Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

Journal of Wood and Forest Science and Technology

Print ISSN: 2322-2077
Online ISSN: 2322-2786

(OPEN ACCESS)

Comparison of the effect of mixing unbleached Kraft pulp from date palm rachis and empty fruit bunch to improve the quality of recycled old corrugated containers (OCC) pulp

Rahman Abbasi[1], Sedighe Hossein Khani[2], Sahab Hedjazi[*3]

1. Ph.D. Student in Paper Science and Engineering, Faculty of Wood and Paper Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: rahman.abbasi_s01@gau.ac.ir
2. M.Sc. in Paper Science and Engineering, Faculty of Wood and Paper Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: hoseinkhanis@gmail.com
3. Corresponding Author, Associate Prof., Dept. of Paper Science and Engineering, Faculty of Wood and Paper Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: shedjazi@gau.ac.ir

Article Info

Article type:
Full Length Research Paper

Article history:
Received: 09.18.2025
Revised: 12.26.2025
Accepted: 01.14.2026

Keywords:
Date palm waste,
Kraft pulp,
Old corrugated containers,
Paper recycling

ABSTRACT

Background and Objectives: Increasing the use of recycled paper in the production of linerboard and corrugated paper is a key strategy in the papermaking industry, motivated by both economic and environmental concerns. However, recycled fibers gradually lose strength after multiple processing cycles. To compensate for this loss, several studies have examined the incorporation of virgin fibers into recycled fiber furnishes to improve paper strength and quality. Due to restrictions on the use of virgin forest-based fibers and the enforcement of environmental policies, the pulp and paper industry has increasingly focused on non-wood plant fibers and agricultural lignocellulosic residues as sustainable and cost-effective alternatives. This study investigates the effects of adding different proportions of virgin fibers derived from two types of date palm lignocellulosic wastes, rachis (R) and empty fruit bunch (E), to pulp produced from recycled old corrugated containers (OCC). The study evaluates and compares how these additions influence paper properties, highlighting the potential usability of these agricultural residues.

Materials and Methods: Date palm lignocellulosic wastes (R) and (E) were collected from plantations located in Dashtestan, Bushehr Province, Iran. The wastes were air-dried, crushed, and separately pulped using the kraft process under an effective alkali charge of 20%, sulfidity of 25%, and a cooking temperature of 165 °C. The cooking durations were set at 120 min for rachis and 20 min for empty fruit bunch. The resulting unbleached kraft pulps were characterized by determining kappa number, yield, and freeness. OCC pulp was obtained from Golestan Persia Paper Mill (Gorgan, Iran). Each type of virgin pulp derived from date palm wastes (R) and (E) was separately blended with the OCC pulp at substitution levels of 10%, 20%, 30%, 40%, and 50%. Standard laboratory handsheets with a grammage of 120 g/m² were prepared from these mixed pulps in accordance with TAPPI standard procedures. The physical, mechanical, optical, and barrier properties of the produced papers were evaluated

according to TAPPI standard methods using the available instruments in the Pulp and Paper Laboratory of Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources.

Results: Blending unbleached kraft pulp derived from lignocellulosic waste materials from date palms, specifically the rachis (R) and empty fruit bunch (E), with recycled OCC pulp significantly enhanced the physical and mechanical properties of the resulting papers. Increasing the proportion of virgin pulp in the mixture improved the tensile strength, burst strength, ring crush test (RCT), and folding strength indices. Overall, papers made with virgin pulp from empty fruit bunches demonstrated better performance than those made with pulp from rachis. Additionally, an increase in density and a decrease in air resistance were observed in samples containing virgin pulp, indicating a denser and more coherent paper structure. However, treatments that included virgin pulp exhibited reduced brightness due to the residual lignin present in the virgin pulps. Furthermore, the tear index showed less sensitivity to changes in pulp composition compared to other properties, likely due to the direct influence of fiber length and the uniformity of refining in the treatments.

Conclusion: Despite its environmental and economic advantages, the paper recycling process presents challenges such as diminished fiber quality and lower durability of the final product. In many regions, abundant lignocellulosic waste from date palmsparticularly (R) and (E) is often disposed of or incinerated without full utilization, leading to notable environmental repercussions. The findings of this study indicate that incorporating unbleached kraft pulp derived from these lignocellulosic wastes, especially (E), into the recycled pulp composition significantly enhances the physical and mechanical properties of recycled paper.

Cite this article: Abbasi, Rahman, Hossein Khani, Sedighe, Hedjazi, Sahab. 2026. Comparison of the effect of mixing unbleached Kraft pulp from date palm rachis and empty fruit bunch to improve the quality of recycled old corrugated containers (OCC) pulp. *Journal of Wood and Forest Science and Technology*, 32 (4), 87-107.

© The Author(s).
DOI: 10.22069/jwfst.2026.24083.2128
Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

نشریه پژوهش‌های علوم و فناوری چوب و جنگل

شاپا چاپی: ۲۳۲۲-۲۰۷۷
شاپا آنلاین: ۲۳۲۲-۲۷۸٦

مقایسه اثر اختلاط خمیرکاغذ کرافت رنگ‌بری‌نشده ساقه برگ و خوشه بدون میوه نخل خرما در ارتقاء کیفیت خمیرکاغذ بازیافتی کارتن کنگره‌ای کهنه (OCC)

رحمان عباسی[۱]، صدیقه حسین‌خانی[۲]، سحاب حجازی*[۳]

۱. دانشجوی دکتری علوم و مهندسی کاغذ، دانشکده مهندسی چوب و کاغذ، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: rahman.abbasi_s01@gau.ac.ir

۲. کارشناس‌ارشد علوم و مهندسی کاغذ، دانشکده مهندسی چوب و کاغذ، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: hoseinkhanis@gmail.com

۳. نویسنده مسئول، دانشیار گروه علوم و مهندسی کاغذ، دانشکده مهندسی چوب و کاغذ، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: shedjazi@gau.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مقاله کامل علمی- پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱٤۰٤/۰٦/۲۷
تاریخ ویرایش: ۱٤۰٤/۱۰/۰۵
تاریخ پذیرش: ۱٤۰٤/۱۰/۲٤

واژه‌های کلیدی:
بازیافت کاغذ،
خمیرکاغذ کرافت،
ضایعات نخل خرما،
کارتن کنگره‌ای کهنه

چکیده

سابقه و هدف: افزایش استفاده از کاغذهای بازیافتی در تولید انواع کاغذ لاینر و کنگره‌ای، به دلایل اقتصادی و محیط زیستی، از رویکردهای مهم در صنایع کاغذسازی محسوب می‌شود. الیاف بازیافتی به‌مرور زمان و به‌دلیل استفاده‌های مکرر، مقاومت اولیه خود را از دست می‌دهند. در این راستا در برخی پژوهش‌ها، پژوهش‌گران با افزودن درصدی از الیاف بکر به مخلوط الیاف بازیافتی، مقاومت و کیفیت کاغذ تولیدی را مورد بررسی قرار داده‌اند. محدودیت استفاده از الیاف بکر چوب‌های جنگلی و اتخاذ سیاست‌های محیط زیستی موجب شده تا صنایع خمیر و کاغذ به دنبال استفاده از الیاف گیاهان غیرچوبی و ضایعات لیگنوسلولزی کشاورزی به‌عنوان منابع پایدار و ارزان‌قیمت باشند. در این پژوهش با افزودن درصدهای مختلف الیاف بکر تهیه‌شده از دو نوع ضایعات لیگنوسلولزی نخل خرما شامل ساقه برگ و خوشه بدون میوه نخل خرما به‌صورت مجزا به خمیرکاغذ حاصل از بازیافت کارتن کنگره‌ای کهنه (OCC)، اثرات افزودن آن‌ها و امکان ارتقاء کیفیت کاغذ تولیدی و درنهایت قابلیت استفاده از این دو نوع پسماند مورد بررسی، ارزیابی و مقایسه قرار گرفته است.

مواد و روش‌ها: ضایعات لیگنوسلولزی نخل خرما (شامل ساقه برگ و خوشه بدون میوه) از مزارع نخل خرما، واقع در شهرستان دشتستان استان بوشهر، جمع‌آوری و پس از خرد کردن، خمیرکاغذ رنگ‌بری‌نشده آن‌ها به‌صورت مجزا با روش کرافت با قلیایت مؤثر ۲۰ درصد و سولفیدیته ۲۵ درصد و دمای پخت ۱٦۵ درجه سانتی‌گراد تهیه گردید. زمان پخت برای ساقه برگ ۱۲۰ دقیقه و برای خوشه بدون میوه ۲۰ دقیقه در نظر گرفته شد. عدد کاپا، درصد بازده و

درجه روانی خمیرکاغذ بکر اندازه‌گیری شدند. خمیرکاغذ OCC از کارخانه کاغذ گلستان پرشیا تهیه گردید. سپس دو نوع خمیرکاغذ بکر به‌صورت مجزا با نسبت‌های مختلف ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ درصد با خمیرکاغذ OCC ترکیب و کاغذهای استاندارد دست‌ساز با گراماژ ۱۲۰ گرم بر مترمربع از این اختلاط‌ها تهیه گردید. ویژگی‌های فیزیکی، مکانیکی، نوری و ممانعتی این کاغذها با دستگاه‌های موجود در آزمایشگاه خمیر و کاغذ دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان بر اساس استاندارد TAPPI اندازه‌گیری شدند.

یافته‌ها: اختلاط خمیرکاغذ بکر کرافت رنگ‌بری‌نشده حاصل از ضایعات لیگنوسلولزی نخل خرما شامل ساقه برگ (R) و خوشه بدون میوه (E) با خمیرکاغذ بازیافتی OCC به‌طور معنی‌داری موجب بهبود ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی کاغذ می‌گردد. افزایش درصد خمیرکاغذ بکر در ترکیب کاغذ، باعث ارتقاء شاخص مقاومت به کشش، ترکیدن، لهیدگی حلقوی و تاخوردگی کاغذهای حاصل شد. در مجموع کاغذهای حاوی خمیرکاغذ بکر E عملکرد بهتری نسبت به خمیرکاغذ بکر R نشان دادند. افزایش دانسیته و کاهش نفوذپذیری به هوا نیز در نمونه‌های حاوی خمیرکاغذ بکر مشاهده شد که بیانگر تراکم بیش‌تر و ساختار منسجم‌تر کاغذ است. در مقابل، کاهش درجه روشنی در تیمارهای دارای خمیرکاغذ بکر به‌دلیل لیگنین باقی‌مانده در خمیرکاغذهای بکر، مشاهده شد. هم‌چنین شاخص مقاومت به پارگی در مقایسه با سایر ویژگی‌ها حساسیت کمتری به ترکیب خمیرکاغذ نشان داد که احتمالاً ناشی از تأثیر مستقیم طول مؤثر الیاف و پالایش یکنواخت در تیمارها است.

نتیجه‌گیری: فرآیند بازیافت کاغذ، با وجود مزایای محیط زیستی و اقتصادی، با چالش‌هایی مانند افت کیفیت الیاف و کاهش دوام محصول نهایی همراه است. در همین حال، ضایعات لیگنوسلولزی فراوان نخل خرما از جمله ساقه برگ (R) و خوشه بدون میوه (E)، در بسیاری از مناطق کشور بدون استفاده بهینه دفع یا سوزانده می‌شوند و پیامدهای محیط زیستی قابل‌توجهی به دنبال دارند. نتایج این پژوهش نشان داد که استفاده از خمیرکاغذ کرافت رنگ‌بری‌نشده حاصل از این ضایعات لیگنوسلولزی، به‌ویژه خوشه بدون میوه، به‌عنوان بخشی از ترکیب خمیرکاغذ بازیافتی، موجب بهبود قابل‌توجه خواص فیزیکی و مکانیکی کاغذ بازیافتی می‌شود.

استناد: عباسی، رحمان، حسین‌خانی، صدیقه، حجازی، سحاب (۱۴۰۴). مقایسه اثر اختلاط خمیرکاغذ کرافت رنگ‌بری‌نشده ساقه برگ و خوشه بدون میوه نخل خرما در ارتقاء کیفیت خمیرکاغذ بازیافتی کارتن کنگره‌ای کهنه (OCC). *نشریه پژوهش‌های علوم و فناوری چوب و جنگل*، ۳۲ (۴)، ۱۰۷-۸۷.

DOI: 10.22069/jwfst.2026.24083.2128

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

© نویسندگان.

مقدمه

با افزایش تقاضا برای کاغذ در صنایع چاپ و بسته‌بندی و کمبود منابع چوبی، صنایع کاغذسازی به استفاده از کاغذهای باطله به‌عنوان منبع اصلی مواد اولیه روی آورده‌اند. کارتن‌های کنگره‌ای کهنه (OCC) از مهم‌ترین منابع کاغذهای بسته‌بندی باطله محسوب می‌شوند و بیش از نیمی از مواد اولیه صنایع بازیافت کاغذ و مقوا در جهان را تأمین می‌کنند. این کاغذها برای تولید لایه میانی کنگره‌ای، تست لاینر و کاغذهای بسته‌بندی به کار می‌روند (۱). این ماده عمدتاً برای تولید کاغذهای بسته‌بندی استفاده می‌شود و در تأمین نیازهای این صنعت نقش کلیدی دارد. به دلایل مختلف، کیفیت محصولات بازیافتی در بیش‌تر واحدهای داخلی نمی‌تواند با محصولات مشابه وارداتی رقابت کند، زیرا در فرآیند بازیافت به علت کمبود ماده اولیه در دفعات بیش‌ازحد استاندارد بازیابی رخ می‌دهد و بنابراین الیاف به‌طور برگشت‌ناپذیری دچار آسیب شده و این آسیب بر ویژگی‌های مقاومتی کاغذ تولیدی تأثیر می‌گذارد. خمیرکاغذ بازیافتی دارای مقاومت مکانیکی کم‌تری بوده و جذب آب بیش‌تری را نسبت به خمیرکاغذ حاصل از الیاف بکر دارد که این امر باعث کاهش کیفیت کاغذ و کاهش سرعت تولید کاغذ به دلیل کاهش حرکت‌پذیری ماشین کاغذ می‌شود. با افزایش روزافزون استفاده از الیاف بازیافتی انتظار می‌رود که بسته‌بندی‌های حاصل از آن‌ها مقاومت بیش‌تری داشته باشند و در نتیجه بهبود مقاومت این نوع کاغذها برای موفقیت در بازار رقابت ضروری است (۲، ۳، ٤). خمیرکاغذ OCC به دلیل استفاده مکرر، نسبت به خمیرکاغذ الیاف بکر دارای ویژگی‌های نامطلوبی هستند. این ویژگی‌ها شامل توزیع نایکنواخت طولی الیاف، کاهش میانگین طول الیاف، استخوانی شدن، هم‌کشیدگی و بسته شدن منافذ دیواره سلولی، سخت شدن پلی‌ساکاریدها، نازک‌تر شدن دیواره سلولی، کاهش قابلیت پیوندپذیری، کهنگی و کاهش انعطاف‌پذیری الیاف است. هم‌چنین، وجود الیاف متنوع و آسیب‌دیده و حضور مواد شیمیایی مختلفی مانند نشاسته کاتیونی، ذرات جوهر، چسب‌ها، موم‌ها و ناخالصی‌های غیرسلولزی باعث کاهش مقاومت و نایکنواختی در کیفیت کاغذ تولید شده می‌شود (۵). بهینه‌سازی الیاف بازیافتی از طریق تیمارهای فیزیکی، مکانیکی و شیمیایی و هم‌چنین افزودن الیاف بکر، از جمله راهکارهای موجود برای تولید کاغذهای بازیافتی با ویژگی‌های مطلوب و ارتقای کیفیت کاغذهای بسته‌بندی محسوب می‌شوند (٦، ۷). محدودیت سطح جنگل‌های تجاری نسبت به مساحت گسترده کشور ما و تخریب شدید این جنگل‌ها به‌واسطه برداشت بی‌رویه و غیراصولی، استفاده از منابع لیگنوسلولزی غیرچوبی و بازیافت کاغذ در صنایع کاغذسازی را ضروری کرده است (۸). در سال‌های اخیر، تمایل به استفاده از مواد آلی و پسماندهای کشاورزی قابل‌دسترس محلی، مانند نارگیل، کنف، نخل، سیسال و غیر و... به‌عنوان منبع الیاف در کشورهای توسعه‌یافته و درحال‌توسعه افزایش یافته است (۹). ضایعات لیگنوسلولزی نخل خرما یکی از چالش‌های مهم در صنایع کشاورزی به‌ویژه در ایران محسوب می‌شوند. سالانه حجم زیادی از این ضایعات لیگنوسلولزی (مانند ساقه برگ و خوشه بدون میوه و...) به‌صورت مواد فیبری از هرس نخلستان‌ها تولید می‌گردد. اگر این ضایعات به‌درستی مدیریت نشوند، ممکن است سوزانده یا در طبیعت رها شوند که این امر مشکلات محیط زیستی ایجاد می‌کند. برای ایجاد ارزش افزوده و بهره‌برداری بهینه از ضایعات لیگنوسلولزی نخل خرما، می‌توان از آن‌ها در صنایع غذایی، تولید محصولات چوبی و کاغذی و تولید مواد بستری کشاورزی استفاده کرد (۱۰).

وانروسلی و همکاران (۲۰۰۵) از خمیرکاغذ تولید شده با فرآیند سودا حاصل از الیاف خوشه بدون میوه نخل روغن، برای ارتقاء ویژگی‌های خمیرکاغذ بازیافتی استفاده کردند. نتایج این تحقیق نشان داد که افزودن تنها ۲۰ درصد خمیرکاغذ بکر بدون پالایش یا ۱۰ درصد خمیرکاغذ بکر پالایش‌شده، موجب بازیابی کامل مقاومت کاغذ بازیافتی می‌شود (۱۱). شال و همکاران (۲۰۰۹) با اختلاط خمیرکاغذ کاه گندم (تولید شده با روش سودا-آنتراکینون) با خمیرکاغذ OCC در نسبت‌های مختلف، بهبود قابل‌توجهی در تمامی ویژگی‌های کاغذ، به‌جز شاخص پارگی، نسبت به خمیرکاغذ شامل ۱۰۰ درصد OCC مشاهده کردند (۱۲). شیخی و همکاران (۲۰۱۳) به بررسی تأثیر اختلاط خمیرکاغذ سودای تهیه‌شده از باگاس با خمیر کاغذ بازیافتی (OCC) بر ویژگی‌های کاغذ فلوتینگ پرداختند. نتایج نشان داد که استفاده از ۱۰۰ درصد خمیرکاغذ OCC منجر به تولید کاغذ با خواص مکانیکی ضعیف می‌شود. هم‌چنین مشخص شد که به‌کارگیری درصدهای بیش‌تر خمیرکاغذ باگاس در ترکیب با OCC، به‌ویژه در سطوح ۷۰ درصد و بیش‌تر، موجب بهبود قابل‌توجه بیش‌تر ویژگی‌های مقاومتی کاغذ به‌جز شاخص پارگی می‌گردد. بررسی‌های میکروسکوپی (SEM) نیز بیانگر آن بود که الیاف نرم و انعطاف‌پذیر باگاس قابلیت زیادی برای ترکیب با الیاف بازیافتی و تولید کاغذ فلوتینگ دارند (۱۳). نصار و همکاران (۲۰۱۵) بهینه‌سازی مخلوط خمیرکاغذ کاه برنج و خمیرکاغذ روزنامه کهنه را بررسی کردند. نتایج آنان نشان داد که ترکیب ۳۳/۳ و ۵۰ درصد خمیرکاغذ کاه برنج با خمیرکاغذ روزنامه کهنه موجب بهبود ویژگی‌های مقاومت به ترکیدن، طول پارگی نسبت به خمیرکاغذ روزنامه کهنه خالص شده است (١٤). محمدحسن و همکاران (۲۰۱۸) تأثیر خمیرکاغذ بکر بامبو را بر بهبود ویژگی‌های کاغذ بازیافتی برای تولید کاغذ کنگره‌ای بررسی کردند. شرایط بهینه خمیرکاغذسازی (۱۵ درصد قلیاییت، ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد، ۸۰۰۰ دور پالایش) خواص خوبی را در کاغذ نشان داد. افزودن خمیرکاغذ بامبو به خمیرکاغذ بازیافتی باعث بهبود ویژگی‌های آن شد. نتایج نشان داد که خمیرکاغذ بکر بامبو به‌طور مثبت بر خواص مقاومتی کاغذ بازیافتی تأثیر می‌گذارد (۱۵). فیلیپووا و همکاران (۲۰۲۳) تأثیر استفاده از الیاف کرافت چوب، الیاف سودا کنف و نانوالیاف‌های سلولزی اکسیدشده با آمونیوم پرسولفات بر خواص مکانیکی و نفوذپذیری هوای الیاف بازیافتی را بررسی کردند. نتایج این پژوهش نشان داد که الیاف کنف در بهبود محصولات الیاف بازیافتی نسبت به الیاف چوب برتری دارند. نتایج پس از افزودن ۱۰ درصد الیاف مخلوط (الیاف کرافت چوب و الیاف سودا کنف) بهتر از نتایج افزودن ۵۰ درصد الیاف کرافت چوب بود. تأثیر نانوالیاف‌های سلولزی اکسیدشده به ترکیب و خواص الیاف بستگی دارد (٦). جعفری گندمانی و همکاران (٢٠٢٤) اثر اختلاط خمیرکاغذ سودای باگاس نیشکر با خمیرکاغذ OCC را بر بهبود خواص مقاومتی کاغذ بررسی کردند. خمیرکاغذ باگاس از پسماند کارخانه پارس تهیه و با شرایط پخت سودا (۲۰ درصد قلیاییت، ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد، ٤٥ دقیقه، نسبت L/W برابر ۱۰/۱) تولید شد. نتایج نشان داد اختلاط باگاس در سطوح ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد موجب بهبود معنی‌دار شاخص‌های کشش، خمشی و لهیدگی نسبت به خمیرکاغذ OCC خالص شد. بااین‌حال، شاخص پارگی تنها افزایش جزئی داشت (١٦).

در کشور ما سالانه مقدار زیادی پسماند نخل خرما تولید می‌شود که بدون استفاده بهینه سوزانده و دفع می‌شوند، استفاده از این پسماند کشاورزی ارزان و در دسترس، در ساخت محصولات سلولزی، می‌تواند باعث ایجاد ارزش افزوده برای نخل و کاهش

استفاده از چوب‌های جنگلی و نیز مزایای اقتصادی فراوان گردد. هدف از انجام این پژوهش بررسی، مقایسه و میزان ارتقاء کیفیت خمیرکاغذ OCC با افزودن خمیرکاغذ کرافت رنگ‌بری نشده تولید شده از دو نوع ضایعات لیگنوسلولزی نخل خرما شامل ساقه برگ و خوشه بدون میوه است.

مواد و روش‌ها

مواد: خمیرکاغذ OCC حاصل از کارتن‌های مصرف‌شده و کهنه (بدون ماده افزودنی)، از کارخانه کاغذ گلستان پرشیا به‌صورت تصادفی از مرحله قبل از ماشین کاغذ و هدباکس تهیه گردید. پس از شست‌وشو و خشک‌کردن ضایعات لیگنوسلولزی نخل خرما، این ضایعات با اره نواری و چکش و مغار به خرده چوب مناسب خمیرکاغذسازی تبدیل گردید. سپس پخت کرافت هر دو نمونه در شرایط یکسان قلیاییت فعال ۲۰ درصد، سولفیدیته ۲۵ درصد و دمای ۱۶۵ درجه سانتی‌گراد و در زمان‌های متغیر مطابق با جدول ۱ انجام گرفت. پس از شست‌وشو و آماده‌سازی خمیرکاغذ، برای انجام آزمایش‌های بعدی، خمیرکاغذ حاصل ضمن آب‌گیری با درصد خشکی ۱۰ درصد در یخچال نگهداری شد.

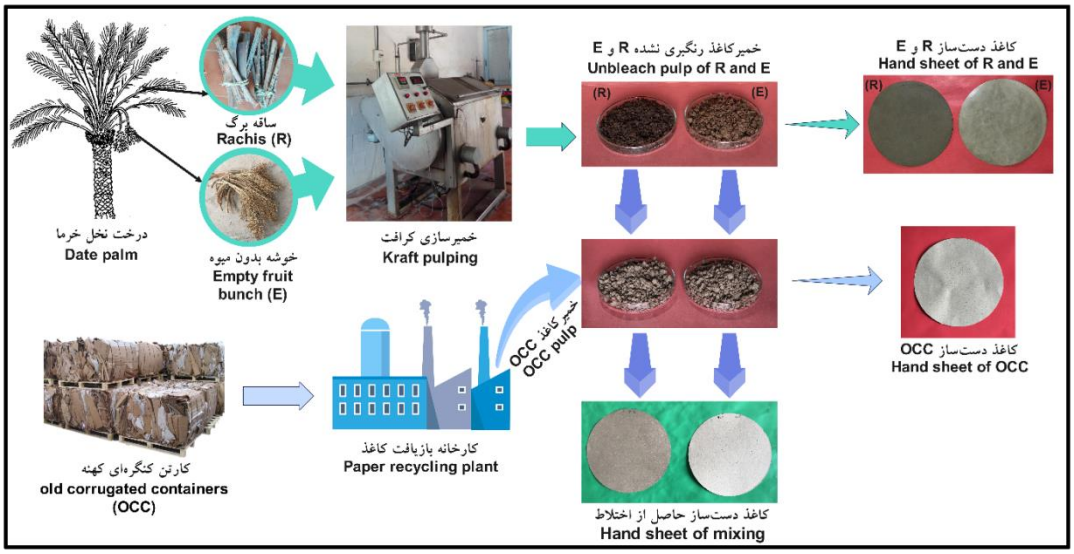
جدول ۱- شرایط خمیرکاغذسازی کرافت برای تهیه خمیرکاغذ رنگ‌بری‌نشده از ضایعات لیگنوسلولزی نخل خرما.

Table 1. Kraft pulping of date palm lignocellulosic wastes for preparing unbleached pulp.

نمونه Sample	پخت cooking	قلیاییت مؤثر (٪) (EA)	سولفیدیته (٪) Sulfidity	L/w	دما (°C) Temp	زمان (دقیقه) Time	بازده (٪) Yeild	کاپا Kapa
ساقه برگ Rachls	کرافت Kraft	20	25	4/1	165	120	37.27	24.8
خوشه Bunch	کرافت Kraft	20	25	4/1	165	20	40.81	23.66

مواد و روش‌ها

آماده‌سازی و اختلاط خمیرکاغذ: پالایش خمیرکاغذ در آزمایشگاه خمیر و کاغذ دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان به‌وسیله دستگاه پالایشگر آزمایشگاهی (PFI MILL) مطابق با استاندارد TAPPI T٢٤٨om-٠٠ انجام پذیرفت. پالایش یک گام اساسی در توسعه الیاف خمیرکاغذ به سطح کیفیت مطلوب موردنظر در فرایند تولید کاغذ است. درجه روانی خمیرکاغذ مطابق با استاندارد TAPPI T٢٢٧om-٠٤ اندازه‌گیری شد. با توجه به درجه روانی اولیه خمیرکاغذ (٦٩٠ و ٦١٠ میلی‌لیتر CSF به ترتیب برای R و E)، میزان و شدت پالایش خمیرکاغذهای بکر تهیه‌شده به‌گونه‌ای تنظیم شد که درجه روانی آن‌ها با درجه روانی خمیرکاغذ OCC یکسان و حدود ٤٠٠ میلی‌لیتر CSF باشد. شکل ۱ مراحل تولید کاغذهای دست‌ساز از خوشه بدون میوه، ساقه برگ نخل خرما و OCC به‌عنوان نمونه‌های شاهد و همچنین تولید کاغذهای دست‌ساز از اختلاط خمیرکاغذها را نشان می‌دهد.



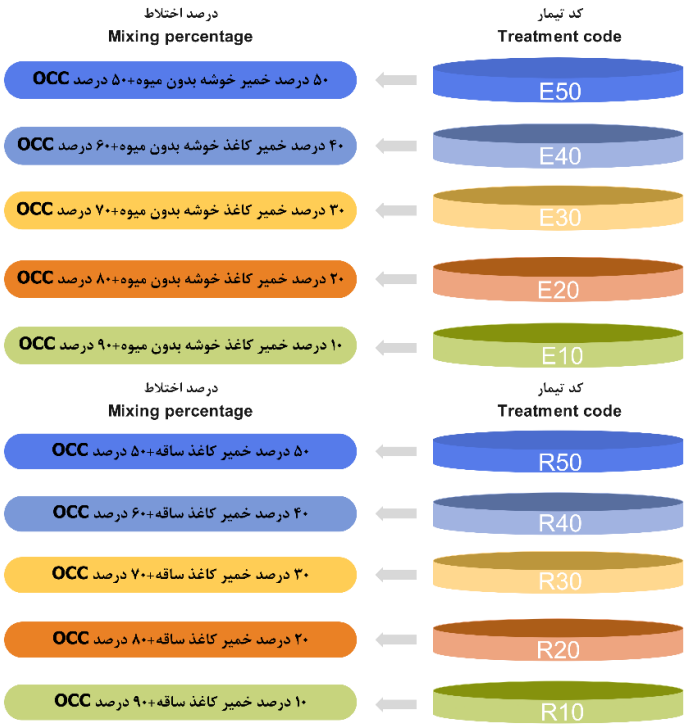
شکل ۱- مراحل تولید کاغذ دست‌ساز از اختلاط خمیرکاغذ OCC با خمیرکاغذ کرافت حاصل از دو نوع ضایعات لیگنوسلولزی نخل خرما.

Figure 1. Steps for producing paper handsheets from the combination of recycled OCC pulp and kraft pulp derived from two types of date palm lignocellulosic wastes.

ساخت کاغذهای دست‌ساز: کاغذهای دست‌ساز مطابق با استاندارد TAPPI T٢٢٠SP-٠١ با گراماژ ۱۲۰ گرم بر مترمربع تهیه گردید. کاغذهای شاهد از ۱۰۰ درصد خمیرکاغذ OCC و ۱۰۰ درصد خمیرکاغذ بکر (ساقه و خوشه بدون میوه) تهیه شد. سایر کاغذها مطابق با شکل ۲ در نسبت‌های اختلاط ۱۰، ۲۰، ۳۰، ٤٠ و ٥٠ درصد از خمیرکاغذ بکر (ساقه یا خوشه بدون میوه) با خمیرکاغذ OCC تهیه گردید.

اندازه‌گیری ویژگی‌های فیزیکی، مکانیکی، ممانعتی و نوری: قبل از انجام آزمون‌ها، کاغذهای تهیه‌شده به‌مدت ٢٤ ساعت در شرایط استاندارد (رطوبت نسبی ٢٤ و دمای ٢٥ درجه سانتی‌گراد) نگهداری شدند. ویژگی‌های فیزیکی شامل گراماژ (TAPPI ٤١٠om-٠٢)، ضخامت (TAPPI T٤١١om-٠٧) و دانسیته (TAPPI T٤٢٦om-٧٠)، ویژگی‌های مکانیکی شامل مقاومت به پارگی (TAPPI T٤١٤om-٠٤)، مقاومت به ترکیدن (TAPPI T٤٠٣om-٠٢)، مقاومت به کشش (TAPPI T٤٠٤om-٠١)، مقاومت به لهیدگی حلقوی (TAPPI T٨١٨om-٨٧) و مقاومت به تاخوردگی (TAPPI T٥١١om-٩٦)، ویژگی ممانعتی شامل نفوذپذیری به هوا (TAPPI T٤٦٠om-٠٢) و ویژگی نوری شامل درجه روشنی (TAPPI T٤٥٢om-٠٨) بر اساس استاندارد آئین‌نامه تاپی اندازه‌گیری شدند.

روش‌های تجزیه‌وتحلیل آماری: نتایج آزمون‌های فیزیکی، مکانیکی، ممانعتی و نوری با استفاده از نرم‌افزار SPSS و آزمون‌های آماری شامل آنالیز واریانس، مقایسه میانگین‌ها و آزمون دانکن در سطح اطمینان ۹۵ درصد ارزیابی گردید. مدیریت داده‌ها و ترسیم نمودارها با بهره‌گیری از نرم‌افزارهای Microsoft Excel و Origin انجام شد. تمامی آزمایش‌ها و اندازه‌گیری ویژگی‌ها با سه تکرار صورت پذیرفت.



شکل ۲- کدبندی تیمارها با درصد اختلاط متفاوت خمیرکاغذهای بکر و OCC برای تهیه کاغذ دست‌ساز.

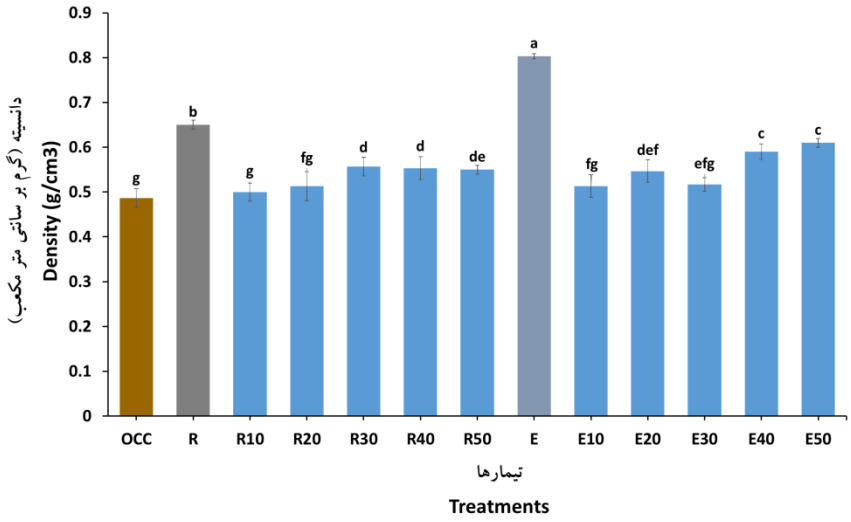
Figure 2. Coding of treatments with different mixing percentages of virgin pulp and OCC pulp for the preparation of handsheets paper.

نتایج و بحث

دانسیته: یکی از ویژگی‌های فیزیکی پایه‌ای کاغذ دانسیته ظاهری می‌باشد این ویژگی روی سایر ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی تأثیر می‌گذارد. کاهش ضخامت به‌طور مستقیم باعث افزایش دانسیته کاغذ می‌شود. به‌طورکلی در اثر پالایش ضخامت کاغذ در گراماژ ثابت کاهش و دانسیته کاغذ افزایش می‌یابد (۱۷). مقایسه میانگین مقدار دانسیته کاغذها، در نمودار شکل ۳ قابل‌مشاهده می‌باشند. نتایج نشان می‌دهد که تیمارهای مختلف تأثیر قابل‌توجهی بر دانسیته نهایی کاغذ دارند. حداکثر مقدار دانسیته در بین کاغذهای شاهد مربوط به E و در بین کاغذهای تولید شده از اختلاط خمیرکاغذها، مربوط به E50 است. در مجموع با افزایش درصد اختلاط خمیرکاغذ بکر E و R با خمیرکاغذ OCC یکپارچگی ساختاری بیش‌تری در کاغذها ایجاد شده است و در نتیجه دانسیته کاغذها روند افزایشی را نشان می‌دهند. هم‌چنین، تیمار OCC به‌عنوان نمونه شاهد تجاری، دانسیته کم‌تری نسبت به اغلب تیمارهای آزمایشگاهی نشان می‌دهد که این نتیجه بیانگر بهبود ساختار الیاف در تیمارهای شامل اختلاط خمیرکاغذها است؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که افزایش میزان تیمارهای R و E تا سطح ۵۰ درصد منجر به تولید کاغذهایی با ساختار متراکم‌تر و همگن‌تر می‌گردد که می‌تواند بر ویژگی‌های مکانیکی نهایی نیز مؤثر باشد. این نتایج بیانگر آن است که افزودن خمیرکاغذ بکر حاصل از ضایعات لیگنوسلولزی نخل خرما به خمیرکاغذ OCC تأثیر قابل‌توجهی بر افزایش دانسیته کاغذهای حاصل داشته است. مطابق با یافته‌های رزم‌پور و همکاران (۲۰۱۲)، با افزایش تعداد دفعات بازیافت کاغذ، به‌دلیل پدیده استخوانی‌شدن[1] و کاهش انعطاف‌پذیری الیاف، پیونددهی و درهم‌رفتگی میان

1- Hornification

الیاف کاهش یافته و ورقه‌ای ضخیم‌تر و متخلخل‌تر با دانسیته‌ی کم‌تر تشکیل می‌شود. خمیرکاغذ بکر دارای الیافی بلندتر و قدرت پیونددهی بیش‌تر است؛ بنابراین افزایش دانسیته در اثر افزودن الیاف بکر، مستقیماً با تقویت پیوندهای بین‌الیافی، کاهش فضاهای خالی و تراکم بیش‌تر ساختار کاغذ ارتباط دارد (۱۹، ۱۸). شیخی و همکاران (۲۰۱۳) نیز در پژوهش خود به این نتیجه رسیدند که افزودن خمیرکاغذ بکر سودای باگاس به خمیرکاغذ OCC سبب افزایش دانسیته کاغذ می‌شود (۱۳).



شکل ۳- مقایسه دانسیته کاغذ حاصل از خمیرکاغذ شاهد و خمیرکاغذهای اختلاطی.

Figure 3. Comparison of the paper density from control and blended pulps.

مقادیر دانسیته کاغذها، در جدول ۲ با آزمون تجزیه واریانس بررسی شد. آزمون تجزیه واریانس دانسیته کاغذها در سطح اطمینان ۹۵ درصد نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار آماری بین تیمارها است ($P<0/05$).

جدول ۲- نتایج آزمون تجزیه واریانس ویژگی‌های اندازه‌گیری‌شده کاغذها.

Table 2. Results of the analysis of variance test of the measured characteristics of the papers.

تفاوت Significance	سطح معنی‌داری Significance Level	مقدار F F-value	میانگین مربعات Mean Square	درجه آزادی Degrees of Freedom	مجموع مربعات Sum of Squares	منبع تغییرات Source of Variation	آزمون Test
**	0.000	54.731	0.021	12	0.256	تیمارها Treatments	دانسیته Density
-	-	-	0.000	26	0.01	خطا Error	
-	-	-	-	39	0.266	مجموع Total	
**	0.000	132.884	7.215	12	86.575	تیمارها Treatments	مقاومت به ترکیدن Burst Strength
-	-	-	0.054	26	1.412	خطا Error	
-	-	-	-	38	87.986	مجموع Total	

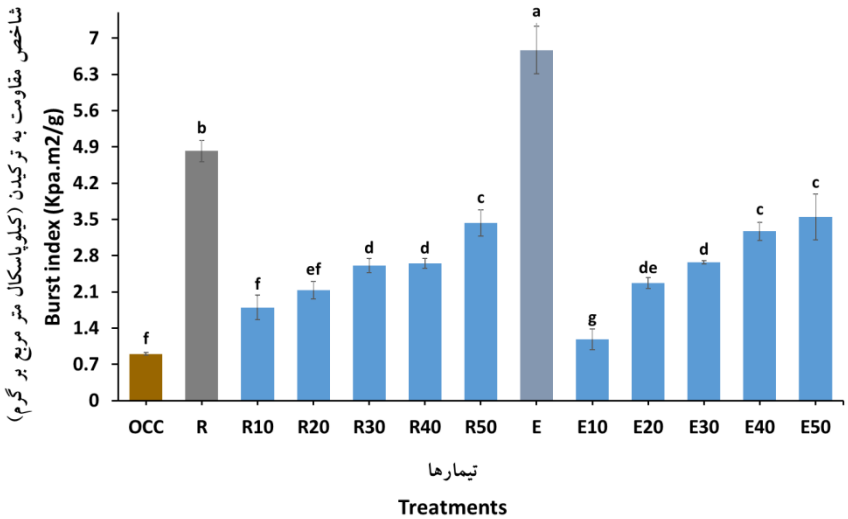
ادامه جدول ۲-

Continue Table 2.

آزمون Test	منبع تغییرات Source of Variation	مجموع مربعات Sum of Squares	درجه آزادی Degrees of Freedom	میانگین مربعات Mean Square	مقدار F F-value	سطح معنی‌داری Significance Level	تفاوت Significance
مقاومت به پارگی Tear Strength	تیمارها Treatments	0.207	12	0.017	14.690	0.000	**
	خطا Error	0.03	26	0.001	-	-	-
	مجموع Total	0.237	38	-	-	-	-
مقاومت به کشش Tensile Strength	تیمارها Treatments	9134.617	12	761.218	75.577	0.000	**
	خطا Error	261.874	26	10.072	-	-	-
	مجموع Total	9396.492	38	-	-	-	-
مقاومت به لهیدگی حلقوی Ring Crush Strength	تیمارها Treatments	99668	12	8305.667	2633.504	0.000	**
	خطا Error	82	26	3.154	-	-	-
	مجموع Total	99750	38	-	-	-	-
مقاومت به تاخوردگی Folding Strength	تیمارها Treatments	542757.077	12	45229.756	56901.952	0.000	**
	خطا Error	20.667	26	0.795	-	-	-
	مجموع Total	542777.774	38	-	-	-	-
مقاومت به عبور هوا Air Resistance	تیمارها Treatments	17782.819	12	1481.902	389.344	0.000	**
	خطا Error	98.960	26	3.806	-	-	-
	مجموع Total	17881.779	38	-	-	-	-
درجه روشنی Brightness	تیمارها Treatments	736.638	12	61.386	1181.033	0.000	**
	خطا Error	1.351	26	0.052	-	-	-
	مجموع Total	737.989	38	-	-	-	-

مقاومت به ترکیدن: مقایسه میانگین نتایج آزمون شاخص مقاومت به ترکیدن نمونه‌های کاغذ، در نمودار شکل ٤ قابل‌مشاهده است. همان‌طورکه مشاهده می‌شود، تیمارهای حاوی خمیرکاغذ بکر شاخص مقاومت به ترکیدن را به‌طور معنی‌داری نسبت به تیمار شاهد OCC افزایش می‌دهند. حداکثر مقدار مقاومت به ترکیدن در بین کاغذهای شاهد مربوط به تیمار E با مقدار حدود ٦/٧٧ کیلوپاسکال

مترمربع بر گرم است، درحالی‌که کم‌ترین مقدار به تیمار OCC با مقدار ۰/۹ کیلوپاسکال مترمربع بر گرم اختصاص دارد. افزایش مقاومت در اثر افزایش درصد خمیرکاغذ بکر را می‌توان به تفاوت در ساختار و ریخت‌شناسی الیاف نسبت داد. خمیرکاغذ OCC دارای الیاف کوتاه‌تر، سخت‌تر و با انعطاف‌پذیری کم‌تر است که منجر به کاهش قابلیت پیونددهی بین الیاف و در نتیجه کاهش مقاومت به ترکیدن می‌شود. در مقابل، خمیرکاغذهای بکر دارای الیاف بلندتر و منعطف‌تری هستند که با ایجاد اتصالات هیدروژنی بیش‌تر، تراکم پیوند بین الیاف را افزایش می‌دهند و موجب بهبود خواص مکانیکی کاغذ می‌گردند. از سوی دیگر، با توجه به این‌که دانسیته ظاهری یکی از ویژگی‌های فیزیکی پایه‌ای کاغذ به شمار می‌رود و بر عملکرد مکانیکی آن تأثیر می‌گذارد، افزایش دانسیته در تیمارهای دارای خمیرکاغذ بکر نیز در ارتقاء شاخص ترکیدن نقش دارد. به‌طورکلی، افزایش درصد خمیرکاغذ بکر باعث ارتقاء تراکم الیاف و یکپارچگی ساختاری شبکه کاغذ می‌شود؛ بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که افزایش نسبت اختلاط خمیرکاغذهای بکر R و E تا سطح ۵۰ درصد، منجر به تولید کاغذهایی با ساختار متراکم‌تر، پیوند داخلی قوی‌تر و بهبود قابل‌توجه در ویژگی‌های مکانیکی از جمله مقاومت به ترکیدن می‌شود. نصار و همکاران (۲۰۱۵) نیز در پژوهش خود به این نتیجه رسیدند که افزودن خمیرکاغذ بکر کاغذ سودا کاه برنج به خمیرکاغذ روزنامه کهنه باعث بهبود شاخص مقامت به ترکیدن می‌شود (١٤). همچنین شیخی و همکاران (۲۰۱۳) نیز در پژوهش خود به این نتیجه رسیدند که افزودن خمیرکاغذ بکر سودای باگاس به خمیرکاغذ OCC سبب افزایش این ویژگی می‌شود و دلایل آن را تقویت پیوند بین الیاف و بهبود انعطاف‌پذیری الیاف در اثر افزودن الیاف بکر توصیف کردند (۱۳).

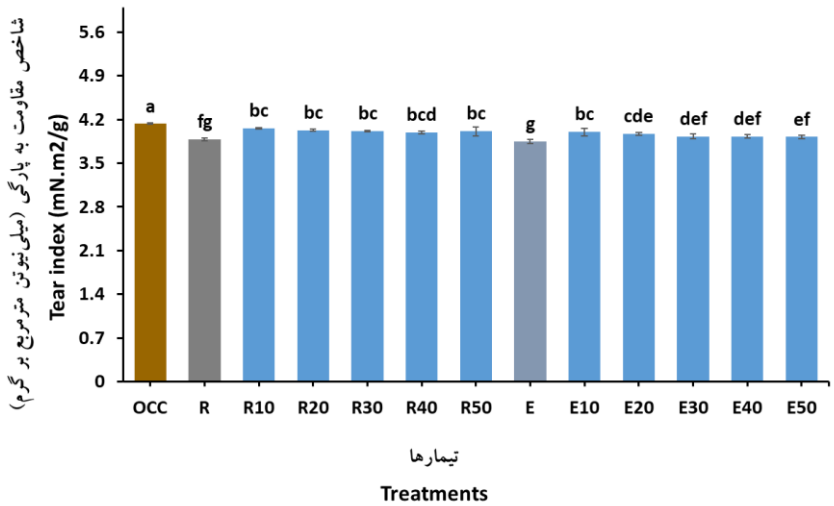


شکل ٤- مقایسه شاخص مقاومت به ترکیدن کاغذ حاصل از خمیرکاغذ شاهد و خمیرکاغذهای اختلاطی.

Figure 4. Comparison of the paper burst strength index from control and blended pulps.

مقادیر شاخص مقاومت به ترکیدن در کاغذها، در جدول ۲ با آزمون تجزیه واریانس بررسی شد. آزمون تجزیه واریانس مقاومت به عبور هوا در سطح اطمینان ۹۵ درصد نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار آماری بین تیمارها است ($P<۰/۰۵$).

مقاومت به پارگی: شاخص مقاومت به پارگی، شاخصی است که مقدار انرژی موردنیاز برای گسیختگی نمونه کاغذ را بیان می‌کند. این انرژی می‌تواند موجب پارگی الیاف و یا جداسازی الیاف از شبکه کاغذی و در نتیجه گسیختگی و شکست پیوند بین الیاف شود. این شاخص عمدتاً تحت‌تأثیر طول الیاف، مقاومت ذاتی آن‌ها و قدرت پیوندهای بین‌الیافی قرار دارد (۲۰، ۲۱). بر اساس نوع و مقاومت پیوند بین الیاف، نسبت انرژی مصرفی برای پارگی الیاف در برابر انرژی مصرفی برای جداسازی آن‌ها متغیر خواهد بود. در کاغذهایی که از پیوندهای قوی‌تری بین الیاف برخوردارند، بخش بیش‌تری از انرژی به پارگی واقعی الیاف اختصاص می‌یابد، درحالی‌که در کاغذهایی با پیوندهای ضعیف‌تر، انرژی غالباً صرف جدا شدن الیاف از یکدیگر می‌شود. به‌طورکلی، افزایش میزان پالایش با افزایش سطح تماس و پیونددهی الیاف همراه است، اما از سوی دیگر، موجب کاهش میانگین طول الیاف نیز می‌شود که این ترکیب عوامل، می‌تواند منجر به کاهش شاخص مقاومت به پارگی گردد (۲۲). مقایسه میانگین نتایج آزمون شاخص مقاومت به پارگی نمونه‌های کاغذ، در نمودار شکل ۵ قابل‌مشاهده است. همان‌طورکه مشاهده می‌شود، تیمارهای مختلف تأثیر معنی‌داری بر شاخص مقاومت به پارگی نسبت به تیمار شاهد OCC نداشته است و مقادیر اندازه‌گیری‌شده در اکثر تیمارها در دامنه‌ای نزدیک به هم قرار دارد. به‌طورکلی، مقاومت به پارگی بیش از آن‌که تابع مستقیم تراکم یا پیوند داخلی بین الیاف باشد، به طول مؤثر الیاف، درجه پالایش و یکپارچگی الیاف بستگی دارد. ازآن‌جایی‌که خمیرکاغذهای بکر با هدف یکسان‌سازی درجه روانی با الیاف خمیرکاغذ OCC، پالایش شده‌اند، تفاوت معنی‌داری از نظر طول مؤثر الیاف وجود نخواهد داشت و این موضوع سبب شده است تا شاخص مقاومت به پارگی در تمامی تیمارها نزدیک به مقدار تیمار شاهد باقی بماند؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که افزایش درصد اختلاط خمیرکاغذهای بکر R و E با OCC، تأثیر قابل‌توجهی بر افزایش شاخص مقاومت به پارگی نداشته است. این یافته‌ها با نتایج به‌دست‌آمده در پژوهش جعفری گندمانی و همکاران (۲۰۲٤) در مورد افزودن خمیرکاغذ الیاف بکر باگاس به خمیرکاغذ بازیافتی مطابقت دارد (۱٦).

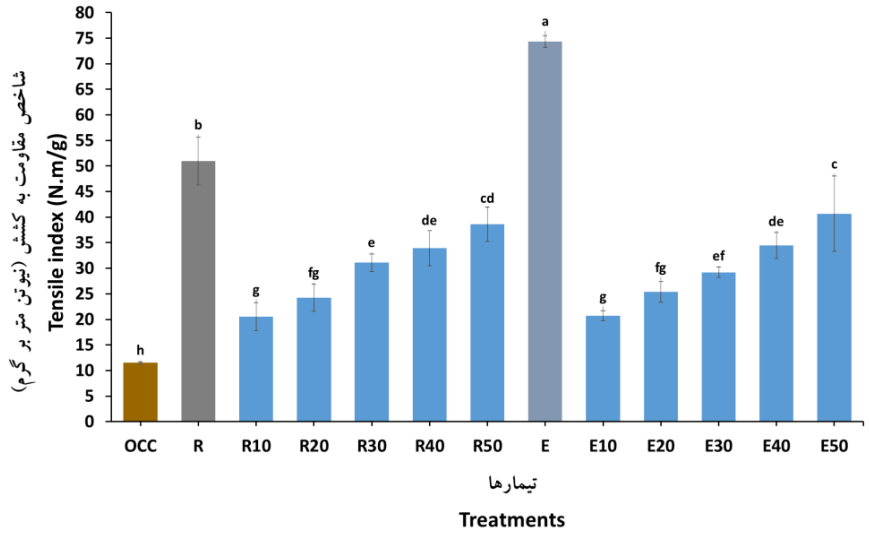


شکل ۵- مقایسه شاخص مقاومت به پارگی کاغذ حاصل از خمیرکاغذ شاهد و خمیرکاغذهای اختلاطی.

Figure 5. Comparison of the paper tear strength index from control and blended pulps.

مقادیر شاخص مقاومت به پارگی کاغذها در جدول ۲ با استفاده از آزمون تجزیه واریانس مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل نشان داد که بین مقادیر به‌دست‌آمده در تیمارهای مختلف، تفاوت معنی‌داری آماری در سطح اطمینان ۹۵ درصد (P<۰/۰۵) وجود دارد. این اختلاف بیانگر آن است که نوع و نسبت خمیرکاغذهای به‌کاررفته در ترکیب با OCC می‌تواند بر شاخص مقاومت به پارگی اثرگذار باشد، هرچند تغییرات عددی میان تیمارها نسبتاً محدود و کم بوده است.

مقاومت به کشش: مقاومت کششی یکی از بنیادی‌ترین و مهم‌ترین ویژگی‌های مکانیکی کاغذ به شمار می‌رود، زیرا برخلاف سایر آزمون‌های مقاومتی، ترکیبی از مقاومت‌های پارگی، تاخوردگی و ترکیدن را در قالب یک ویژگی اندازه‌گیری می‌کند و به همین دلیل از پیچیدگی بیش‌تری برخوردار است. مهم‌ترین عامل مؤثر بر شاخص مقاومت به کشش، مقاومت و کیفیت پیوند بین الیاف است، به‌گونه‌ای که افزایش میزان اتصال بین الیاف که در نتیجه فرآیندهایی مانند پالایش مکانیکی یا پرس‌کردن بیش‌تر حاصل می‌شود، منجر به افزایش قابل‌توجه مقاومت کششی می‌گردد (۲۳). مقایسه میانگین نتایج آزمون شاخص مقاومت به کشش نمونه‌های کاغذ، در نمودار شکل ٦ قابل‌مشاهده است. همان‌طورکه مشاهده می‌شود، افزودن خمیرکاغذ بکر حاصل از ضایعات لیگنوسلولزی نخل خرما (شامل R و E) به خمیرکاغذ OCC باعث افزایش قابل‌توجه مقاومت به کشش کاغذها در مقایسه کاغذ شاهد OCC شده است. این افزایش را می‌توان به ساختار الیاف بکر، طول بیش‌تر آن‌ها و قابلیت پیونددهی بیش‌تر نسبت داد. بیش‌ترین مقدار این شاخص در کاغذهای حاصل از اختلاط مربوط به تیمار E50 با مقدار حدود ٤٠/٦٦ نیوتن‌متر بر گرم مشاهده شد. در بین کاغذهای شاهد کم‌ترین مقدار در کاغذ OCC با حدود ١١/٤٩ نیوتن‌متر بر گرم و بیش‌ترین مقدار در کاغذ E ٧٤/٣٦ نیوتن‌متر بر گرم مشاهده شد. در نمونه‌های OCC به‌دلیل طول کوتاه‌تر، سختی بیش‌تر و پیوند ضعیف بین الیاف، شاخص مقاومت به کشش در سطح پایینی قرار دارد. از سوی دیگر، الیاف بکر، به‌ویژه الیاف حاصل از خوشه نخل خرما، با ایجاد شبکه‌ای متراکم‌تر و منسجم‌تر منجر به افزایش مقاومت کششی کاغذها شده است. همچنین با افزایش درصد خمیرکاغذ بکر در ترکیب با OCC، روند افزایشی در شاخص کشش مشاهده می‌شود که نشان‌دهنده تأثیر مثبت اختلاط در بهبود خواص مکانیکی است. این بهبود، علاوه بر ویژگی‌های ذاتی الیاف، می‌تواند ناشی از تراکم بیش‌تر و افزایش دانسیته نمونه‌ها نیز باشد که پیوندهای بین‌الیافی را تقویت می‌کند. در مجموع، استفاده از خمیرکاغذهای بکر E و R، سبب ارتقاء قابل‌توجه در شاخص کشش کاغذهای تولیدشده شده است. این یافته‌ها با نتایج به‌دست‌آمده در پژوهش‌های جعفری گندمانی و همکاران (٢٠٢٤) و شیخی و همکاران (٢٠١٣) در مورد افزودن خمیرکاغذ الیاف بکر باگاس به خمیرکاغذ بازیافتی مطابقت دارد (١٣، ١٦).

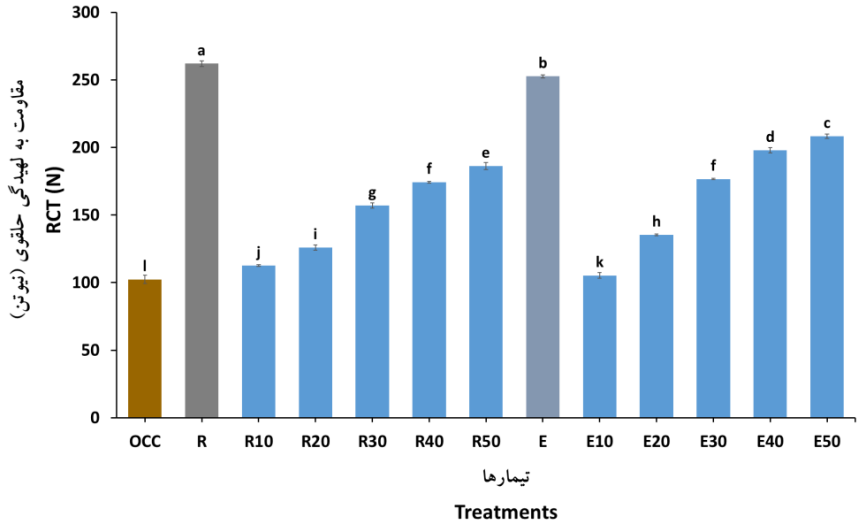


شکل ٦- مقایسه شاخص مقاومت به کشش کاغذ حاصل از خمیرکاغذ شاهد و خمیرکاغذهای اختلاطی.

Figure 6. Comparison of the paper tensile strength index from control and blended pulps.

مقادیر شاخص مقاومت به کشش کاغذها در جدول ۲ با استفاده از آزمون تجزیه واریانس مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل نشان داد که بین مقادیر به‌دست‌آمده در تیمارهای مختلف، تفاوت معنی‌داری آماری در سطح اطمینان ۹۵ درصد ($P<۰/۰۵$) وجود دارد.

مقاومت به لهیدگی حلقوی: آزمون مقاومت به لهیدگی حلقوی (RCT) بیانگر مقاومت مقوا در برابر نیروی فشاری اعمال‌شده بر لبه آن است و ارتباط مستقیمی با مقاومت لایه میانی کنگره‌ای یا مقاومت به لهیدگی کنگره (CMT) دارد. این شاخص یکی از معیارهای کلیدی در ارزیابی عملکرد مکانیکی مقواهای مورد استفاده در ساخت جعبه‌های کنگره‌ای محسوب می‌شود (۲۲). مقایسه میانگین نتایج آزمون مقاومت به لهیدگی حلقوی نمونه‌های کاغذ، در نمودار شکل ۷ قابل‌مشاهده است. همان‌طورکه در این نمودار مشخص است، کاغذهای حاوی خمیرکاغذ بکر (E و R) مقاومت بسیار بیش‌تری نسبت به تیمار شاهد OCC نشان داده‌اند. این یافته‌ها با نتایج به‌دست‌آمده در پژوهش جعفری گندمانی و همکاران (۲۰۲٤) در مورد افزودن خمیرکاغذ الیاف بکر باگاس به خمیرکاغذ بازیافتی مطابقت دارد (١٦). بیش‌ترین مقدار مقاومت به لهیدگی در بین کاغذهای شاهد در کاغذ R و کم‌ترین مقدار در کاغذ OCC مشاهده شد. در بین کاغذهای حاصل از اختلاط در کاغذ E50 بیش‌ترین مقدار مقاومت به لهیدگی مشاهده شد. افزایش قابل‌توجه مقاومت به لهیدگی را می‌توان به کیفیت ساختاری بهتر، مقاومت بیش‌تر و پیونددهی مؤثرتر الیاف در نمونه‌های حاوی خمیرکاغذ بکر نسبت داد. به‌طورکلی، افزایش درصد خمیرکاغذ بکر در ترکیب با OCC موجب ارتقاء معنی‌دار مقاومت فشاری لبه کاغذها شده است. این موضوع برای تولید مقواهایی با عملکرد بیش‌تر در بسته‌بندی‌های سنگین و مقاوم دارای اهمیت است. هم‌چنین، این روند با نتایج به‌دست‌آمده از آزمون‌های کشش و دانسیته نیز هم‌راستا می‌باشد که همگی بیانگر تأثیر مثبت افزودن الیاف بکر بر مقاومت نهایی محصول هستند.

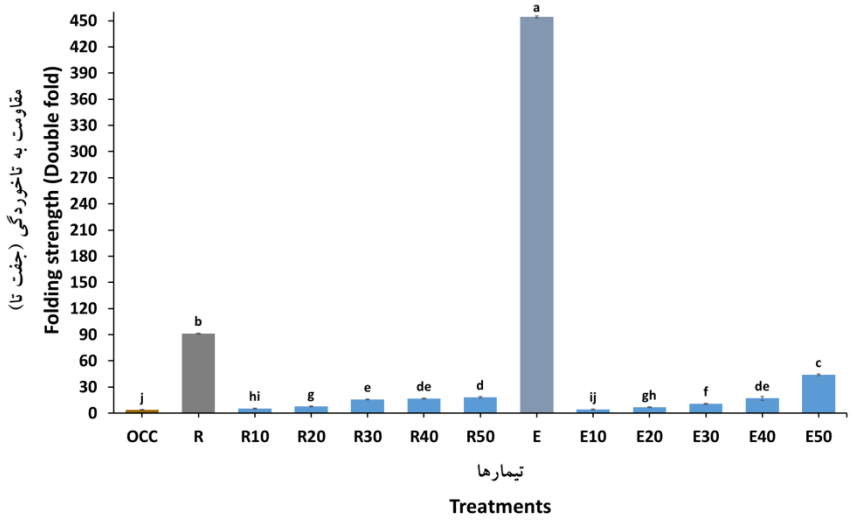


شکل ۷- مقایسه مقاومت به لهیدگی حلقوی کاغذ حاصل از خمیرکاغذ شاهد و خمیرکاغذهای اختلاطی.

Figure 7. Comparison of the paper RCT from control and blended pulps.

مقادیر مقاومت به لهیدگی حلقوی کاغذها در جدول ۲ با استفاده از آزمون تجزیه واریانس مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل نشان داد که بین مقادیر به‌دست‌آمده در تیمارهای مختلف، تفاوت معنی‌داری آماری در سطح اطمینان ۹۵ درصد ($P<۰/۰۵$) وجود دارد.

مقاومت به تاخوردگی: مقایسه میانگین نتایج آزمون مقاومت به تاخوردگی نمونه‌های کاغذ (تعداد جفت تاخوردگی)، در نمودار شکل ۸ قابل‌مشاهده است. این شاخص بیانگر مقاومت کاغذ در برابر خمش‌های مکرر و برگشت‌پذیر بوده و به‌عنوان یکی از شاخص‌های مهم در ارزیابی مقاومت در برابر تا شدن در کاربردهای خاص مانند بسته‌بندی در نظر گرفته می‌شود. همان‌طورکه در شکل مشخص است، تیمار شاهد E با اختلاف بسیار قابل‌توجهی نسبت به نمونه‌های شاهد، بیش‌ترین مقدار مقاومت به تاخوردگی (٤٥٤/٣٣ جفت تا) را نشان داده است. در مقابل، تیمار OCC کم‌ترین مقدار را دارد که نشان‌دهنده ضعف آن در برابر خمش‌های مکرر است. افزایش درصد خمیرکاغذ بکر در ترکیب با OCC موجب ارتقاء معنی‌دار مقاومت به تاخوردگی کاغذها شده است. این نتیجه با پژوهش شیخی و همکاران (۲۰۱۳) همسو است (۱۳). این نتایج بیانگر آن است که ساختار لیفی منسجم‌تر و انعطاف‌پذیری بهتر خمیرکاغذهای بکر، به‌ویژه از نوع خوشه (E)، نقش بسیار مهمی را در افزایش دوام کاغذ در برابر خمش‌های مکرر دارد. در مقابل، الیاف خمیرکاغذ OCC به دلیل متوسط طول الیاف کوتاه‌تر، سختی زیاد و پیوند ضعیف، قادر به تحمل تنش‌های خمشی مکرر نیستند.

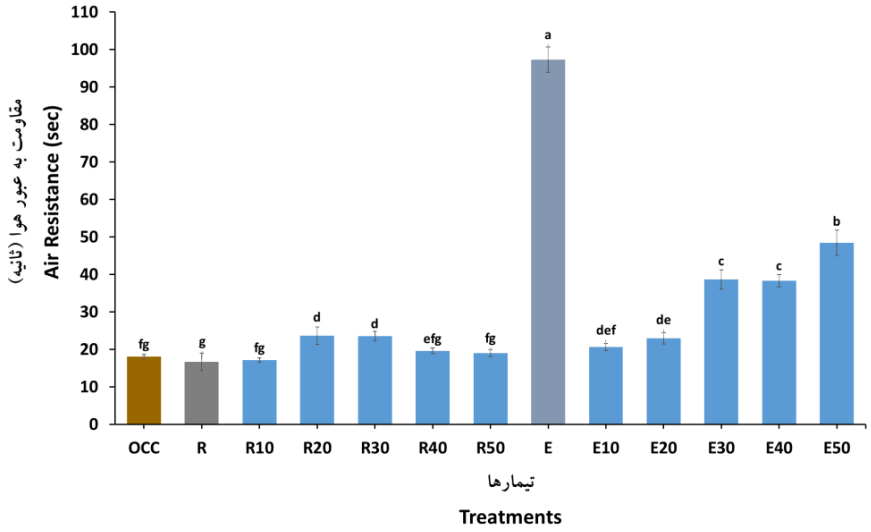


شکل ۸- مقایسه مقاومت به تاخوردگی کاغذ حاصل از خمیرکاغذ شاهد و خمیرکاغذهای اختلاطی.

Figure 8. Comparison of the paper folding strength from control and blended pulps.

مقادیر مقاومت به تاخوردگی کاغذها در جدول ۲ با استفاده از آزمون تجزیه واریانس مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل نشان داد که بین مقادیر به‌دست‌آمده در تیمارهای مختلف، تفاوت معنی‌داری آماری در سطح اطمینان ۹۵ درصد ($P<۰/۰۵$) وجود دارد.

مقاومت به عبور هوا: شکل ۹ روند تغییرات مقاومت به عبور هوا را در نمونه‌های کاغذ تهیه‌شده از اختلاط خمیرکاغذ OCC با خمیرکاغذ بکر حاصل از ساقه و خوشه بدون میوه نخل خرما نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشخص است، افزودن خمیرکاغذ بکر به ترکیب OCC به‌طور واضح موجب افزایش مقاومت به عبور هوا شده است. بیش‌ترین مقاومت در تیمار حاوی ۵۰ درصد خمیرکاغذ خوشه (E50) مشاهده شد که نشان‌دهنده کاهش نفوذپذیری ساختار کاغذ و تراکم بیش‌تر آن است. افزایش مقاومت به عبور هوا در تیمارهای حاوی درصدهای بیش‌تر خمیرکاغذ بکر، به‌ویژه خمیرکاغذ حاصل از خوشه، می‌تواند به دلیل ویژگی‌های ریخت‌شناسی مناسب‌تر و پیونددهی مؤثرتر الیاف تازه نسبت به الیاف بازیافتی OCC تفسیر شود. این افزایش بیانگر کاهش نفوذپذیری هوا در ساختار کاغذ و در نتیجه تراکم بیش‌تر و پیوند مؤثرتر بین الیاف می‌باشد. به‌طورکلی، افزودن خمیرکاغذهای بکر نخل خرما به ترکیب OCC موجب بهبود خاصیت ممانعتی کاغذها شده است. این یافته‌ها با نتایج به‌دست‌آمده در پژوهش شیخی و همکاران (۲۰۱۳) در مورد افزودن خمیرکاغذ الیاف بکر باگاس به خمیرکاغذ بازیافتی مطابقت دارد (۱۳).

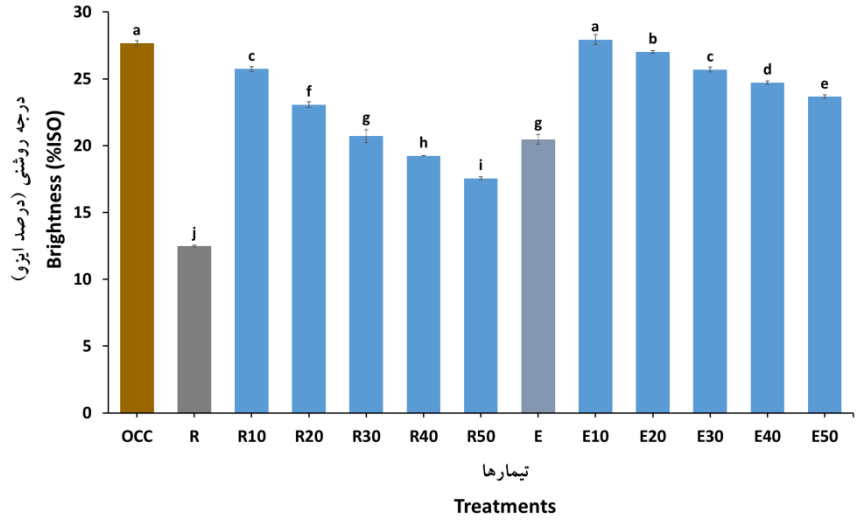


شکل ۹- مقایسه مقاومت به عبور هوا کاغذهای حاصل از خمیرهای شاهد و اختلاط یافته.

Figure 9. Comparison of the papers air resistance from control and blended pulps.

مقادیر مقاومت به عبور هوا در کاغذها، در جدول ۲ با آزمون تجزیه واریانس بررسی شد. آزمون تجزیه واریانس مقاومت به عبور هوا در سطح اطمینان ۹۵ درصد نشان‌دهنده‌ی تفاوت معنی‌دار آماری بین تیمارها است ($P<۰/۰۵$).

درجه روشنی: مقایسه میانگین نتایج درجه روشنی نمونه‌های کاغذ در شکل ۱۰ قابل‌مشاهده است. این شاخص بیانگر درصد بازتاب نور آبی از سطح نمونه است و به‌عنوان یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های نوری کاغذ، نقش کلیدی در کیفیت ظاهری، چاپ‌پذیری و کاربردهای نهایی ایفا می‌کند. همان‌طورکه در شکل مشاهده می‌شود، کاغذ شاهد OCC با حدود ۲۷/٦٦ درصد ایزو، بیش‌ترین مقدار درجه روشنی را دارد. در مقابل، خمیرکاغذ بکر R (ساقه برگ نخل خرما) کم‌ترین مقدار درجه روشنی را با حدود ۱۲/٤۹ درصد ایزو نشان می‌دهد. در مجموع با افزودن تدریجی خمیرکاغذ بکر R و E به ترکیب OCC، درجه روشنی نیز به‌صورت تدریجی کاهش می‌یابد. به نظر می‌رسد این کاهش به دلیل لیگنین باقی‌مانده موجود در الیاف بکر است. بااین‌حال، کاهش درجه روشنی در بسیاری از کاربردهای بسته‌بندی از اهمیت کم‌تری برخوردار است.



شکل ۱۰- مقایسه درجه روشنی کاغذهای حاصل از خمیرکاغذ شاهد و خمیرکاغذهای اختلاطی.

Figure 10. Comparison of the papers brightness from control and blended pulps.

نتایج تجزیه واریانس حاصل از اندازه‌گیری درجه روشنی کاغذهای به‌دست‌آمده، در جدول ۲ نشان داده شده است. طبق آنالیز انجام شده تفاوت تیمارها در سطح ۹۵ درصد، معنی‌دار شده است.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، امکان ارتقاء خواص فیزیکی و مکانیکی خمیرکاغذ بازیافتی (OCC) از طریق اختلاط با خمیرکاغذ کرافت رنگ‌بری‌نشده حاصل از ضایعات لیگنوسلولزی نخل خرما (ساقه برگ و خوشه بدون میوه) بررسی و ارزیابی شد. نتایج نشان داد که افزودن هر دو نوع خمیرکاغذ بکر (ساقه برگ و خوشه بدون میوه) به خمیرکاغذ OCC به‌طور معنی‌داری موجب بهبود شاخص‌های مختلف مقاومتی از جمله مقاومت به کشش، ترکیدن، لهیدگی حلقوی و تاخوردگی می‌گردد. این بهبودها به‌ویژه در تیمارهای حاوی درصدهای بیش‌تر از خمیرکاغذ بکر، به‌ویژه خوشه بدون میوه (E)، برجسته‌تر است. افزایش میزان اختلاط خمیرکاغذ بکر با OCC موجب افزایش دانسیته، کاهش نفوذپذیری به هوا، بهبود ساختار الیافی و یکپارچگی کاغذ شد؛ در مقابل درجه روشنی کاهش یافت که این موضوع به دلیل لیگنین باقی‌مانده موجود در الیاف بکر است. شاخص مقاومت به پارگی نسبت به سایر ویژگی‌ها حساسیت کم‌تری به تغییر ترکیب خمیرکاغذ نشان داد. هم‌چنین، مقاومت به تاخوردگی و لهیدگی حلقوی به‌عنوان شاخص‌هایی کلیدی در ارزیابی کاربردهای صنعتی با اختلاط خمیرکاغذهای بکر با خمیرکاغذ OCC افزایش قابل‌توجهی یافتند. در کاغذهای حاوی خمیرکاغذ خوشه، حداقل درصد اختلاط (E10)، موجب افزایش ۵/٤٦، ۳۱/۱۱، ۳/۱٤-، ۸۰/۰۲، ۲/۹۳، ۱۸/۱۷ و ۱۳/۹۷ درصدی به ترتیب در دانسیته، مقاومت به ترکیدن، پارگی، کشش، لهیدگی حلقوی، تاخوردگی و عبور هوا نسبت به کاغذهای حاصل از ۱۰۰ درصد خمیرکاغذ OCC شد؛ درحالی‌که حداکثر اختلاط (E50)، موجب افزایش ۲۵/۳۳، ۲۹٤/٤٤، ۵/۰۸-، ۲۵۳/۸۵، ۱۰۳/۵۸، ۱۰۹۹/۹۸ و ۱٦۷/۲۸ درصدی به ترتیب در دانسیته، مقاومت به ترکیدن، پارگی، کشش، لهیدگی حلقوی، تاخوردگی و عبور هوا نسبت به کاغذهای حاصل از ۱۰۰ درصد خمیرکاغذ OCC شد. در کاغذهای حاوی خمیرکاغذ ساقه برگ، حداقل درصد اختلاط (R10) موجب افزایش ۲/۷۲، ۱۰۰،

۱/٦۹–، ۷۸/۷٤، ۱۰/۰۹، ٤٥/٤٥ و ٥/۳۳– درصدی به‌ترتیب در دانسیته، مقاومت به ترکیدن، پارگی، کشش، لهیدگی حلقوی، تاخوردگی و عبور هوا نسبت به کاغذهای حاصل از ۱۰۰ درصد خمیرکاغذ OCC شد. درحالی‌که حداکثر اختلاط (R50)، موجب افزایش ۱۳، ۲۸۱/۱۱، ۲/۹–، ۲۳٥/۹۷، ۸۲/۰۸، ۳۹۰/۹۰ و ٤/۹٦ به‌ترتیب در دانسیته، مقاومت به ترکیدن، پارگی، کشش، لهیدگی حلقوی، تاخوردگی و عبور هوا نسبت به کاغذهای حاصل از ۱۰۰ درصد خمیرکاغذ OCC شد. به‌طورکلی، مقایسه حداقل و حداکثر درصدهای اختلاط در هر دو نوع خمیرکاغذ نشان می‌دهد که اگرچه هر دو منبع بکر سبب ارتقاء خواص کاغذ شدند؛ اما خمیرکاغذ خوشه بدون میوه نخل خرما (E) تأثیرگذاری بیش‌تری نسبت به ساقه برگ (R) داشته و نتایج برجسته بیش‌تری در بهبود ویژگی‌های کلیدی مانند RCT، مقاومت به کشش و تاخوردگی از خود نشان داد.

منابع

1. Mirshokrayi, A. (2008). *Guide to waste paper* (2nd ed.). Tehran: Aiizh Publications. 140p. [In Persian]
2. Bajpai, P. K. (2010). Solving the problems of recycled fiber processing with enzymes. *BioResources*. 5(2), 1311-1325.
3. Mahdavi, S., Karmanian, H., Moradi, M., & Ramazani, O. (2017). Effect of laccase enzyme treatment on the strength properties of old corrugated container (OCC) pulp. *J. of Wood and Forest Science and Technology researches*. 24(4), 66-70. [In Persian]
4. Toudarvari, Z., Farsi, M., & Asadpour Atouei, G. (2016). Effect of fiber length variations in different OCC pulps on the strength properties of corrugated paper. *J. of Wood and Forest Science and Technology researches*. 23(4), 255-268. [In Persian]
5. Roudi, H. R., & Hamzeh, Y. (2015). Identification of qualitative and quantitative papermaking parameters of OCC pulp fibers. *J. of Wood and Paper Industries*. 6, 2. [In Persian]
6. Filipova, I., Andze, L., Skute, M., Zoldners, J., Irbe, I., & Dabolina, I. (2023). Improving recycled paper materials through the incorporation of hemp, wood virgin cellulose fibers, and nanofibers. *Fibers*. 11(12), 101.
7. Mahdavi, S. (2016). Importance of fiber composition identification in improving the properties of packaging papers. *Packaging Science and Technology*. 7, 25. [In Persian]
8. Ghasemian, A., & Khalili, A. (2011). Fundamentals and methods of paper recycling. Tehran: Aiizh Publications. 184p. [In Persian]
9. Al-Otaibi, H. M., Al-Suhaibani, A. S., & Alsoliman, H. A. (2016). Physical and rheological properties of asphalt modified with cellulose date palm fibers. *World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Civil, Environmental, Structural, Construction and Architectural Engineering*. 10(5), 583-587.
10. Sobhani, S. M., Jaberi, M., & Chaabi, M. (2022). Designing a business model canvas for date palm waste in Khuzestan province. *The 3rd National Conference on Agriculture Industry and Commercialization*, Iran. [In Persian]
11. Wanrosli, W. D., Zainuddin, Z., & Roslan, S. (2005). Upgrading of recycled paper with oil palm fiber soda pulp. *Industrial Crops and Products*. 21(3), 325-329.
12. Schal, N., Krüger, E., Blum, R., & Rubenacker, M. (2009). Soda-AQ pulping of wheat straw and its blending effect on old corrugated cardboard pulp properties. *Tappsa J*. Pp: 30-35.
13. Sheikhi, P., Asadpour, G., Zabihzadeh, S. M., & Amoee, N. (2013). An optimum mixture of virgin bagasse

pulp and recycled pulp (OCC) for manufacturing fluting paper. *BioResources*. 8(4), 5871-5883.

14. Nassar, M. A., Awad, H. M., El-Sakhawy, M., & Hassan, Y. R. (2015). An optimum mixture of virgin rice straw pulp and recycled old Newsprint pulp and their antimicrobial activity. *International Journal of Technology*. 6(1), 63-72.
15. Mohd Hassan, N. H., Mohammed, S., & Ibrahim, R. (2018). Recycled paper enhancement with Semantan Bamboo virgin pulp for corrugated paper manufacturing. *In Regional Conference on Science, Technology and Social Sciences (RCSTSS 2016) Theoretical and Applied Sciences* (Pp: 751-757). Singapore: Springer Singapore.
16. Jafari Gandomani, R., Rahmaninia, M., & Khosravani, A. (2024). Improving the mechanical properties of packaging papers produced in OCC recycling industries with bagasse soda pulp. *The 2nd National and 1st International Conference on Environmental Challenges: Green Industry and Mine*, Noor, Iran. [In Persian]
17. Rowell, R., Young, R., & Rowell, R. (1945). Paper and composite materials from crop resources.
18. Razmpour, Z., Kermanian, H., Ramazani, A., Mahdavi, S., & Rahmaninia, M. (2012). Investigation of the effect of recycling frequency of NSSC waste paper on the properties of recycled pulp. *Environmental Sciences*. 9, 2. [In Persian]
19. Gulsoy, S. K., & Erenturk, S. (2017). Improving strength properties of recycled and virgin pulp mixtures with dry strength agents. *Starch-Stärke*. 69(3-4), 1600035.
20. Afra, E., Mohammadnejad, S., & Saraeyan, A. (2016). Cellulose nanofibils as coating material and its effects on paper properties. *Progress in Organic Coatings*. 101, 455-460.
21. Afra, E., Yousefi, H., & Lakani, S. A. (2014). Properties of chemi-mechanical pulp filled with nanofibrillated and microcrystalline cellulose. *Journal of Biobased Materials and Bioenergy*. 8(5), 489-494.
22. Afra, E. (2003). Properties of paper. Agricultural Sciences Press. 392p. [In Persian]
23. Sarayian, A. (2019). *Investigation on the feasibility of producing high-yield bleached pulp by alkaline peroxide mechanical pulping (APMP) from wheat straw in Khorasan* (PhD dissertation, University of Tehran). 527p. [In Persian]