عمل می‌کنند. ولی در تیمارهای ترکیبی CMT بیشتری حاصل می‌شود، به طوری که بهترین تیمار از نظر این ویژگی NH.Na60-OH.Na20-L10 است. اساساً، ویژگی CMT تا حدود زیادی متناسب با RCT است، به طوری که با افزایش خروج لیگنین و ایجاد پیوندهای بیشتر بین الیاف بر سفتی کاغذ اضافه شده و این موضوع باعث افزایش مقدار CMT آنها می‌شود (Asadpour et al., 2008). این ویژگی یکی از مهمترین مقاومت‌های کاغذ کنگره‌ای لایه میانی کارتن است و با سطح نسبی اتصالات داخلی کاغذ ارتباط مستقیم دارد (Sarkhosh Rahmani and Talaeipoor, 2011).

اثر هر دو اکسیدکننده بر ویژگی مقاومت به لهیدگی حلقه‌ای (RCT) در کاغذهای NSSC و OCC در تیمارهای خالص سیر صعودی داشته و در حالت ترکیبی باعث کاهش RCT در کاغذها می‌شود. در این میان، بهترین تیمار از نظر این ویژگی تیمار N.Na70-O.Na20-L10 بوده است.

اثر اکسیداسیون با هیپوکلریت در ویژگی مقاومت به لهیدگی لبه کاغذ (CCT) در مقایسه با پروکسید بهتر بوده است. در این میان، وجود الیاف بلند در ارتقای این ویژگی اثرگذارتر بوده است، به طوری که از نظر این ویژگی تیمار N.Na60-O.Na20-L20 در جایگاه مناسب‌تری قرار می‌گیرد. این موضوع ناشی از افزایش نقاط پیوندی، بیشتر به علت اضافه شدن الیاف بلند است. گفتنی است با توجه به

۲۰٪ الیاف بلند به همراه خمیرکاغذ استفاده کرد.

اثرگذارتر بوده ولی برای رفع برخی نقصان‌ها، حتماً بایستی از

References

- 56:227–232.
- Andalibian, M.A., Mahdavi, S., Kermanian, H. and Ramezani, O., 2013. The influence of OCC pulp refining to improve the properties of test liner board, *Iranian Journal of Wood and Paper Science Research*, 28(1): 77-88. (In Persian)
- Dence, Carlton W. and Douglas W. Reeve, 1996. *Pulp Bleaching: Principles and Practice*, Technical Association of the Pulp and Paper Industry,
- Esmaeili, O., Rasooly Garmaroody, E. and Djafari Petroudy, S.R., 2023. Effect of Alkali Oxidation of fiber on characteristic of virgin and recycled pulp, *Iranian Journal of Wood and Paper Science Research*, 38(4): 316-329. (In Persian)
- Kim, U.J., 2000 Periodate Oxidation of Crystalline Cellulose. *Biomacromolecules* 1(3):488–492.
- Mao, L., Law, L., Claude, D. and Francois B., 2008. Effects of Carboxyl Content on the Characteristics of TMP Long Fibers, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 47, 3809–3812.
- Martinsson, A., Hasani, M and Theliander, H., 2022. Physical properties of kraft pulp oxidized by hydrogen peroxide under mildly acidic conditions, *Nordic Pulp & Paper Research Journal*, 37(2): 330–337.
- Rasoulpour Hedayati, N., Nazamezhad, N. and Ramezani, O., 2014, Fiber Surface Modification of Kraft Pulp in Presence of Chitosan Polymer, 67(3): 489-501.
- Roy, D., Semsarilar, M., Guthrie, J.T. and Perrier, S., 2009. Cellulose modification by polymer grafting. *Preview of Chemical Society Review*, 38(7):18252148.
- Saito, T., Hirota, M, Tamur, N. and Isoga, A., 1994. Oxidation of bleached wood pulp by TEMPO/NaClO/NaClO₂ system: effect of the oxidation conditions on carboxylate content and degree of polymerization. *Journal of Wood Science*,
- Sarkhosh Rahmani, F. and Talaeipoor, M., 2011. Study on production of fluting paper from wheat straw soda – AQ pulp and OCC pulp blends, *Iranian Journal of Wood and Paper Science Research*, 26(2): 387-397. (In Persian).
- Sharma, N., Bhardwaj, N.K., Bhushan, R. and Singh, P., 2020. Environmental issues of pulp bleaching and prospects of per acetic acid pulp bleaching: A review, *Journal of Cleaner Production*, 256, 120338.
- Talaipour M. and Qorbhani Kurdkhali R., 2012. The fractionation of OCC pulp and the effect of mixing it with kraft pulp on the physical and mechanical properties of paper. *Renewable natural resources research*, 2(2): 72-86. (In Persian)
- Xian, L. J., Geng, B.J., Aidawati, W. N. Nadhari, W. and Peng, L.C., 2020. Optimal Hypochlorite Bleaching Duration for *Sesbania grandiflora* Pulp. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 596, 012011
- Zeb, H., Hussain, M.S., Ahmed, I. Akram, M.S., Haider, B., Haider, R, Babar, Z. B., Saleem, R. M., Ahsan, A., Aziz, I. and Arif, M., 2021. Study of bleaching of old newsprint recycled paper: reproduction of newspaper material. *Materials Research Express*, 085305.
- Zhang, D., Pu, Y., Courchene, C.E., Chai, X. S. and Ragauskas, A., 2006. Total fiber charge of fully bleach SW Kraft pulps. A Comparative study. *Journal of pulp and paper Science*, 32 (4):231-237.
- Zhang, D.C., Kim,D., Allisem, A., Dang, Z., and Raguskas, A.J., 2005. The fate of fiber charge during peroxide bleaching and oxygen deignification. *Pulp bleaches Conf. Stockholm, Sweden*.
- Zhang, Y., Sjögren, B., Engstrand, P. and Htun, M., 1994 Determination of Charged Groups in Mechanical Pulp fibers and Their Influence on Pulp Properties, *Journal of Wood Chemistry and Technology*, 14:1, 83-102.