مقاله پژوهشی

نشریه علمی تحقیقات علوم چوب و کاغذ ایران
جلد ۳۶ شماره ۴، صفحه ۳۹۳-۳۸۲ (۱۴۰۰)

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22092/ijwpr.2021.354497.1680
شناسه دیجیتال (DOR): 20.1001.1.17350913.1400.36.4.8.2

اثر جزءجزءسازی و حذف کلاسه‌های ریز از خمیر کارتن‌های کنگره‌ای کهنه بر ویژگی‌های مقوای تولیدی در مقایسه با کاربرد الیاف بلند

سید سعید شمسی[۱]، امیر خسروانی[۲*] و مهدی رحمانی‌نیا[۳]

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، مازندران، ایران.

۲*- نویسنده مسئول، دانشیار، گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، مازندران، ایران،

پست‌الکترونیک: khosravani@modares.ac.ir

۳- دانشیار، گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، مازندران، ایران.

تاریخ دریافت: مهر ۱۳۹۹ تاریخ پذیرش: اردیبهشت ۱۴۰۰

چکیده

یکی از رایج‌ترین فرایندهای تولید کاغذ و مقوا در ایران، تولید انواع مقوای لاینر و کنگره‌ای از خمیرکاغذ بازیافتی کارتن‌های کنگره ای کهنه (OCC) می‌باشد. ازآنجاکه افزایش جمعیت، رشد مصرف و نیز راه‌اندازی واحدهای جدید تولیدی سبب کمبود ماده اولیه و الیاف مصرفی در صنعت کاغذ شده، صنعت بازیافت کاغذ با اتکا به الیاف بازیافتی جایگاه مناسبی در دنیا و ایران کسب نموده است. در این میان کمبود چوب در کشور، نوسانهای شدید ارز و افزایش قیمت خمیرکاغذ الیاف بلند وارداتی باعث شده تا مصرف الیاف بکر و نیز الیاف بلند وارداتی به‌منظور اختلاط با الیاف بازیافتی به‌منظور بهبود کیفیت کاغذهای بازیافتی نیز محدود شود. از این‌رو به دلایل متعدد، کیفیت مقواهای بازیافتی تولیدی در بیشتر صنایع داخلی قابل رقابت با محصولات مشابه وارداتی نمی‌باشد. این تحقیق به‌منظور بررسی راهکارهایی برای دستیابی به ویژگی‌های مطلوب کاغذ تولیدی از طریق کلاسه‌بندی الیاف خمیر بازیافتی (قبل از پالایش) توسط دستگاه کلاسه‌بندی باورمکنت، جزءجزءسازی و حذف کلاسه‌های ریز مورد نظر انجام شد و ویژگی‌های مقواهای حاصل با مقواهای حاوی درصدهای مختلفی از الیاف بلند مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج تحقیق نشان داد با حذف کلاسه‌های ریز اعم از نرمه‌های الیاف و پرکننده‌ها، شاخص‌های مقاومت به کشش و مقاومت به پاره‌شدن افزایش معنی‌داری یافتند. این افزایش به حدی بود که کاغذهای فاقد کلاسه‌های ریز الیاف و پرکننده‌ها نه‌تنها قابل رقابت با کاغذهای حاوی مقادیر مختلف الیاف بلند بوده‌اند بلکه در برخی شاخص‌ها برتری مقاومتی نسبی نیز از خود نشان داده‌اند.

واژه‌های کلیدی: جزءجزءسازی خمیرکاغذ، کلاسه‌بندی الیاف، نرمه‌های الیاف، کارتن کنگره‌ای کهنه، بازیافت کاغذ.

مقدمه

با افزایش جمعیت و رشد مصرف و نیز راه‌اندازی واحدهای جدید تولید محصولات لیگنوسلولزی، کمبود ماده اولیه چوبی و الیاف مصرفی در صنعت کاغذ کشور بیش‌ازپیش محسوس شده است. از سوی دیگر، با توجه به نوسانهای شدید ارز در داخل کشور و درنتیجه افزایش شدید قیمت خمیرکاغذ الیاف بلند وارداتی، مصرف الیاف بکر و نیز الیاف بلند وارداتی با محدودیت مواجه گردیده است.

در کشورهای مختلف دنیا استفاده از خمیرکاغذهای باطله یکی از مهمترین‌منابع تأمین ماده اولیه در صنایع خمیرکاغذ

است، به‌طوری‌که برای تولید کاغذ و مقوا در جهان، حدود یک‌سوم الیاف از کاغذهای باطله تأمین می‌گردد (Pati *et al.*, 2006). از بین انواع کاغذ و مقوا، مقوای کنگره‌ای کهنه به لحاظ استفاده زیاد، در مقایسه با سایر کاغذها یکی از پرکاربردترین منابع لیفی بازیافتی در صنعت بازیافت کاغذ کشور محسوب می‌شود.

اما معمولاً کیفیت محصولات تولید شده از الیاف بازیافتی کمتر از محصولات ساخته شده از الیاف بکر است. در اثر عمل بازیافت به‌ویژه در کاغذهای شیمیایی، تغییراتی در کاغذ و الیاف به‌وجود می‌آید که این تغییرات می‌تواند در خصوصیات کاغذ تولیدی به‌ویژه ویژگی‌های مکانیکی تأثیر منفی بگذارد و سبب کاهش مقاومت‌های کششی، ترکیدن، تا شدن، پاره شـــدن و تا حدودی کاهش دانسیته ظاهری کاغـذ شود (Andalibian *et al.*, 2013; Rahmaninia & Khosravani, 2015).

افزایش درصد الیاف بازیافتی و ایجاد تغییرات زیاد در ویژگی‌های مواد اولیه لیفی، مشکل فنی بسیار متداول برای صنعت کاغذ بسته‌بندی در سراسر جهان است و تولید کاغذ بسته‌بندی را با چالش مواجه کرده است. ایجاد نرمه و کوتاه شدن میانگین طول الیاف (Latibari *et al.*, 2007; Wathén *et al.*, 2006)، تغییرات فیزیکی و ساختاری الیاف در اثر بازیافت و پدیده استخوانی شدن (Latibari *et al.*, 2007; Bichard, 1992)، کاهش مقاومت‌ها (Kermanian *et al.*, 2013; Khalili *et al.*, 2009) و همراه داشتن آلاینده‌ها از مشکلات عمده هستند. در این میان از مهمترین ویژگی‌های مؤثر ساختاری الیاف می‌توان به میانگین و پراکنش طول الیاف اشاره نمود. به‌طوری‌که عقیده بر آن است که به‌صورت نسبی معمولاً با افزایش میانگین طول الیاف و افزایش سهم الیاف بلندتر در خمیرکاغذ، شبکه محکم‌تری از الیاف تشکیل می‌شود (Jang & Seth, 2004). در اثر کاهش طول الیاف، به‌ترتیب ویژگی‌های مقاومت به تاخوردن، مقاومت به پاره شدن، مقاومت به ترکیدن و مقاومت به کشش تحت تأثیر منفی قرار می‌گیرند.

همان‌طور که ذکر شد، یکی از اثرهای مهم بازیافت پی‌درپی الیاف، خرد شدن و کوتاه شدن بیش‌ازحد الیاف و افزایش بیش‌ازحد سهم اجزای ریز در خمیرکاغذ می‌باشد. حضور درصد زیاد اجزای ریز و نرمه‌ها می‌تواند در فرایند آبگیری از ورقه تر (به‌ویژه در کاغذهای با وزن پایه زیاد) اثر منفی داشته باشد که این مسئله به‌خودی‌خود سبب ایجاد تأثیر منفی در فرایند تولید خواهد شد. بر اساس تعاریف موجود در استاندارد TAPPI T261 cm-00 نرمه‌ها، قطعات ریزی از الیاف هستند که قـادرند از توری با حفره‌های به قطر ۷۵ میکرومتر و یا از الک با مش ۲۰۰ عبور کنند. نرمه‌ها در مقایسه با الیاف، دارای ۳ تا ۵ برابر سطح ویژه بیشتری هستند و به‌طورکلی با پر کردن منافذ ورقه تر الیاف و نگهداری آب سبـب کندشدن فرایند آبگیری در کاغذسازی می‌شوند (TAPPI T-261 cm-00).

از سوی دیگر، حضور درصد زیاد ذرات ریز در خمیرکاغذ بازیافتی می‌تواند منجر به عدم ماندگاری آنها و از دست رفتن بخشی از خمیرکاغذ گردد که به‌معنای کاهش میزان تولید است. به‌علاوه این اجزا با ورود به پساب می‌توانند باعث ایجاد انواع مشکلات فرایندی و زیست‌محیطی ازجمله افزایش میزان مواد جامد معلق پساب (TSS[1]) گردند.

معمولاً به‌منظور حفظ ذرات ریز و همچنین رفع مشکلات فرایندی از مواد افزودنی (پلی‌الکترولیت‌های کمک فرایندی) استفاده می‌شود. همچنین برای جبران کاستی‌های مقاومتی افزودن درصد معینی خمیر الیاف بلند و یا بکر به‌عنوان یک راهکار پایه انجام می‌گردد (Minor *et al.*, 2000; Wathen *et al.*, 2006; Rasa *et al.*, 2012)؛ اما در این زمینه، با توجه به مشکلات متعدد مانند نوسانهای شدید ارز و افزایش شدید قیمت خمیر الیاف بلند وارداتی، محدودیت در واردات چوب، کاهش مصرف الیاف بکر و الیاف بلند وارداتی، اجرای طرح تنفس جنگل و کاهش شدید تولید خمیر بکر داخلی، استفاده از راهکارهای جایگزین را اجتناب‌ناپذیر نموده است. از سویی کیفیت کاغذهای مقوای تولیدی در بیشتر واحدهای

1-Total Suspended Solids

تولیدی کاهش قابل‌ملاحظه‌ای داشته‌اند که یافتن راه‌حل برای رفع این مشکل در شرایط مختلف از ضروریات می‌باشد.

بر همین اساس، تحقیقاتی در زمینه جزءجزء کردن[1] خمیرکاغذ بازیافتی با شرایط متفاوت و یا در ترکیب با الیاف بلند انجام شده است که با توجه به شرایط متفاوت و این مفهوم که چه اجزایی از خمیرکاغذ جدا شوند، تفاوت‌هایی مشاهده می‌شود (Talaeipour & 2011؛ Rayatinejad, 2019 ,Ghorbani). در این تحقیق به‌منظور ارائه راهکارهایی برای رفع مشکلات ناشی از کاهش میانگین طول الیاف و ضعف درهم‌رفتگی شبکه‌ای ورقه کاغذ و کاهش هزینه افزودن خمیرکاغذ بکر شیمیایی الیاف بلند گران‌قیمت، اقدام به حذف بخشی از کلاسه‌های اجزای بسیار ریز خمیرکاغذ بازیافتی گردید و نتایج در مقایسه با راهکار افزودن خمیرکاغذ بکر شیمیایی الیاف بلند، به لحاظ فنی مورد مطالعه قرار گرفت تا در ادامه اثر این دو روش بر ویژگی‌های کیفی کاغذ تولیدی مورد مقایسه قرار گیرد.

مواد و روش‌ها

مواد

خمیرکاغذ موردتحقیق، خمیرکاغذ حاصل از بازیافت کارتن های کنگره‌ای کهنه (OCC)[2] بوده است که از کارخانه OCC شرکت چوب و کاغذ مازندران تهیه شد. پس از تهیه خمیرکاغذ مورد نظر، نمونه خمیرکاغذ در یخچال در دمای 5^{o} C نگهداری گردید. همچنین الیاف بلند مورد استفاده، الیاف سفیدنشده سوزنی‌برگان حاصل از فرایند کرافت، به‌صورت ورقه‌های مقوایی خشک از شرکت چوب و کاغذ مازندران تهیه شد.

طبقه‌بندی و کلاسه‌بندی خمیرکاغذ بازیافتی (پیش از پالایش) طبق استاندارد TAPPI T233 sp-02 توسط دستگاه BauerMcNett انجام شد. به همین منظور، پس از قراردادن انواع مش‌های (توری) (۵۰، ۱۰۰، ۲۰۰ و ۴۰۰) داخل دستگاه، فرایند کلاسه‌بندی الیاف انجام شد. البته شایان ذکر است، در ارزیابی‌های متداول خط تولید، به‌طورمعمول اجزای مانده بر روی مش ۴۰۰ جمع‌آوری و ارزیابی نمی‌شوند. در ضمن در ارتباط با عنوان تیمارها در جدول ۱، لازم به توضیح است که به‌صورت نمونه تیمار با عنوان: خمیرکاغذ شاهد پس از حذف اجزاء کلاسه مش ۴۰۰-، اشاره به استفاده از اجزای خمیرکاغذ بزرگ‌تر از مش ۴۰۰ برای تولید کاغذ دست‌ساز و حذف بخش‌های عبور کرده از غربال می‌باشد (جدول ۱).

همچنین با هدف مطالعه و مقایسه میزان ذرات ریز در خمیرکارتن‌های کنگره‌ای کهنه بازیافتی در شیفت‌های مختلف تولیدی در برخی کارخانه‌های داخلی، چند نمونه خمیرکاغذ از هر یک مورد کلاسه‌بندی و مقایسه قرار گرفت.

مطالعه میزان خاکستر خمیرکاغذ بر اساس شیوه‌نامه استاندارد TAPPI T211 om-02 انجام گردید. پس از جداسازی کلاسه های مختلف خمیرکاغذ بازیافتی بر اساس جدول ۱، پالایش الیاف تا رساندن خمیرکاغذ نهایی در هر تیمار تا حد درجه روانی ۳۰۰ میلی‌لیتر (CSF) انجام شد. در ادامه، ساخت مقوای دست‌ساز با وزن پایه ۱۲۰ گرم بر مترمربع طبق شیوه‌نامه استاندارد TAPPI T205 sp-02 با استفاده از دستگاه ساخت کاغذ دست‌ساز شرکت PTI اتریش انجام شد.

اندازه‌گیری ویژگی‌های مقوای تولید شده

وزن پایه کاغذ مقوا بر اساس استاندارد TAPPI T410 om-02، ضخامت ورقه مقوا بر اساس شیوه‌نامه استانداردTAPPI T411 om-97، تعیین حجیمی مقوا از تقسیم ضخامت بر وزن پایه، اندازه‌گیری مقاومت به کشش بر اساس شیوه‌نامه استانداردTAPPI T 494 om-01 و شاخص مقاومت به پاره شدن طبق دستورالعمل استاندارد-T414 om TAPPI 04 اندازه‌گیری شدند. همچنین اندازه‌گیری مقاومت به لهیدگی حلقه‌ای با استفاده از دستگاه Ring Crush Tester ساخت شرکت L&W بر اساس استاندارد TAPPI T402 om-97 انجام شد.

1-Fractionation

2– Old corrugated container

جدول ۱- ترکیب کلاسه‌بندی الیاف برای تولید مقوا

ردیف	نوع تیمار
۱	خمیرکاغذ شاهد (خمیرکاغذ بازیافتی کارخانه)
۲	خمیرکاغذ شاهد پس از حذف اجزاء کلاسه مش ۴۰۰-
۳	خمیرکاغذ شاهد پس از حذف اجزاء کلاسه مش ۲۰۰- (حذف نرمه)
۴	خمیرکاغذ شاهد پس از حذف اجزاء کلاسه مش ۵۰-
۵	خمیرکاغذ شاهد بعلاوه ۵٪ الیاف بلند (بر اساس وزن خشک الیاف)
۶	خمیرکاغذ شاهد بعلاوه ۱۰٪ الیاف بلند (بر اساس وزن خشک الیاف)

میکروسکوپ الکترونی روبشی (FE-SEM)[1]

همچنین به‌منظور مطـــالعه و مقایسه تصویری بافت و ساختار کاغذ مقوا، از تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FE-SEM) دستگاه Tescan MIRA3 XMU (ساخت کشور چک) در بزرگنمایی‌های مختلف استفاده شد.

روش‌های تحلیل آماری

برای تجزیه آماری داده‌ها از آنالیز واریانس یک‌طرفه استفاده شد. نرمال بودن داده‌ها با استفاده از آزمون Kolmogorov-Smirnov و همگنی واریانس با استفاده از آزمون Levene بررسی شد. برای مقایسه میانگین‌ها نیز از آزمون چند دامنه دانکن استفاده شد. کلیه تحلیل‌های آماری در محیط نرم‌افزار SPSS Ver. 24 انجام شد.

نتایج

کلاسه‌بندی خمیر کارتن‌های کنگره‌ای کهنه

نتایج حاصل از بررسی مقدار درصد خمیرکاغذ مانده بر روی مش‌های ۵۰، ۲۰۰ و ۴۰۰ به‌شرح مندرج در جدول ۲ قابل مشاهده است. همچنین نتایج حاصل از ارزیابی خمیر OCC کارخانه چوب و کاغذ مازندران در دو شیفت کاری مختلف، فقط به‌منظور اطلاع و مقایسه، در کنار داده‌های خمیرکاغذ مورد بررسی در این پژوهش، در جدول ۲ ارائه گردید. شایان ذکر است که در ارزیابی متداول خط تولید، به‌طورمعمول اجزای مانده بر روی مش ۴۰۰ جمع‌آوری و ارزیابی نمی‌شوند. به همین دلیل در نمونه‌های کارخانه ۱ و ۲، بخش از دست رفته شامل نرمه‌های کوچک‌تر از مش ۲۰۰ بوده است، درحالی‌که به‌طور خاص در این پژوهش در مورد نمونه مورد بررسی، بخش ازدست‌رفته شامل ذرات ریز کوچک‌تر از مش ۴۰۰ مورد توجه قرار گرفته است.

نتایج جـــدول ۲ نشان می‌دهد که بخش قابل‌توجهی از خمیرکاغذ OCC مورد مطالعه (بیش از ۴۰ درصـد کل خمیرکاغذ) را بخش نرمه‌ها و مواد ریز کوچک‌تر از مش ۲۰۰ تشکیل داده‌اند.

بررسی بافت سطح کاغذ از طریق میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)

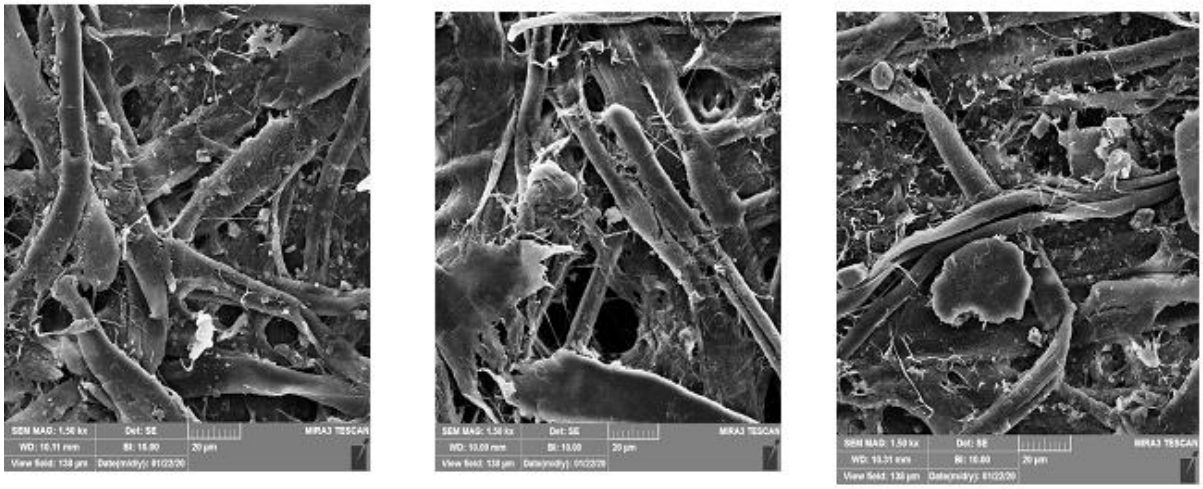
پس از تولید مقوا از انواع خمیرکاغذ آماده شده از کلاسه‌های مختلف طبق جدول ۱، برای مقایسه بافت سطح انواع مقوای تولید شده از سه نمونه مقوای تهیه شده از خمیرکاغذ شاهد، خمیر روی مش ۵۰ و خمیر شاهد حاوی ۱۰ درصد الیاف بلند، تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی تهیه شد (شکل ۱).

1 -Field Emission Scanning Electron Microscopy

جدول ۲- نتیجه کلاسه‌بندی اولیه خمیرکاغذ OCC و درصد الیاف جداشده توسط غربال‌های با مش‌بندی‌های مختلف در دستگاه باورمکنت (شرایط خمیر مورد بررسی درصد خشکی ۴/۸ درصد، دما ۲۶ درجه سانتی‌گراد و میزان خاکستر ۱۳/۴ درصد بوده است)

نوع خمیرکاغذ	نمونه روی مش ۵۰	نمونه روی مش ۲۰۰	نمونه روی مش ۴۰۰	از دست رفته*
خمیرکاغذ OCC مورد بررسی	۴۶/۲	۱۲/۷	۳/۲	۳۷/۹
خمیرکاغذ OCC کارخانه ۱	۳۹/۴	۱۴/۷	–	۴۵/۹
خمیرکاغذ OCC کارخانه ۲	۵۱	۱۷/۷	–	۳۱/۳

*: در نمونه‌های کارخانه ۱ و ۲، بخش از دست رفته شامل نرمه‌های کوچک‌تر از مش ۲۰۰ بوده، درحالی‌که در نمونه مورد بررسی، بخش از دست رفته شامل ذرات ریز کوچک‌تر از مش ۴۰۰ مورد توجه قرار گرفته است.



c b a

شکل ۱- مقایسه تصویر SEM از سطح نمونه‌ها (a: خمیر شاهد، b: خمیر روی مش ۵۰، c: خمیر شاهد حاوی ۱۰ درصد الیاف بلند)

بافت سطح کاغذ نشان می‌دهد که در کاغذ حاصل از خمیر مانده بر روی مش ۵۰ (تصویر وسط)، ذرات معدنی (ناشی از پرکننده‌ها) تقریباً مشاهده نمی‌شوند، درحالی‌که دو نمونه دیگر به‌وضوح حاوی مواد معدنی در سطح هستند.

حجیمی مقوا[1]

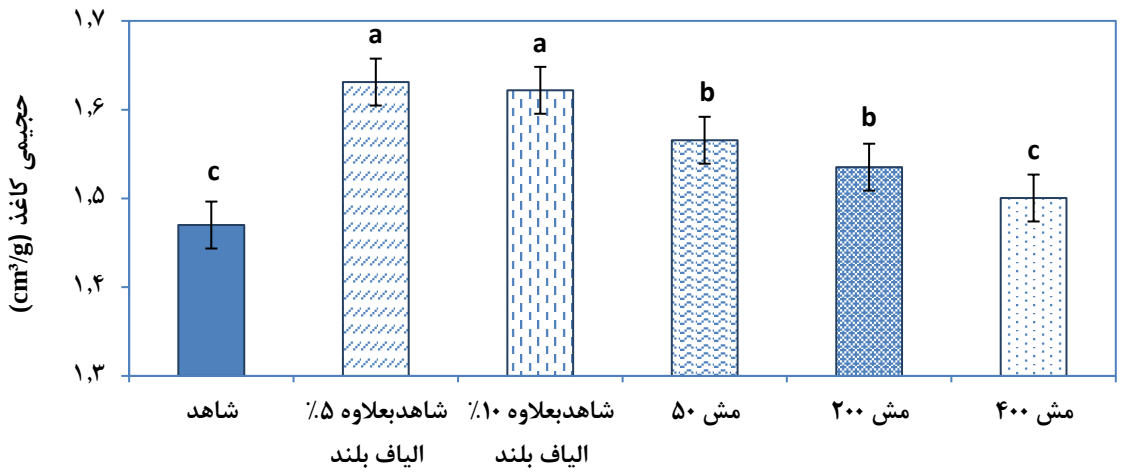
جدول ۳ نتایج تحلیل آماری داده‌های مربوط به حجیمی انواع مقوای تولیدی از کلاسه‌بندی‌های ابعادی مختلف خمیر OCC را نشان می‌دهد. تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که حجیمی کاغذ در بین تیمارهای مختلف در سطح اعتماد ۹۹٪ با یکدیگر تفاوت معنی‌دار داشته‌اند.

شکـــل ۲ نشان می‌دهد با خروج ذرات ریز و نرمه‌ها میزان حجیمی کاغذ افزایش یافته است و از سوی دیگر با افزودن الیاف بلند به خمیرکاغذ نیز حجیمی کاغذ افزایش قابل ملاحظه‌ای نشان داده است.

1- Bulk

جدول ۳- تجزیه واریانس حجیمی کاغذ در تیمارهای مختلف

منبع تغییرات	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	F	Sig.
اثر کلاسه‌بندی	۰/۲۱۴	۵	۰/۰۴۳	۱۸/۱۳۴	۰/۰۰۰
خطای آزمایشی	۰/۱۲۷	۵۴	۰/۰۰۲		
کل	۰/۳۴۱	۵۹			



شکل ۲- مقایسه میانگین‌های حجیمی کاغذ در تیمارهای مختلف (شماره‌های مش غربال که الیاف روی آن جمع شده است)

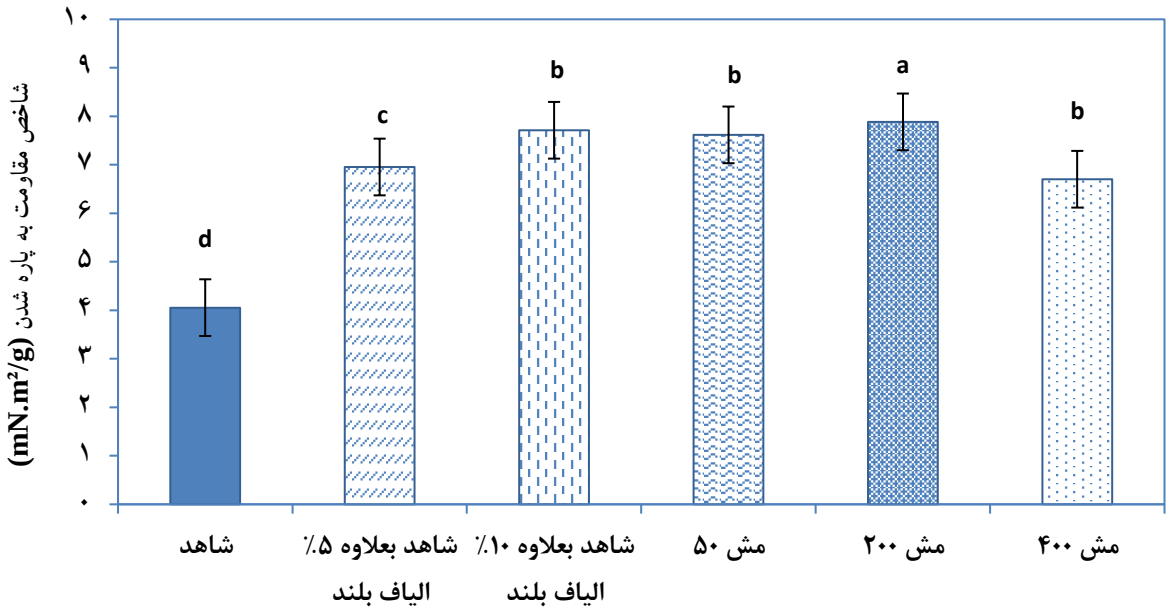
شاخص مقاومت به پاره‌شدن

شاخص مقاومت به پاره‌شدن کاغذ یکی از ویژگی‌های مهم کاغذ است که تحت تأثیر طول الیاف، وضعیت پیونددهی در ورقه کاغذ و مقاومت ذاتی الیاف می‌باشد. با توجه به تأثیرگذاری زیاد طول الیاف بر این مقاومت، ارزیابی شاخص مقاومت به پاره‌شدن مورد توجه قرار گرفت. تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که در سطح اعتماد ۹۹٪، مقاومت به پاره‌شدن کاغذ در بین تیمارهای مختلف تفاوت معنی‌دار داشته‌است (جدول ۴).

جدول ۴- تجزیه واریانس مقاومت به پاره‌شدن کاغذ در تیمارهای مختلف

منبع تغییرات	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	F	Sig.
اثر کلاسه‌بندی	۲۸/۸۸۸	۵	۵/۷۷۸	۸۵/۹۵۵	۰/۰۰۰
خطای آزمایشی	۱/۶۱۳	۲۴	۰/۰۶۷		
کل	۳۰/۵۰۱	۲۹			

شکل ۳ مقایسه شاخص مقاومت به پاره‌شدن را در مورد تیمارهای مختلف نشان می‌دهد. بر اساس این نتایج با خروج پرکننده‌ها و اجزاء بسیار ریز خمیرکاغذ، افزایش معنی‌داری در شاخص مقاومت به پاره‌شدن مشاهده می‌شود.



شکل ۳- مقایسه میانگین‌های مقاومت به پاره‌شدن کاغذ در تیمارهای مختلف (شماره‌های مش غربال که الیاف روی آن جمع شده است)

شاخص مقاومت به کشش

مقاومت به کشش یکی از شاخص‌های مقاومتی بسیار متداول کاغذ می‌باشد. مقدار شاخص مقاومت به کشش نیز با در اختیار داشتن مقاومت به کشش و بر اساس وزن پایه دقیق نمونه محاسبه می‌شود که به‌میزان زیادی به اتصالات موجود در ورقه کاغذ و طول الیاف بستگی دارد. تحلیل آماری شاخص مقاومت به کشش نشان داد که بین تیمارهای مختلف در سطح اعتماد ۹۹٪ تفاوت معنی‌داری وجود دارد (جدول ۵).

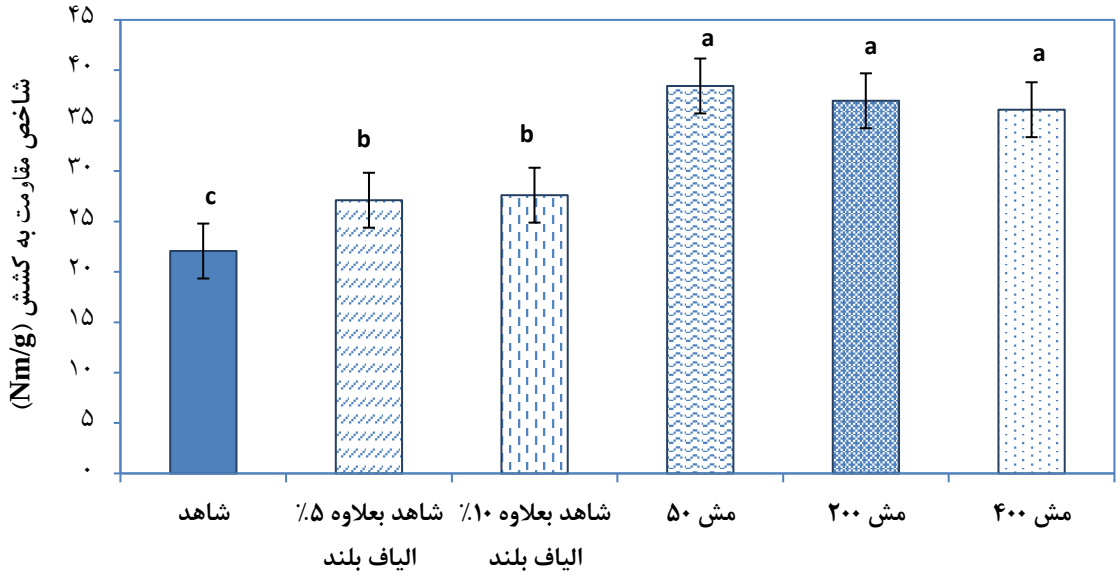
جدول ۵- تجزیه واریانس مقاومت به کشش کاغذ در تیمارهای مختلف

منبع تغییرات	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	F	Sig.
اثر کلاسه‌بندی	۹۲۳/۷۲۸	۵	۱۸۴/۷۴۶	۱۱۵/۳۶۵	۰/۰۰۰
خطای آزمایشی	۲۸/۸۲۵	۱۸	۱/۶۰۱		
کل	۹۵۲/۵۵۳	۲۳			

همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، با خروج پرکننده‌ها و اجزاء بسیار ریز خمیرکاغذ، شاخص مقاومت به کشش کاغذ افزایش معنی‌دار و قابل ملاحظه‌ای را نشان می‌دهد. همچنین افزودن الیاف بلند به تیمار شاهد نیز از نظر آماری باعث افزایش معنی‌دار شاخص مقاومت به کشش شده است.

مقاومت به لهیدگی حلقه‌ای کاغذ

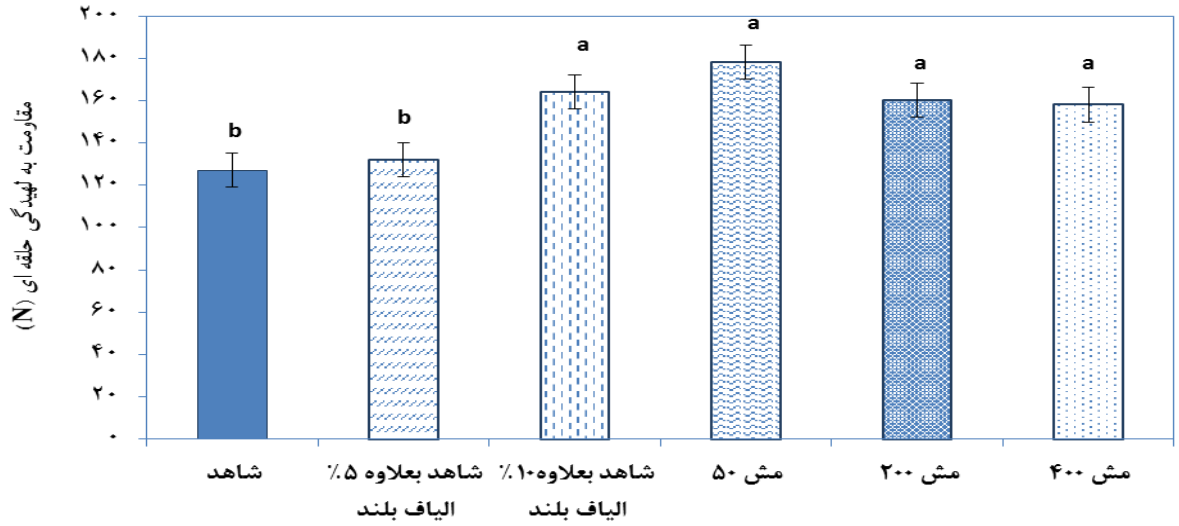
جدول ۶ تجزیه واریانس داده‌های مربوط به مقاومت به لهیدگی حلقه‌ای (RCT) کاغذهای مورد بررسی را نشان می دهد که وجود تفاوت معنی‌دار را بین تیمارها در سطح ۹۹ درصد اطمینان تأیید می‌نماید.



شکل ۴- مقایسه میانگین شاخص مقاومت به کشش کاغذ در تیمارهای مختلف (شماره‌های مش غربال که الیاف روی آن جمع شده است)

جدول ۶- تجزیه واریانس مقاومت به لهیدگی حلقه‌ای کاغذ در تیمارهای مختلف

منبع تغییرات	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	F	Sig.
اثر کلاسه‌بندی	۵۲۵۰/۴۴۴	۵	۱۰۵۰/۰۸۹	۸/۲۷۶	۰/۰۰۱
خطای آزمایشی	۱۵۲۲/۶۶۷	۱۲	۱۲۶/۸۸۹		
کل	۶۷۷۳/۱۱۱	۱۷			



شکل ۵- مقایسه میانگین مقاومت به لهیدگی حلقه‌ای (RCT) کاغذ در تیمارهای مختلف

(شماره‌های مش غربال که الیاف روی آن جمع شده است)

نتایج آزمون گروه‌بندی دانکن نشان می‌دهد که نتایج این ویژگی در کاغذهای ساخته شده از الیاف روی غربال‌های با مش ۵۰، ۲۰۰ و ۴۰۰ و همچنین خمیرکاغذ حاوی ۱۰٪ الیاف بلند همگی در یک گروه قرار گرفته و نتیجه بهتری نسبت به تیمار شاهد حاوی تمام اجزاء خمیرکاغذ و حتی تیمار حاوی ۵ درصد الیاف بلند داشته‌اند (شکل ۵). این نتیجه تأثیرگذاری قابل توجه جداسازی ذرات ریز را بر میزان مقاومت به لهیدگی حلقه‌ای در مقایسه با افزودن ۱۰٪ الیاف بلند نشان داد.

بحث

نتایج پژوهش نشان داد که بخش قابل توجهی از خمیرکاغذ حاصل از بازیافت کارتن‌های کنگره‌ای کهنه مورد بررسی را اجزای بسیار ریز شامل نرمه‌ها و مواد معدنی (پرکننده‌ها) تشکیل می‌دهند؛ بنابراین با توجه به اثر منفی قابل ملاحظه این گونه اجزاء بر ویژگی‌های مقاومتی و فرایندی خمیرکاغذ، پس از کلاسه‌بندی اجزاء خمیرکاغذ، ویژگی‌های خمیرکاغذ حاصل از فرایند جزءجزءسازی و نیز حذف کلاسه‌های ریز الیاف و مواد معدنی (قبل از پالایش) مورد ارزیابی قرار گرفت و این ویژگی‌ها با کاغذهای حاصل از افزایش مقادیر مختلف الیاف بلند مقایسه شد.

حجیمی مقوا یکی از ویژگی‌های فیزیکی است که بر سایر ویژگی‌ها تأثیر قابل ملاحظه‌ای دارد. نتایج این تحقیق نشان داد که با خروج ذرات ریز و نرمه‌ها میزان حجیمی کاغذ افزایش یافته است. همچنین از سوی دیگر با افزودن الیاف بلند به خمیرکاغذ، حجیمی کاغذ افزایش قابل ملاحظه‌ای نشان داد. هرچند میزان افزایش حجیمی در اثر اضافه نمودن الیاف بلند به بافت کاغذ بیشتر بوده است. این نتایج با تحقیقات Kang (۲۰۰۷) و Rasa و همکاران (۲۰۱۲) مطابقت داشت.

با خروج پرکننده‌ها و اجزاء بسیار ریز خمیرکاغذ، افزایش معنی‌دار و قابل ملاحظه‌ای در شاخص مقاومت به کشش در مقایسه با تیمار شاهد مشاهده شد. همچنین افزودن الیاف بلند به تیمار شاهد نیز از نظر آماری باعث افزایش معنی‌دار شاخص مقاومت به کشش گردید. این نتیجه در تحقیقات Tudarvari و همکاران (۲۰۱۶) نیز مشاهده شد که خمیرکاغذ دارای مقادیر بالاتر الیاف بلند، مقاومت به کشش بیشتری داشته و خمیرکاغذهای دارای مقادیر بیشتر نرمه و مقادیر کمتر الیاف بلند، دارای کمترین مقاومت بوده‌اند. تحقیقات Klofta و همکاران (۱۹۹۴)، Kim و همکاران (۲۰۰۰) و Kermanian و همکاران (۲۰۱۳) و Rayatinejad (۲۰۰۹) نیز نشان داد که هرچه میزان نرمه الیاف و مواد پرکننده خمیرکاغذ بیشتر شود، خواص مقاومتی کاغذ کاهش می‌یابد و در مقابل هرچه به میزان الیاف بلند خمیر افزوده شود، پارامترهای مقاومتی بهبود خواهد یافت. البته در پژوهش‌های ذکر شده منظور از نرمه‌ها و ذرات ریز در خمیرکاغذ بازیافتی بوده است که به‌لحاظ پیونددهی، ویژگی‌های متفاوتی نسبت به نرمه حاصل پالایش در خمیرکاغذ شیمیایی دارند.

به‌علاوه، با افزودن خمیر الیاف بلند به خمیر کارتن‌های کنگره‌ای کهنه، افزایش معنی‌دار شاخص مقاومت به پاره‌شدن مشاهده شد. به این معنی که درواقع با افزودن الیاف بلند می توان اثر منفی کوتاه شدن الیاف بازیافتی را بر شاخص مقاومت به پاره‌شدن خنثی کرد و خمیرکاغذ را تقویت نمود. نتیجه این تحقیق با تحقیقات Minor و همکاران (۱۹۹۳)، Tudarvari و همکاران (۲۰۱۶) و Rayatinejad (۲۰۰۹) از لحاظ الیاف بلند مطابقت داشت و نشان داد که خمیرکاغذ دارای مقادیر بالاتر الیاف بلند، مقاومت به کشش، مقاومت به ترکیدن و مقاومت به پاره‌شدن بیشتری داشته و خمیرکاغذهای دارای مقادیر بیشتر نرمه و مقادیر کمتر الیاف بلند، دارای مقاومت کمتری بوده‌اند.

نکته قابل توجه اینکه در اثر خروج مواد معدنی و ذرات بسیار ریز (خروج اجزاء کوچک‌تر از مش ۴۰۰)، شاخص مقاومت به پاره‌شدن به اندازه‌ای افزایش یافت که به‌لحاظ آماری با شاخص مقاومت به پاره‌شدن کاغذ حاصل از افزودن ۱۰٪ الیاف بلند به خمیر شاهد برابری نمود. بر اساس آنچه اشاره شد، فرایند جزءجزءسازی خمیرکاغذ OCC توانسته است با موفقیت علاوه بر افزایش مقاومت به پاره‌شدن نسبت به تیمار شاهد، باعث دستیابی به ویژگی مشابه با خمیرکاغذ دارای الیاف بلند گردد که از دیدگاه فنی و اقتصادی قابل توجه است. Abubakr (۱۹۹۵) گزارش کرد که به‌دلیل کوتاه‌تر شدن

الیاف بازیافتی، انعطاف‌پذیری آنها نسبت به الیاف بکر کمتر می‌شود که درنتیجه این انعطاف‌پذیری کمتر، مقاومت کمتر و اتصال کمتر بین الیاف، کاغذ ضعیف‌تر و نامرغوب‌تری تولید می‌شود.

در مورد مقاومت به پاره شدن، نتایج این مطالعه با پژوهش Talaeipour & Ghorbani (۲۰۱۱) مطابقت داشت که با افزودن جزء الیاف بلند خمیرکاغذ OCC مقاومت کاغذ بهبود یافته و در بسیاری از موارد از خمیرکاغذ شاهد بیشتر می‌گردد. این افزایش مقاومت زمانی که از مقادیر کمتر جزء الیاف کوتاه خمیرکاغذ OCC استفاده می‌شود و یا هنگامی‌که این نوع الیاف مصرف نمی‌شدند شدت بیشتری می‌یابد.

درمجموع نتایج ارزیابی ویژگی‌های کاغذهای فاقد کلاسه های ریز (قبل از پالایش) و مواد معدنی و مقایسه آنها با کاغذهای حاوی مقادیر مختلف الیاف بلند مشخص نمود که به‌لحاظ شاخص‌های مقاومت به کشش و مقاومت به پارگی، کاغذهای فاقد کلاسه‌های ریز الیاف (قبل از پالایش) و مواد معدنی نه‌تنها قابل رقابت با کاغذهای حاوی مقادیر مختلف الیاف بلند بوده‌اند بلکه برتری نسبی نیز از خود نشان دادند. این نتایج نشان می‌دهد که راهکار جزءجزءسازی خمیربازیافتی و خروج پرکننده‌ها و اجزاء ریز (قبل از پالایش الیاف) در مقایسه با راهکار متداول افزودن خمیرکاغذ الیاف بلند، اثر بیشتری بر شاخص‌های مقاومت به کشش و مقاومت به پارگی ورقه تولیدی داشته است.

اما به لحاظ حجیمی کاغذ مشاهده گردید که کاغذهای حاوی مقادیر مختلف الیاف بلند، حجیمی بیشتری نسبت به سایر تیمارها و کلاسه‌بندی‌های مختلف الیاف خمیر کارتن های کنگره‌ای کهنه داشته‌اند. از نظر نفوذپذیری نسبت به هوا نیز تفاوت معنی‌داری بین تیمارهای مختلف مشاهده نشد.

بر اساس آنچه اشاره شد، فرایند جزءجزءسازی خمیرکاغذ OCC توانست با موفقیت علاوه بر افزایش مقاومت به پاره‌شدن نسبت به تیمار شاهد، باعث دستیابی به ویژگی مشابه با خمیرکاغذ دارای الیاف بلند گردد که لازم است از دیدگاه اقتصادی و اجرایی مورد توجه و تأمل قرار گیرد.

منابع مورد استفاده

-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.

-Abubakr, S., 1995. Fiber fractionation as a method of improving properties after repeated recycling, Tappi Journal, 78(5): 123-126.

-Bichard R.C.H.W., 1992. The basic effects of recycling on pulp properties. J Pulp Pap Sci. 18(4): 151-159.

-Jang, H.F. and Seth, R. S., 2004. Determining the mean values for fibre physical properties. Nord. Pulp Pap. Res. J., 19(3): 372-378.

-Kang, T., 2007. Role of external fibrillation in pulp and paper properties. Ph.D. thesis, Department of Forest Products Technology, Helsinki University of Technology, Espoo, Finland.

-Kermanian, H., Razmpour, Z., Ramezani, O., Mahdavi, S., Rahmaninia, M. and Ashtari, H., 2013. The influence of refining history of waste NSSC paper on its recyclability. BioResources, 8(4): 5424-5434.

-Khalili, A., Ghasemian, A., Saraeian A.R., Dahmardeh galehnow, M. and Manzorolajdad, S.M., 2009. Study on the mechanical and optical properties of kraft liner paper produced from mixing of OCC and virgin hardwoods kraft pulp. Iranian Journal of Wood and Paper Science Research, 24(2): 264-274.

-Kim, H.J., Oh, J.S. and Jo, B.M., 2000. Hornification behavior of cellulosic fibers by recycling. Journal of Applied Chemistry, 4(1): 363-366.

-Klofta, J.L. and Miler, M., 1994. Effect of deinking on the recycling potential of papermaking fiber. Pulp and Paper Canada, 95(8): 41-49.

-Latibari, A.G., Khosravani, A. and Rahmaninia, M., 2007. Technology of Paper Recycling. Arvich Press, 540p. (Translated in Persian)

-Minor, J.L., Scott, C.T. and Atalla, R.H., 1993. Restoring bonding strength to recycled fibers. Proceedings of Recycling symposium. 1-4 March, New Orleans: 379-385.

-Pati, R.K., Vrat P. and Kumar P., 2006. Economic Analysis of Paper Recycling Vis-a-Vis Wood as Raw Material, International Journal of Production Economics, 103(2): 489-508.

-Rahmaninia, M. and Khosravani, A., 2015. Improving the paper recycling process of old corrugated container wastes. Cellulose Chemistry and Technology, 49(2): 203-208.

-Rayatinejad A., 2009. Effect of Old Corrugated Continers (OCC) Pulp Fractionation on Physical and Mechanical Properties of Paper, MSc dissertation.

Department of Wood and Paper Science and Technology, Tarbiat Modares University, Noor, Iran.
-Rasa M, Resalati H. and Afra E., 2012. Comparative Investigation on Different Methods for Improving Strength Properties of OCC Pulp. Journal of Wood and Forest Science and Technology, 19 (3): 41-57.
-TAPPI T 261cm-00, 2007. Fines Fraction by Weight of Paper Stock by Wet Screening. TAPPI Press, Atlanta.
-Tudarvari, Z., Farsi, M. and Asadpur Atoei, Gh., 2016. Effect of fiber length variations of different OCC pulp recycled papers on strength properties of fluting paper. Journal of Wood and Forest Science and Technology, 23(4): 255-268.
-Talaeipour, M. and Ghorbani Kordkheili, R., 2011. Fractionation of the OCC Pulp and the Effect of Mixing the Fractionated OCC Pulps with Kraft Pulp on the Physical and Mechanical Properties of Paper. Journal of Renewable Natural Resources Research, 2(2): 72-85.
-Wathén, R., Rosti, J., Alava, M., Salminen, L. and Joutsimo, O., 2006. Fiber strength and zero-span strength statistics–some considerations. Nordic Pulp and Paper Research Journal, 21(2):193-201.

The effect of fractionation and fine material removal from old corrugated container pulp on the properties of the produced paperboard in comparison to long fiber application

S.S. Shamsi[1], A. Khosravani[2]* and M. Rahmaninia[3]

1- MSc, Wood and Paper Science and Technology Department, Natural Resources Faculty, Tarbiat Modares University, Noor, Mazandaran, Iran.

2*-Corresponding Author, Associate Professor, Wood and Paper Science and Technology Department, Natural Resources Faculty, Tarbiat Modares University, Noor, Mazandaran, Iran, E-mail: khosravani@modares.ac.ir

3-Associate Professor, Wood and Paper Science and Technology Department, Natural Resources Faculty, Tarbiat Modares University, Noor, Mazandaran, Iran.

Received: May, 2021 Accepted: July, 2021

Abstract

One of the most common types of paper and paperboard production in Iran, is the production of various grades of liner, test liner and corrugated medium from recycled old corrugated containers (OCC) pulp. With the increase in population, rise of consumption rate and start of new paper production mills, the shortage of virgin fiber materials in the paper industry is becoming more noticeable. On the other hand, the shortage of wood in the country has been introduced as a driving force for paper recycling industry. Meanwhile, due to the sharp currency fluctuations and the rise in the of imported long fiber price, consumption of virgin fibers as well as imported long fibers has been limited. Therefore, unfortunately, for many reasons, the quality of such paperboards in the most of domestic production mills are not competitive with similar imported products. Therefore, the potential of achieving desirable properties through fiber classification of OCC by Bauer McNett apparatus and removing fine fiber fractions through fractionation (prior to refining) was considered. The results showed that tensile and tear indices increased significantly with the removal of tiny materials such as fines and fillers. This increase was such that the paperboards without fines and fillers not only compensated for the lack of long fibers but also resulted comparable strength properties.

Keywords: Pulp fractionation, fiber classification, fiber fines, old corrugated containers, paper recycling.