

## Production of Chemical Pulp Using Carbonate Process from Wheat Straw

Zeynab Bashardoust<sup>1</sup>, Sahab Hedjazi<sup>2\*</sup>, Yahya Hamzeh<sup>3</sup>

1- Ph.D. Student in wood industry and cellulosic products engineering, Department of Wood and Paper Sciences and Engineering, Faculty of Natural Resources, University College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran, Tehran, Iran

2- Corresponding author, Associate Professor, Department of Paper Sciences and Engineering, Faculty of Wood and Paper Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. Email: [shedjazi@gau.ac.ir](mailto:shedjazi@gau.ac.ir)

2- Professor, Department of Wood and Paper Science and Technology, Faculty of Natural Resources, University College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran

Received: May 2024

Accepted: November 2024

### Abstract

**Problem definition and objectives:** In this study, the possibility of producing pulp from wheat straw using the carbonate process was investigated. Given the increasing demand for alternative sources of cellulose fibers in the paper industry and the declining availability of wood resources, utilizing agricultural residues such as wheat straw (WS) can be considered a sustainable solution. In this regard, the sodium carbonate cooking process was evaluated as an environmentally friendly alternative method for fiber extraction.

**Methodology:** For this study, wheat straw was selected as the raw material and subjected to a cooking process with a sodium carbonate solution under various conditions. The maximum cooking temperatures were set at 150 and 170°C, with cooking times of 2, 3, and 5 hours. Additionally, the alkalinity of the cooking solution, based on Na<sub>2</sub>O, was adjusted to four levels: 20, 22, 24, and 26%. To improve lignin separation and enhance the cooking yield, anthraquinone was added at a concentration of 0.1% by dry weight of WS. The liquor-to-straw ratio (L/S) was varied at 4, 6, 8, and 10:1 to determine its effect on the process performance. After the cooking process, the produced pulp was washed and separated using 20 and 200 mesh screens. The parameters of kappa number, total yield, screened yield, and reject content were measured to identify the optimal cooking conditions. Subsequently, the optimized pulp was converted into handmade paper sheets at grammages of 60 and 120 g/m<sup>2</sup> in both refined and unrefined states. Mechanical tests, including tensile, bursting, and tearing strength indices, were conducted on the produced paper to evaluate the quality of the pulp obtained from wheat straw.

**Results:** The results indicated that the sodium carbonate cooking process under optimal conditions could produce pulp with desirable properties. Based on the obtained data, the best cooking conditions were determined as an alkalinity of 22%, a temperature of 170°C, a cooking time of 2 hours, and an L/S ratio of 8:1. The pulp produced under these conditions had a kappa number of 37.72, a total yield of 63.52%, a screened yield of 51.18%, and a reject content of 1.45%, demonstrating the effectiveness of the cooking process. The conversion of optimized pulp into handmade paper and the evaluation of its mechanical properties showed that in both 60 and

120 g/m<sup>2</sup> grammages, the refined samples exhibited higher mechanical strength indices compared to unrefined ones. The highest tensile, bursting, and tearing strength indices were achieved in the refined paper samples, indicating improved mechanical properties with fiber refining. Considering the decline in mechanical properties and the degradation of liner and test liner papers during repeated recycling processes, incorporating wheat straw carbonate pulp as a reinforcing fiber source can help improve the quality of such papers. This aspect is crucial in the packaging industry, as using recycled materials along with suitable reinforcing fibers can enhance the strength and durability of the produced paper.

**Conclusion:** Overall, this study demonstrated that carbonate pulp produced from wheat straw possesses suitable characteristics for use in the paper industry. This method can serve as a sustainable alternative to virgin fibers, reducing dependency on wood resources and enhancing efficiency in the production of packaging papers. Given the increasing demand for sustainable raw materials in this industry, further development and optimization of this process can significantly contribute to improving the performance and sustainability of the paper supply chain.

**Keywords:** Wheat straw, carbonate process, virgin fibers, packaging paper.

## تولید خمیر کاغذ شیمیائی از کاه گندم با استفاده از فرآیند کربنات

زینب بشردوست<sup>۱</sup>، سحاب حجازی<sup>۲\*</sup>، یحیی همزه<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی دکتری مهندسی صنایع چوب و فرآورده‌های سلولزی، گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

۲- نویسنده مسئول، دانشیار گروه علوم و مهندسی کاغذ، دانشکده مهندسی چوب و کاغذ، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. پست الکترونیک: [shedjazi@gu.ac.ir](mailto:shedjazi@gu.ac.ir)

۳- استاد گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.

تاریخ پذیرش: آبان ۱۴۰۳

تاریخ دریافت: خرداد ۱۴۰۳

### چکیده

**بیان مساله و اهداف:** در این تحقیق، امکان تولید خمیر کاغذ از کاه گندم با استفاده از فرآیند کربنات مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به نیاز روزافزون به منابع جایگزین الیاف سلولزی در صنعت کاغذسازی و کاهش دسترسی به منابع چوبی، استفاده از ضایعات کشاورزی مانند کاه گندم می‌تواند به‌عنوان یک راهکار پایدار مطرح باشد. در این راستا، فرآیند پخت کربنات سدیم به‌عنوان یک روش جایگزین و دوستدار محیط‌زیست برای استخراج الیاف سلولزی مورد ارزیابی قرار گرفته است.

**مواد و روشها:** برای انجام این تحقیق، کاه گندم به‌عنوان ماده اولیه انتخاب شده و تحت فرآیند پخت با محلول کربنات سدیم در شرایط مختلف قرار گرفت. دماهای عملیاتی ۱۵۰ و ۱۷۰ درجه سانتی‌گراد و زمان‌های ۲، ۳ و ۵ ساعت مورد بررسی قرار گرفتند. همچنین، میزان قلیائیت محلول پخت بر مبنای  $\text{Na}_2\text{O}$  در چهار سطح ۲۰، ۲۲، ۲۴ و ۲۶ درصد تنظیم شد. برای بهبود فرآیند جداسازی لیگنین و افزایش بازده پخت، از آنتراکینون به میزان ۰/۱ درصد وزنی به‌عنوان افزودنی استفاده گردید. نسبت مایع پخت به کاه (L/S) نیز در مقادیر ۴، ۶، ۸ و ۱۰ به ۱ تغییر داده شد تا تأثیر آن بر عملکرد فرآیند مشخص شود. پس از انجام فرآیند پخت، خمیر کاغذ تولیدی با استفاده از الک‌های مش ۲۰ و ۲۰۰ شستشو و جداسازی گردید. سپس پارامترهای عدد کاپا، بازده کل، بازده بعد از غربال و میزان وازده تعیین شد تا شرایط بهینه فرآیند پخت شناسایی شود. در ادامه، خمیر کاغذ بهینه در دو حالت پالایش شده و پالایش نشده، به کاغذ دست‌ساز در گراماژهای ۶۰ و ۱۲۰ گرم بر مترمربع تبدیل گردید. آزمایش‌های مکانیکی شامل شاخص‌های مقاومت به کشش، ترکیدن و پارگی بر روی کاغذهای تولیدی انجام شد تا کیفیت خمیر کاغذ حاصل از کاه گندم مورد ارزیابی قرار گیرد.

**نتایج:** نتایج نشان داد که فرآیند پخت با کربنات سدیم در شرایط بهینه می‌تواند منجر به تولید خمیر کاغذی با ویژگی‌های مطلوب گردد. بر اساس داده‌های به‌دست‌آمده، بهترین شرایط برای فرآیند پخت، قلیائیت ۲۲ درصد، دمای ۱۷۰ درجه سانتی‌گراد، زمان ۲ ساعت و نسبت L/S برابر ۸ به ۱ تعیین شد. خمیر کاغذ تولیدشده تحت این شرایط دارای عدد کاپای ۳۷/۷۲، بازده کل ۶۳/۵۲ درصد، بازده بعد از غربال ۵۱/۱۸ درصد و میزان وازده ۱/۴۵ درصد بود که نشان‌دهنده عملکرد مطلوب فرآیند پخت است. تبدیل خمیر کاغذ بهینه به کاغذ دست‌ساز و بررسی ویژگی‌های مکانیکی نشان داد که در هر دو گراماژ ۶۰ و ۱۲۰ گرم بر مترمربع، نمونه‌های پالایش‌شده دارای شاخص‌های مقاومت بالاتری نسبت به نمونه‌های پالایش‌نشده بودند. بیشترین میزان شاخص‌های مقاومت به کشش، ترکیدن و پارگی در کاغذهای پالایش‌شده حاصل شد که نشان‌دهنده بهبود خواص مکانیکی با پالایش الیاف است. با توجه به کاهش کیفیت مکانیکی و افت ویژگی‌های کاغذهای لاینر و تست لاینر در فرآیندهای بازیافت مکرر، استفاده از خمیر کاغذ کربنات کاه گندم به‌عنوان یک منبع الیاف تقویتی می‌تواند به بهبود کیفیت این نوع کاغذها کمک کند. این موضوع اهمیت زیادی در

صنعت بسته‌بندی دارد، زیرا استفاده از مواد بازیافتی همراه با الیاف تقویتی مناسب می‌تواند به افزایش مقاومت و دوام کاغذهای تولیدی منجر شود.

**نتیجه‌گیری:** به‌طور کلی، این تحقیق نشان داد که خمیر کاغذ کربنات تولید شده از کاه گندم دارای ویژگی‌های مناسبی برای استفاده در صنعت کاغذسازی است. این روش می‌تواند به‌عنوان یک جایگزین پایدار برای الیاف بکر مطرح شده و به کاهش وابستگی به منابع چوبی و افزایش بهره‌وری در تولید کاغذهای بسته‌بندی کمک کند. با توجه به نیاز روزافزون به مواد اولیه پایدار در این صنعت، توسعه و بهینه‌سازی بیشتر این فرآیند می‌تواند تأثیر بسزایی در بهبود عملکرد و پایداری زنجیره تأمین کاغذ داشته باشد.

**واژه‌های کلیدی:** کاه گندم، فرآیند کربنات، الیاف بکر، کاغذهای بسته‌بندی.

## مقدمه

در طی دهه‌های گذشته توسعه فرهنگی و اقتصادی جوامع بشری موجب گردید که مصرف کاغذ و فرآورده‌های کاغذی به شدت گسترش یابد؛ اما در حال حاضر چنانچه فرآورده‌های کاغذی به بخش‌های عمده کاغذهای بهداشتی، چاپ و تحریر و بسته‌بندی تقسیم‌بندی شوند، دو روند متفاوت برای کاغذهای چاپ و تحریر و بسته‌بندی در عرصه جهانی قابل مشاهده می‌باشد. به این ترتیب که میزان تولید کاغذهای چاپ و تحریر به‌خصوص در کشورهای توسعه یافته ثابت مانده و یا با روند کاهشی روبرو بوده است که عمده دلیل آن می‌تواند توسعه نشر الکترونیک (روزنامه‌های دیجیتال، کتاب‌های الکترونیکی، نشریات دیجیتالی و ...) باشد. همچنین به کارگیری سامانه‌های الکترونیکی در اکثر بخش‌های اداری، آموزشی و صنعتی و حرکت به سوی ادارات و سازمان‌های بدون کاغذ، روند کاهشی در تولید و مصرف کاغذهای چاپ و تحریر را تشدید کرده است [۱]. از طرف دیگر در بخش کاغذهای بسته‌بندی، تصویر کاملاً متفاوتی قابل مشاهده می‌باشد. در مورد اکثر کالاها، بسته‌بندی کاغذی یک استاندارد پذیرفته شده عمومی است که سال‌هاست مورد استفاده قرار می‌گیرد. افزایش جمعیت جهانی، توسعه صنعتی جوامع و تولید کالاهای مختلف و متنوع نیاز به بسته‌بندی کاغذی را روزافزون کرده است [۲]. به ویژه حساسیت‌های محیط‌زیستی که جوامع انسانی در کشورهای مختلف نسبت به بسته‌بندی‌های دوستدار محیط‌زیست و سبز دارند، موجب شده است که کاغذهای بسته‌بندی به‌عنوان کامپوزیتی از الیاف طبیعی که عمدتاً از طریق بازیافت تأمین می‌گردند، نقش منحصر به فردی

را در صنعت بسته‌بندی پاک و سبز در آینده بازی نمایند [۳،۴]. در عصر دیجیتالی شدن و تغییر سبک زندگی، تقاضا برای کاغذ و استفاده از آن، برای بسته‌بندی، همواره همراه با تقاضا برای محصولات بهداشتی کاغذ در حال رشد است [۵]. همچنین توسعه اینترنت و خریدهای اینترنتی باعث روند صعودی برای تقاضا محصولات بسته‌بندی نیز گردیده است [۶]. همه‌گیری ویروس کووید ۱۹ تمایل به خریدهای اینترنتی و دریافت کالاهای مورد نیاز از طریق پست با بسته‌بندی‌های غال با کاغذی را تشدید نموده است. گسترش این فرهنگ خرید اینترنتی به نظر می‌رسد که در سال‌های بعد از کرونا و دهه‌های آتی نیز همچنان باقی‌مانده و تشدید شود و لذا می‌توان پیش‌بینی کرد که تقاضا برای کاغذهای بسته‌بندی همچنان رو به رشد خواهد بود.

کاغذهای بسته‌بندی در ایران عمدتاً از طریق بازیافت تولید می‌گردند. این امر به خوبی شناخته شده است که در هر بار بازیافت کاغذ، به‌خصوص در اثر پدیده استخوانی شدن مقاومت‌های آن کاهش می‌یابد و الیاف کاغذ را نمی‌توان به‌طور مداوم مورد استفاده مجدد قرار داد [۷ و ۸]. این محدودیت‌ها به همراه تقاضای روزافزون برای کاغذهای بسته‌بندی، ضرورت توجه به کیفیت در کاغذهای بسته‌بندی را به وجود می‌آورد. استفاده از افزودنی‌های شیمیایی مختلف جهت ارتقاء مقاومت این کاغذها ضمن تحمیل هزینه‌های مضاعف به کارخانه‌ها موجب افزایش بار آلودگی در چرخه‌های آب کارخانه و نهایتاً منجر به افزایش هزینه‌ها در سیستم تصفیه پساب کارخانه‌ها در راستای کاهش تأثیر محیط‌زیستی آن‌ها می‌شود.

استفاده از فرآیند سودا، نداشتن صرف اقتصادی به دلیل عدم وجود سیستم بازیابی مناسب می‌باشد که باعث هدر رفتن مواد شیمیایی و همچنین بروز مشکلات محیط-زیستی می‌شود. علت اصلی عدم وجود سیستم بازیابی مناسب در فرآیند سودا میزان سیلیس زیاد موجود در مایع پخت سیاه این فرآیند می‌باشد [۱۴]. در واقع میزان قلیائیت زیاد مورد استفاده در فرآیند سودا موجب انحلال گسترده سیلیس ماده اولیه می‌شود. این سیلیس حل شده مشکلاتی را در تبخیرکننده‌ها، بویلرهای بازیابی و در واحد سودسازی ایجاد می‌نماید [۱۴].

فرآیند کربنات که از کربنات سدیم به عنوان ماده شیمیایی پخت استفاده می‌نماید، دارای سیستم و گردش کار فرآیندی ساده‌تری نسبت به فرآیند سودا می‌باشد، از پروفیل قلیایی ملایم‌تر نسبت به فرآیند سودا برخوردار است و لذا می‌توان انتظار داشت که میزان سیلیس کمتری در مایع پخت سیاه آن وجود داشته باشد. یکی از مهم‌ترین تفاوت‌های فرآیند کربنات در مقایسه با فرآیند سودا حذف کوره آهک و واحد سودسازی در آن می‌باشد. تولید کربنات سدیم در چرخه بازیابی و تولید کربنات فقط مستلزم سوزاندن مستقیم مایع پخت سیاه فرآیند کربنات می‌باشد و ماده خروجی از سیستم بعد از کوره بازیابی به صورت مستقیم کربنات سدیم است، درحالی‌که در فرآیند سودا تولید مجدد ماده‌ی شیمیایی پخت (هیدروکسید سدیم) به سیستم پیچیده‌تری نیاز دارد و نیازمند عملیات سودسازی است که هم هزینه و هم بار محیط‌زیستی بیشتری را به صنعت تحمیل می‌نماید. حذف واحد سودسازی و کوره آهک مزایای فراوان اقتصادی برای کارخانه‌ی خمیر کاغذ استفاده‌کننده از فقط کربنات سدیم ایجاد می‌کند و همچنین با حذف کوره آهک سازی از تولید دی‌اکسید کربن به عنوان یکی از عوامل اصلی گازهای گلخانه‌ای جلوگیری می‌شود؛ بنابراین فرآیند کربنات سدیم (سودا اش) سیستم بازیابی ساده‌تر با آلودگی محیط‌زیستی کمتری ایجاد می‌کند.

البته بدیهی است که تولید کاغذهای چاپ و تحریر و خمیر کاغذهای قابل رنگ‌بری با استراتژی حذف لیگنین از خمیر کاغذ فرآیند کربنات، به دلیل میزان لیگنین بیشتر دشوارتر و در مواردی متناسب با نوع ماده اولیه غیراقتصادی است؛ اما در مقابل انتظار می‌رود فرآیند کربنات برای تولید خمیر کاغذهای تقویتی رنگ‌بری نشده

یکی از راه‌های مهم اقتصادی و محیط‌زیستی غلبه بر مشکل مذکور، استفاده از الیاف بکر به عنوان تقویت‌کننده در ترکیب خمیر کاغذهای بسته‌بندی بازیافتی در کارخانه‌های کاغذ بسته‌بندی است [۴]. بدیهی است که این الیاف بکر باید بر مبنای ماده اولیه و فرآیندی تولید گردند که هم اقتصادی و هم سازگار با محیط‌زیست باشند در عین اینکه بتوانند حداقل ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی یک خمیر کاغذ تقویتی را دارا باشند. از نقطه نظر ماده اولیه، چوب از دیر باز به عنوان مهم‌ترین منبع تولید الیاف بکر در صنعت کاغذسازی مطرح بوده است؛ اما در حال حاضر قیمت بالای چوب و ملاحظاتی که در اکثر کشورهای دنیا در جهت حفظ جنگل‌ها و مقابله با جنگل‌زدایی وجود دارد، موجب محدود شدن مصرف چوب در صنایع کاغذسازی شده است [۹]. از سوی دیگر، بسیاری از کشورهای جهان از کمبود منابع جنگلی و چوبی رنج می‌برند. لذا تمرکز بر روی سایر منابع لیگنوسلولزی غیرچوبی به ویژه در تولید خمیر کاغذهای تقویتی می‌تواند به عنوان یک راهکار پایدار در نظر گرفته شود. در میان منابع لیگنوسلولزی غیرچوبی، پسماندهای لیگنوسلولزی کشاورزی به دلیل فراوانی و ارزانی و پراکنش مناسب در مقیاس جهانی از موقعیت ممتازی برای استفاده به عنوان ماده اولیه صنعت کاغذسازی برخوردار می‌باشند. کاه گندم یکی از فراوان‌ترین پسماندهای لیگنوسلولزی کشاورزی و منابع تجدیدپذیر در جهان از نظر کمی می‌باشد که دسترسی به آن آسان و نسبت ارزان است [۱۰ و ۱۱]. بر طبق آخرین گزارش FAO میزان تولید جهانی گندم در سال ۲۰۲۱، برابر با ۷۷۰/۸۷۷/۰۷۲ میلیون تن [۱۲] و بر طبق گزارش وزارت جهاد کشاورزی میزان تولید گندم در ایران سالانه حدود ۱۴ میلیون تن می‌باشد. به طور متوسط، هر ۱ کیلوگرم دانه گندم ۱/۳ کیلوگرم کاه گندم تولید می‌کند که نشان می‌دهد هر ساله مقدار قابل توجه‌ای کاه گندم بدون تأثیر بر میزان تولید و قیمت غذا تولید می‌شود [۱۳].

فرآیند سودا مهم‌ترین فرآیند تولید خمیر کاغذ از پسماندهای لیگنوسلولزی کشاورزی می‌باشد که از هیدروکسید سدیم به عنوان ماده شیمیایی پخت استفاده می‌نماید. فرآیند سودا روش ساده‌ای است که اصول آن به خوبی درک شده است؛ اما فرآیند سودا از معایبی نیز رنج می‌برد. یکی از مهم‌ترین چالش‌های تولید خمیر کاغذ با

کربنات سدیم ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) از شرکت نوترون با خلوص ۹۹/۵-۱۰۰ درصد و وزن مولکولی ۱۰۵،۹۹ گرم بر مول تهیه و استفاده شد. آنتراکینون از شرکت مرک و سایر مواد شیمیایی مورد نیاز از قبیل استون، اسیدسولفوریک، اسید استیک، کلریت سدیم، هیدروکسید پتاسیم، تیوسولفات سدیم، پرمنگنات پتاسیم و یدید پتاسیم از منابع معتبر تهیه شدند.

### تجزیه و تحلیل ترکیبات شیمیایی

تهیه آرد گندم و تعیین درصد رطوبت طبق شیوهنامه استاندارد T257cm-02 و T264om-88، اندازه‌گیری هولوسولوز، آلفا سلولز و لیگنین کلزون به ترتیب با استانداردهای T203os-61، T429cm-84 و T222om-98 و نیز تعیین میزان مواد استخراجی محلول در حلال آلی و اندازه‌گیری خاکستر بر اساس دستورالعمل‌های T280pm-99 و T211om-93 آیین‌نامه (TAPPI) انجام پذیرفتند.

### فرآیند تولید خمیر کاغذ

عوامل متغیر پخت کربنات سدیم شامل قلیائیت در سطوح ۲۰، ۲۲، ۲۴ و ۲۶ درصد، عدم افزودن یا افزودن آنتراکینون به میزان ۰/۱ درصد، دما در دو سطح ۱۵۰ و ۱۷۰ درجه سانتی‌گراد، نسبت مایع پخت به کاه‌گندم (L/S) با نسبت‌های ۴ به ۱، ۶ به ۱، ۸ به ۱ و ۱۰ به ۱ و زمان‌های پخت در سه سطح ۰،۲، ۳ و ۵ ساعت بودند. به دلیل نفوذ بهتر مایع پخت، کاه گندم قبل از پر کردن سیلندر دایجستر به مایع پخت آغشته شد. از دایجستر آزمایشگاهی دورانی با ظرفیت محفظه ۳/۷ لیتر و مایع گرم کننده گلیسرین استفاده شد.

### اندازه‌گیری ویژگی‌های خمیر کاغذ

به‌منظور تعیین میزان وزده و بازده بعد از غربال (قابل قبول) و بازده کل، ابتدا خمیر کاغذهای حاصله روی الک ۲۰ مش و الک ۲۰۰ مش به‌صورت دستی شستشو شدند. بازده بعد از غربال (قابل قبول) بر حسب الیاف عبوری از مش ۲۰ و باقی‌مانده بر روی مش ۲۰۰، میزان وزده بر حسب الیاف باقی‌مانده بر روی مش ۲۰ و مجموع آن‌ها به‌عنوان بازده کل کنترل گردید و بر طبق روابط زیر محاسبه شدند. اندازه‌گیری عدد کاپا مطابق با استاندارد شماره T236om-99 آیین‌نامه TAPPI انجام گرفت.

و یا رنگ‌بری شده با استراتژی حفظ لیگنین برای استفاده در تولید کاغذهای بسته‌بندی برتری‌های اقتصادی و محیط‌زیستی نسبت به فرآیند سودا داشته باشد.

در خصوص فرآیند کربنات تحقیقات گسترده‌ای هنوز به انجام نرسیده است و فقط می‌توان به پژوهش‌های انگشت‌شماری اشاره کرد که عموماً با تلفیق کربنات سدیم و هیدروکسید سدیم به‌عنوان عوامل پخت صورت گرفته‌اند. Shivhare و همکاران (۲۰۱۳)، فرآیندهای خمیر کاغذ سازی و رنگ‌بری که می‌توان در آن‌ها از کربنات سدیم استفاده نمود را مورد بررسی قرار دادند پارامترهای متغیر در فرآیند دما، میزان قلیائیت و نسبت کربنات سدیم به سدیم هیدروکسید بودند [۱۵]. Puitel و همکاران (۲۰۱۵) مناسب بودن کاه گندم و جو دو سر به‌عنوان مواد اولیه برای تولید خمیر کاغذ با استفاده از هیدروکسید سدیم و کربنات سدیم را مورد بررسی قرار دادند [۱۶]. همچنین Marin و همکاران (۲۰۱۶) میزان واکنش‌های تولید خمیر کاغذ از کاه گندم با استفاده از مخلوط هیدروکسید سدیم و کربنات سدیم را مدل‌سازی و بررسی کردند [۴]. پارامترهای متغیر در مطالعه فرآیندی آن‌ها دما، میزان قلیائیت و نسبت وزن مولکولی کربنات سدیم به هیدروکسید سدیم بودند.

هدف این تحقیق بررسی تولید خمیر کاغذ شیمیایی رنگ‌بری نشده با استفاده از کربنات سدیم به‌عنوان تنها عامل پخت از کاه گندم و تأثیر آنتراکینون به‌عنوان افزودنی به فرآیند پخت و همچنین بررسی ویژگی‌های کاغذ تولید شده از فرآیند کربنات می‌باشد.

### مواد و روش‌ها

#### تهیه و آماده‌سازی مواد اولیه

کاه گندم از مزارع کشاورزی شهر کرج تهیه، توسط دستگاه برش به قطعاتی با طول پنج تا هفت سانتی‌متر تبدیل و جهت رسیدن به رطوبت تعادل، در محیط آزمایشگاه قرار داده شد. نمونه‌ها بعد از رسیدن به رطوبت تعادل، به دلیل جلوگیری از تبادل رطوبتی و تغییر میزان رطوبت، در کیسه‌های پلی‌اتیلنی بسته‌بندی شدند. سپس میزان رطوبت نمونه‌های تمامی کیسه‌ها اندازه‌گیری شد و در طول آزمایش‌ها، بعد از هر بار برداشت نمونه، به‌منظور ثابت ماندن شرایط رطوبتی، درب کیسه بسته می‌شد.

$$(۱) \quad \text{وزن کاملاً خشک خمیر کاغذ پس از الک} = \frac{\text{وزن کاملاً خشک کاه گندم}}{\text{میزان بازده بعد از غربال}} \times 100$$

$$(۲) \quad \text{وزن کاملاً خشک وازده پس از الک} = \frac{\text{وزن کاملاً خشک کاه گندم}}{\text{میزان وازده الک}} \times 100$$

$$(۳) \quad \text{بازده بعد از غربال} + \text{میزان وازده بعد از غربال} = \text{بازده کل خمیر کاغذ}$$

استانداردهای T414om-96 و T403om-91، T494om-06 صورت گرفتند.

### پالایش خمیر کاغذ و ساخت کاغذ دست‌ساز

پالایش خمیر کاغذهای کربنات سدیم بهینه طبق استاندارد T248om-88 آیین‌نامه TAPPI توسط دستگاه پالایشگر آزمایشگاهی PFI Mill با دور ۱۰۰۰ به منظور کاهش درجه روانی خمیر کاغذ به کمک پالایش از CSF ۵۰۰ mL به درجه روانی هدف CSF ۳۰۰ ± ۵۰ mL انجام پذیرفت. از خمیر کاغذهای پالایش نشده و پالایش شده، کاغذهای دست‌ساز ۶۰ و ۱۲۰ گرم بر مترمربع بر طبق استاندارد T205 sp-12 ساخته شدند و سپس در دمای ۲۳ درجه‌ی سانتی‌گراد و رطوبت نسبی ۵۰ درصد به مدت ۲۴ ساعت بر اساس دستورالعمل شماره T402om-88 آیین‌نامه TAPPI مشروط سازی شدند.

### تجزیه و تحلیل آماری

نرم‌افزار آماری SPSS و روش تجزیه واریانس یک‌طرفه (ANOVA) در این تحقیق برای تجزیه تحلیل داده‌ها به کار گرفته شدند. جهت مقایسه میانگین‌ها از آزمون چند دامنه‌ای دانکن (DMRT) استفاده شد.

### نتایج و بحث

#### تجزیه و تحلیل ترکیبات شیمیایی

بررسی ترکیبات شیمیایی کاه گندم نشان می‌دهد که این پسماند لیگنوسلولزی به‌عنوان ماده اولیه صنایع کاغذ-سازی از پتانسیل بالایی برخوردار می‌باشد. جدول ۱ به مقایسه میزان ترکیبات شیمیایی کاه گندم مورد استفاده در تحقیق حاضر با سایر مطالعات پرداخته است. میزان سلولز و همی‌سلولزها، لیگنین، مواد استخراجی و خاکستر به‌طور میانگین مشابه مطالعات صورت گرفته است.

### اندازه‌گیری ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی کاغذهای ساخته‌شده

اندازه‌گیری ویژگی‌های مکانیکی شامل شاخص‌های کشش، ترکیدن و پارگی به ترتیب و بر اساس

جدول ۱- ترکیبات شیمیایی کاه گندم

منبع	مواد استخراجی (%)	خاکستر (%)	لیگنین (%)	همی-سلولزها (%)	سلولز (%)
تحقیق حاضر	۹	۷/۴	۲۱	۳۲/۳۴	۴۴/۶۶
[۱۶]	۵/۵	۵/۳	۱۷/۵	۳۱/۳	۴۳/۱
[۱۷]	۵/۲	۷/۷	۱۷/۷	۳۰/۶	۳۹/۷
[۱۸]	۱۲/۲	۷/۱	۱۶/۴	۲۸/۱	۳۶/۶

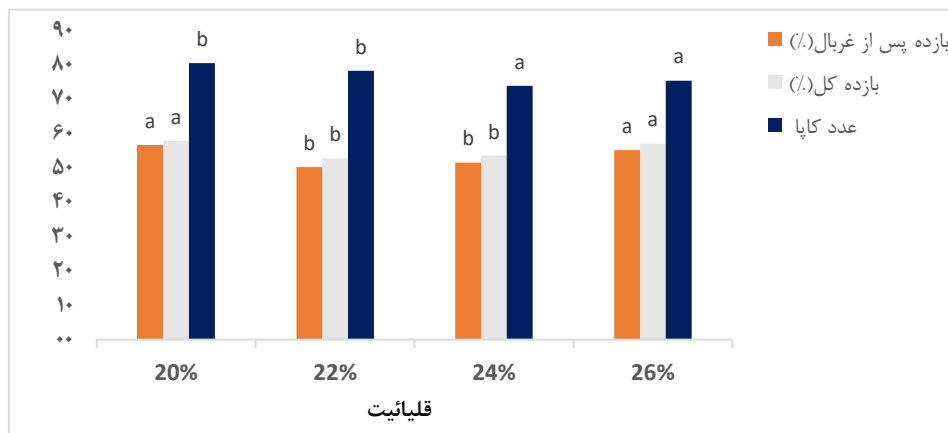
### پخت کربنات سدیم کاه گندم

شکل‌های ۱ تا ۶ نتایج به دست آمده از پخت‌های مختلف کاه گندم با کربنات سدیم با در نظر گرفتن عوامل متغیر پخت را نشان می‌دهند. در شکل ۱، مقایسه‌ای بین بازده پس از غربال، بازده کل و عدد کاپای پخته‌ای با قلیائیت متغیر و شرایط ثابت شامل دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد، ۰/۱ درصد آنتراکینون، زمان ۳ ساعت و نسبت مایع پخت به کاه ۸ به ۱ صورت گرفته است. آن چنان که مشخص است افزایش میزان قلیائیت تا ۲۴ درصد باعث انحلال بیشتر لیگنین شده است در حالی که پس از این مقدار اندک افزایشی در عدد کاپا مشاهده می‌شود با توجه به تجزیه و تحلیل آماری و گروه‌بندی دانکن صورت گرفته پخت‌های انجام شده در قلیائیت‌های ۲۰ و ۲۲ درصد و در قلیائیت‌های ۲۴ و ۲۶ درصد از نظر عدد کاپا در یک گروه قرار می‌گیرند. از نظر بازده بعد از غربال و بازده کل نیز بین پخت‌ها تفاوت معنی‌دار وجود داشته و پخت‌های در قلیائیت‌های ۲۰ و ۲۶ درصد و در قلیائیت‌های ۲۲ و ۲۴ درصد در یک گروه قرار می‌گیرند.

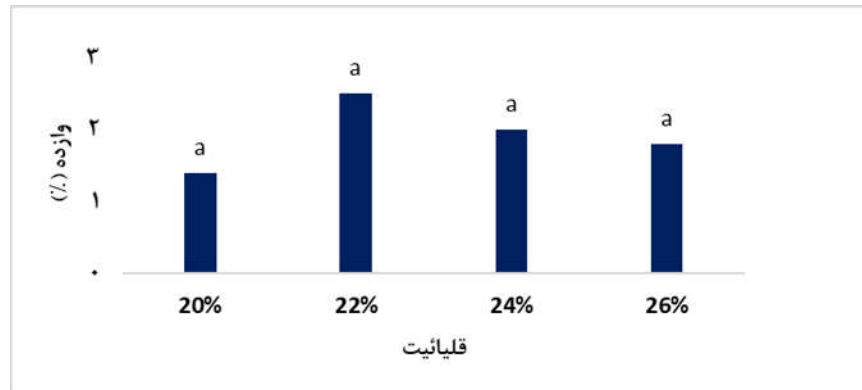
نتایج به دست آمده در این تحقیق تقریباً در محدوده مقادیر به دست آمده برای بازده و اعداد کاپا در تحقیقات دیگر محققین قرار می‌گیرد به‌صورتی که Marin و همکاران (۲۰۱۶) در تحقیق خود با دما، میزان قلیائیت و نسبت وزن مولکولی کربنات سدیم به هیدروکسید سدیم متغیر، میزان بازده خمیر کاغذهای تولیدی را از ۴۱/۸۴ تا ۶۰ درصد و میزان اعداد کاپا را از ۳۵ تا ۷۰/۴ گزارش کردند [۴]. در تحقیق آن‌ها حضور کربنات سدیم به‌عنوان پتانسیل احتمالی برای دستیابی به بازده زیاد از کاه گندم

مشخص گردید، در حالی که هیدروکسید سدیم بیشتر نقش لیگنین زدایی را داشت.

در تحقیق Puitel و همکاران (۲۰۱۵) با افزایش قلیائیت در فرآیند سودا از ۱۶٪ به ۲۰٪ میزان بازده خمیر کاغذ، عدد کاپا و درجه روانی کاهش داشتند اما با افزودن کربنات سدیم به پخت و در فرآیند ترکیبی، عدد کاپا افزایش داشته است، همچنین در فرآیند سودا با استفاده از کاه گندم، با افزایش قلیائیت، بازده کاهش قابل‌توجه به میزان ۳/۳٪ داشت و میزان کاهش بازده در فرآیند ترکیبی به میزان ۱/۸٪ و کمتر از فرآیند سودا بود [۱۶]. این محققین عنوان کردند که عدد کاپا با افزایش قلیائیت کاهش داشته است که میزان این کاهش در فرآیند سودا رسیدن عدد کاپا از ۱۴/۹ به ۱۱/۵ و برای فرآیند کربنات سدیم رسیدن آن از ۴۷ به ۳۶ بوده است که نشان دهنده کارایی کمتر کربنات سدیم نسبت به هیدروکسید سدیم در لیگنین زدایی می‌باشد. همچنین آنان بیان داشتند که بازده فرآیند سودا در محدوده از ۳۵ تا ۴۵ درصد و در پخت ترکیبی به ۵۰٪ می‌رسد. مطالعه‌ی Shivhare و همکاران (۲۰۱۳) نیز نشان داد با افزایش نسبت کربنات سدیم به هیدروکسید سدیم میزان عدد کاپا و بازده افزایش پیدا کرده و همچنین دمای بیشتر پخت موجب پالایش آسان‌تر خمیر کاغذ می‌شود [۱۵]. در شکل ۲ به مقایسه میزان وازده پخت‌های بیان شده در شکل ۱ پرداخته شده است. بر طبق نتایج به دست آمده مشخص گردید که میزان وازده همه پخت‌ها در حد قابل قبول قرار داشته و همچنین تغییر قلیائیت تأثیر معنی‌داری را بر روی میزان وازده نداشته و همه آن‌ها در یک گروه قرار می‌گیرند.



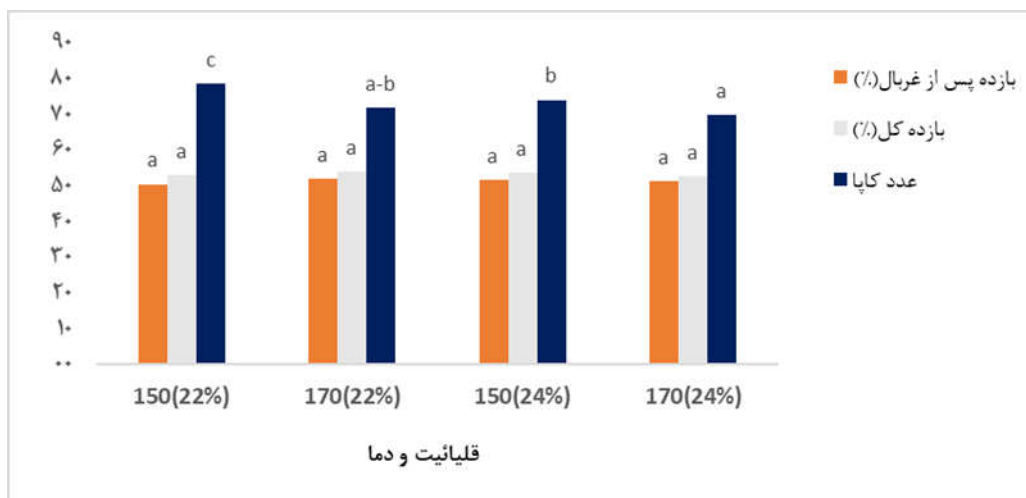
شکل ۱- مقایسه بازده پس از غربال، بازده کل و عدد کاپا در قلیائیت‌های متفاوت در پخت کربنات سدیم کاه گندم



شکل ۲- مقایسه میزان بازده در قلیائیت‌های متفاوت در پخت کربنات سدیم کاه گندم

روی بازده کل و میزان بازده پس از غربال نداشته است و فقط اعداد کاپا را دچار تغییر کرده است. Marin و همکاران (۲۰۱۶) در تحقیقی بر روی خمیر کاغذ سازی کاه گندم با ترکیب هیدروکسید سدیم - کربنات سدیم عوامل متغیر را شامل دمای پخت ۱۵۰، ۱۶۰ و ۱۷۰ درجه سانتی‌گراد، قلیائیت ۱۶، ۱۸ و ۲۰ درصد و همچنین نسبت  $\text{NaOH}/\text{Na}_2\text{CO}_3$ ، در نظر گرفتند [۵]. نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد که دمای متوسط تا پایین، میزان قلیائیت کم و نسبت کربنات سدیم به هیدروکسید سدیم بالا میزان بازده را بهبود می‌بخشد و منجر به تولید خمیر کاغذهای با مقاومت بیشتری شود.

شکل ۳ مقایسه‌ی بین بازده پس از غربال، بازده کل و عدد کاپا در پخت‌های انجام شده در شرایط یکسان زمان ۳ ساعت، آنتراکینون ۰/۱ درصد و نسبت مایع پخت به کاه ۱/۸ که دارای قلیائیت‌های متفاوت ۲۲ و ۲۴ درصد و دمای متغیر ۱۵۰ و ۱۷۰ درجه سانتی‌گراد بوده‌اند را نشان می‌دهد. بر طبق نتایج دما تأثیر معنی‌داری بر روی میزان بازده بعد از غربال و بازده کل ندارد اما در مورد عدد کاپا این چنین نیست و کاپا در سه سطح متفاوت قرار گرفته است. همچنین کمترین میزان عدد کاپا در بیشترین میزان دما و قلیائیت به دست آمده است؛ به عبارت دیگر تغییر دما از ۱۵۰ به ۱۷۰ درجه سانتی‌گراد تأثیری را بر



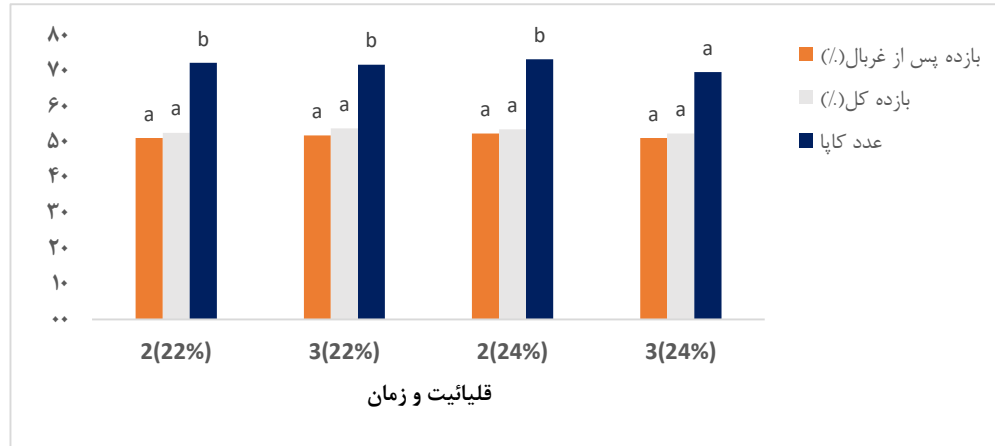
شکل ۳- مقایسه بازده پس از غربال، بازده کل و کاپا در دما (درجه سانتی‌گراد) و قلیائیت‌های مختلف در پخت کربنات سدیم کاه گندم

آنتراکینون ۰/۱ درصد و نسبت مایع پخت به کاه ۱/۸ در شرایط قلیائیت ۲۲ و ۲۴ درصد و زمان‌های ۲ و ۳ ساعت

در شکل ۴ بازده پس از غربال، بازده کل و عدد کاپا پخت‌ها در شرایط یکسان دمای ۱۷۰ درجه سانتی‌گراد،

مقایسه شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، متغیر زمان در میزان بازده کل و بازده پس از غربال تأثیرگذار و معنی‌دار نبوده است و تغییر قلیائیت و زمان تأثیر محسوس بر روی دو ویژگی نداشته است. در مقابل تأثیر

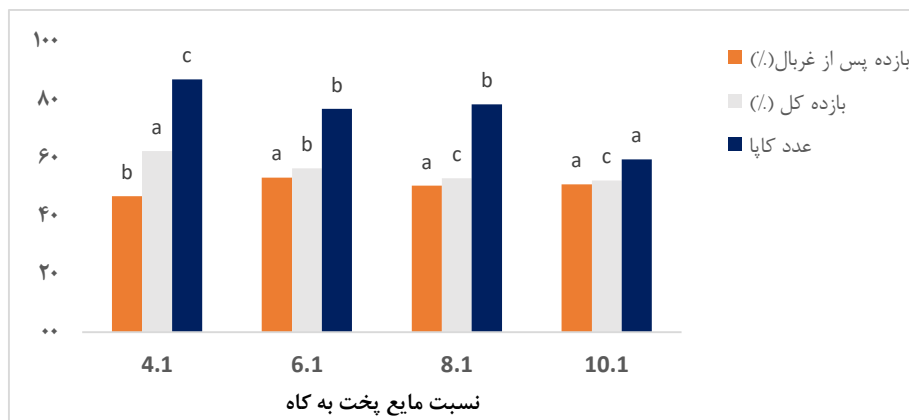
شاخص زمان بر عدد کاپا معنی‌دار بوده است که البته در دو گروه طبقه‌بندی شده و فقط عدد کاپای پخت انجام شده در قلیائیت ۲۴ درصد و زمان ۳ ساعت در یک گروه جداگانه نسبت به سایر پخت‌ها قرار می‌گیرد.



شکل ۴- مقایسه بازده پس از غربال، بازده کل و عدد کاپا در زمان‌ها و قلیائیت‌های مختلف در پخت کربنات سدیم کاه گندم

با نسبت مایع پخت به کاه ۶/۱ و ۸/۱ تفاوت بسیار اندکی مشاهده می‌شود و لذا بیشترین تغییرات در نسبت‌های مایع پخت به کاه ۴/۱ و ۱۰/۱ اتفاق می‌افتد. نسبت مایع پخت بیشتر باعث نفوذ بهتر عوامل فعال پخت به درون الیاف می‌شود در نتیجه مواد شیمیایی عملکرد بهتری داشته و انحلال لیگنین را تسهیل می‌نمایند که این امر باعث بهتر جدا شدن الیاف از یکدیگر شده و در نتیجه میزان بازده پس از غربال افزایش و بازده کل کاهش داشته است. همچنین کمترین عدد کاپا در بیشترین میزان نسبت مایع پخت به کاه به دست آمده است.

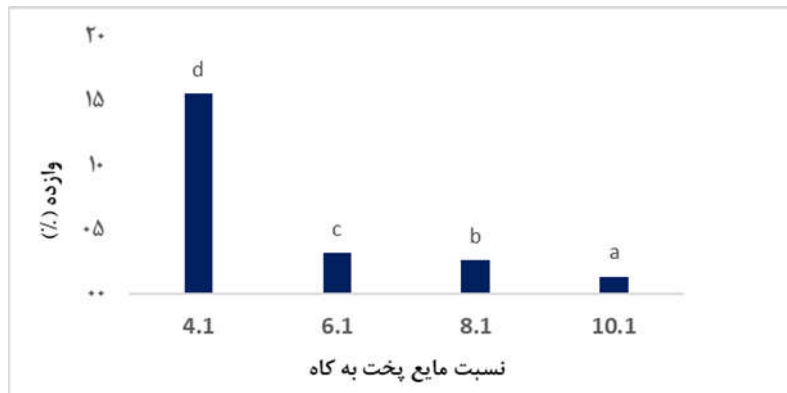
در شکل ۵ به مقایسه بین بازده پس از غربال، بازده کل و عدد کاپای پخت‌های انجام شده در نسبت‌های مختلف مایع پخت به کاه ۴/۱، ۶/۱، ۸/۱ و ۱۰/۱ با ثابت بودن سایر شرایط شامل قلیائیت ۲۲ درصد، دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد، زمان ۳ ساعت و آنتراکینون به میزان ۰/۱ درصد پرداخته شده است. نسبت مایع پخت به کاه تأثیر معنی‌دار بر روی سه متغیر میزان بازده کل، میزان بازده پس از غربال و عدد کاپا داشته و میزان بازده کل و عدد کاپا در سه گروه و بازده پس از غربال در دو گروه مجزا قرار گرفته‌اند. بین ویژگی‌های خمیر کاغذ تولید شده



شکل ۵- مقایسه بازده پس از غربال، بازده کل و عدد کاپا در نسبت‌های مختلف مایع پخت به کاه در پخت کربنات سدیم کاه گندم

نفوذ زیاد مایع پخت به درون الیاف کاه گندم می‌باشد. با توجه به نتایج شکل ۵ و ۶، استفاده از نسبت مایع پخت به کاه ۴/۱ در مورد فرآیند کربنات سدیم کاه گندم به دلیل عدد کاپا و میزان واژه زیاد و بازده پس از غربال کم توصیه نمی‌شود اما نسبت مایع پخت به کاه ۶/۱ و بالاتر برای این فرآیند مناسب می‌باشد.

در شکل ۶ به مقایسه میزان واژه پخت‌های صورت گرفته با شرایط شکل ۵ پرداخته شده است. نسبت مایع پخت به کاه بر کاهش میزان واژه تأثیر معنی‌دار داشته است و طبق آزمون دانکن این میزان در چهار گروه متفاوت قرار گرفته و کمترین میزان واژه در بیشترین نسبت مایع پخت به کاه اتفاق افتاده است که در نتیجه



شکل ۶ - مقایسه میزان واژه در نسبت‌های مختلف مایع پخت به کاه در پخت کربنات سدیم کاه گندم

لیگنین به ترتیب ۷۳، ۱۶/۳ و ۲/۸ درصد گزارش شده است [۱۷]. در مقایسه با خمیر کاغذ سودا، میزان لیگنین باقی‌مانده در خمیر کاغذ کربنات تقریباً دو برابر می‌باشد که با توجه به مطالبی که پیش‌تر ذکر گردید به قابلیت ضعیف‌تر کربنات سدیم در مقایسه با هیدروکسید سدیم از نظر لیگنین زدایی مربوط می‌گردد. از این رو رنگ‌بری خمیر کاغذ کربنات سدیم به مراحل و هزینه بیشتری نیازمند است و بنابراین استفاده از آن به‌عنوان خمیر رنگ‌بری نشده توصیه می‌گردد. همچنین در صورت نیاز به رنگ‌بری این خمیر کاغذ، استراتژی رنگ‌بری با حفظ لیگنین آن چنان که در مورد خمیر کاغذهای مکانیکی و شیمیائی- مکانیکی متداول است، پیشنهاد می‌شود. انحلال همی سلولزها و سلولز نیز در فرآیند کربنات سدیم بیشتر است و این نشان می‌دهد که مایع پخت سیاه باقی‌مانده این فرآیند از نظر ترکیبات حل‌شده جهت فرآوری‌های بعدی برای تولید فرآورده‌های جانبی دیگر غنی می‌باشد امکان ایجاد پالایشگاه زیستی بر مبنای این فرآیند را تسهیل نماید.

بر طبق داده‌های به دست آمده و پس از بررسی نتایج، پخت کاه گندم با فرآیند کربنات سدیم با شرایط میزان آنتراکینون ۰/۱ درصد، دمای ۱۷۰ درجه سانتی‌گراد، زمان دو ساعت و نسبت مایع پخت به کاه ۸/۱ به‌عنوان پخت بهینه انتخاب گردید که درصد بازده پس از غربال، درصد بازده کل، درصد واژه و عدد کاپا آن به ترتیب ۵۱/۱۸، ۵۲/۶۳ و ۱/۴۵ و ۷۲/۳۷ بوده است.

### اندازه‌گیری ترکیبات شیمیایی خمیر کاغذ کربنات کاه گندم

جدول ۲ ترکیبات شیمیایی خمیر کاغذ کربنات را نشان می‌دهد. با توجه به ترکیب شیمیایی کاه گندم (جدول ۱) نتایج نشان دادند که حدود ۷۰ درصد لیگنین در نتیجه فرآیند پخت وارد مایع پخت شده است که از نظر انحلال لیگنین این فرآیند قابل قبول می‌باشد. سلولز و همی سلولزها به ترتیب به میزان ۳۳ درصد و ۵۹ درصد، در مایع پخت انحلال داشته‌اند. میزان ترکیبات شیمیایی در خمیر سودا کاه گندم برای آلفا سلولز، همی سلولزها و

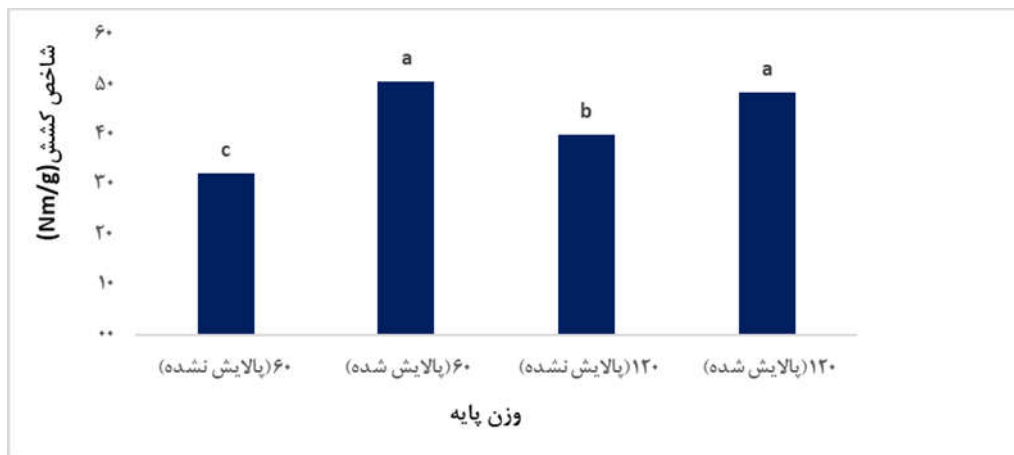
جدول ۲ - ترکیبات شیمیایی خمیر کاغذ کربنات کاه گندم

سلولز (%)	همی سلولزها (%)	لیگنین (%)	خاکستر (%)
۳۰	۱۳	۶/۲۰	۲/۰۸

## اندازه‌گیری ویژگی‌های مکانیکی

درجه روانی خمیر کاغذ کربنات سدیم بهینه قبل از پالایش CSF mL ۵۰۰ بود که پس از پالایش با ( PFI Mill) با دور ۱۰۰۰ به CSF mL ۳۵۰ رسید. از خمیر کاغذهای پالایش نشده و پالایش شده کاغذهای دست ساز ۶۰ و ۱۲۰ گرمی ساخته و ویژگی‌های مکانیکی شامل شاخص‌های کشش، ترکیدن و پارگی اندازه‌گیری شدند. در شکل ۷ به مقایسه میانگین شاخص کشش در ۴ کاغذ متفاوت پرداخته شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، به‌طور کلی خمیر کاغذهای کربنات پالایش شده نسبت به خمیر کاغذهای بدون پالایش مقاومت‌های بالاتری از خود نشان داده‌اند. با توجه به این‌که مهم‌ترین عامل مؤثر بر شاخص کشش، اتصالات بین الیاف و مقاومت آن‌ها در نتیجه پالایش است در گراماژ یکسان، مقاومت بیشتر در کاغذهای پالایش شده قابل توجیه است. در واقع پالایش خمیر کاغذ با افزایش فیبرپله شدن سطح الیاف

موجب افزایش سطح تماس و اتصال میان الیاف سلولزی می‌شود، که این روند منجر به افزایش پیوندهای هیدروژنی و اتصال بهتر الیاف در سطح کاغذ و در نتیجه افزایش شاخص‌های مقاومتی می‌گردد [۱۶]. Marin و همکاران (۲۰۱۶) عنوان کردند شاخص کشش کاغذهای ساخته‌شده تحت تأثیر دما و میزان غلظت قلیای مصرفی بودند، به این صورت که در گراماژ یکسان، قلیائیت ۱۶٪ و نسبت کمتر کربنات سدیم به سدیم هیدروکسید باعث بیشتر شدن شاخص کشش شد، همچنین افزایش دما موجب افزایش مقاومت شده بود اما در نهایت بهترین مقاومت‌های مربوط به کشش در شرایط دما ۱۶۵ درجه سانتی‌گراد و شارژ قلیایی متوسط به دست آمده بودند [۴]. در رابطه با تغییر گراماژ، تغییر مقاومت‌ها از الگوی مشخصی پیروی نکرده است اما در گراماژ بیشتر با افزایش گراماژ، شاخص مقاومت به کشش نیز افزایش داشته است.



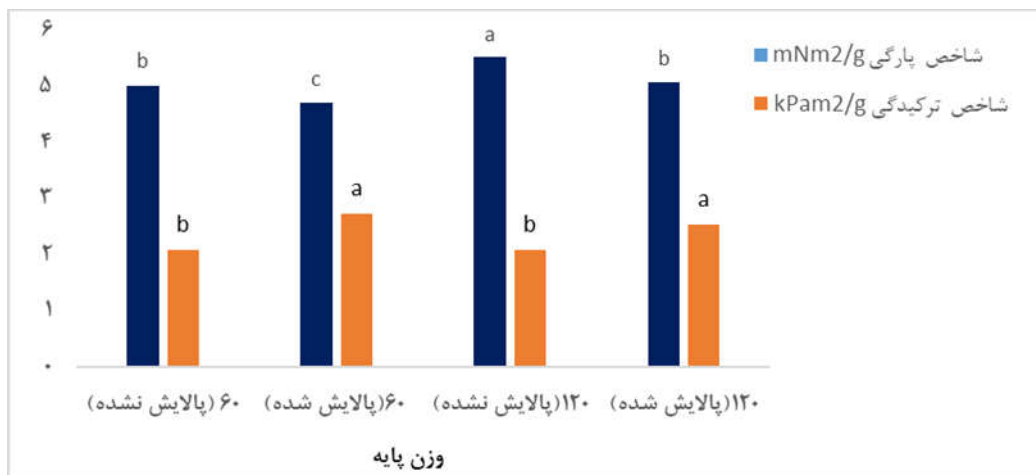
شکل ۷ - شاخص کشش کاغذهای حاصل از خمیر کاغذ بهینه کربنات سدیم کاه گندم

کاغذهای پالایش شده مقاومت‌های بیشتری نسبت به کاغذهای پالایش نشده از خود ارائه داده‌اند. الگوی تغییر میزان شاخص‌های ترکیب‌دهی با شاخص کشش هم‌پوشانی دارد. Puitel و همکاران در سال ۲۰۱۵، مقادیر شاخص کشش و شاخص ترکیب‌دهی را مورد ارزیابی قرارداده و نتایج

همان‌طور که در شکل ۸ مشاهده می‌گردد انجام پالایش بر روی خمیر کاغذها بر روی شاخص ترکیدن تأثیرگذار و معنی‌دار بوده است. بر طبق نتایج حاصل، حداکثر شاخص ترکیدن مربوط به کاغذهای فرآیند کربنات ۶۰ گرمی بوده است. همچنین در شرایط برابر

بین الیاف مربوط است که کاهش آن‌ها، با افزایش قلیائیت در فرآیند سودا در نتیجه حل بیشتر سلولز و همی سلولزها می‌باشد و همچنین افزایش آن، با افزایش قلیائیت در فرآیند کربنات سدیم به دلیل انحلال بیشتر لیگنین و در نتیجه برقراری پیوندهای هیدروژنی بیشتر در کاغذ تولید شده می‌باشد.

آن‌ها نشان داد میزان هر دو شاخص با افزایش قلیائیت در فرآیند سودا کاهش پیدا می‌کند اما با افزایش قلیائیت در فرآیند کربنات سدیم شاخص کشش تا حدودی با افزایش همراه بوده است، همچنین پالایش در تمامی موارد منجر به بهبود خواص مکانیکی کاغذها شده است [۱۶]. شاخص‌های کشش و ترکیبگی تا حدود زیادی به اتصال



شکل ۸ - مقادیر شاخص ترکیبگی و پارگی کاغذهای حاصل از خمیر کاغذ بهینه کربنات سدیم کاه گندم

### نتیجه‌گیری

نتایج این تحقیق نشان داد که فرآیند پخت کاه گندم با کربنات سدیم می‌تواند خمیر کاغذ با بازده و عددکاپای مختلف تولید نماید. میزان لیگنین باقی‌مانده خمیر کاغذ در مقایسه با سایر فرآیندهای شیمیایی تولید خمیر کاغذ از کاه گندم در این فرآیند بیشتر است؛ بنابراین به نظر می‌آید که رنگ‌بری این خمیر کاغذ مستلزم هزینه‌های زیاد و از جنبه تکنولوژیکی با دشواری‌های زیادی همراه باشد. لذا با کاه گندم و استفاده از فرآیند کربنات می‌توان فقط تولید خمیر کاغذ رنگ‌بری نشده را مد نظر داشت. همچنین نتایج نشان می‌دهد که مقاومت‌های مکانیکی شامل شاخص کشش، شاخص پارگی و شاخص ترکیبگی کاغذ-های تولید شده از فرآیند کربنات سدیم قابل قبول بوده است. با توجه به نتایج به دست آمده و سادگی گردش کار فرآیندی در یک کارخانه خمیر کاغذ بر مبنای فرآیند کربنات و همچنین در نظر گرفتن مزایای محیط‌زیستی این فرآیند و التفات به اینکه در خمیر کاغذهای غیر قابل رنگ‌بری مورد استفاده برای کاغذهای بسته‌بندی لیگنین

در شکل ۸ میانگین شاخص‌های پارگی در کاغذهای مختلف نیز مقایسه شده است. با توجه به اینکه مقاومت به پارگی عمدتاً به طول الیاف بستگی دارد در کاغذهای پالایش شده نسبت به کاغذهای بدون پالایش مقادیر شاخص پارگی کمتر می‌باشد. همچنین با در نظر گرفتن این نکته که تعداد و مقاومت پیوندهای بین الیاف نیز در کمیت شاخص پارگی تأثیر دارد، میزان شاخص پارگی کاغذهای ۱۲۰ گرمی از کاغذهای ۶۰ گرمی بیشتر می‌باشد. البته در مطالعه‌ای که بر روی روش خمیرسازی Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>/NaOH انجام شده، خواص مقاومتی کاغذهای تولید شده به شرایط خمیرسازی نیز بستگی داشته‌اند، به نحوی که در گراماژ برابر، بخت‌هایی که با شدت بیشتر (دمای بالا، قلیائیت بالا و نسبت‌های کم کربنات سدیم و زیاد هیدروکسید سدیم) صورت گرفته‌اند، خواص مقاومتی ضعیف‌تری داشته‌اند [۴].

- McKinney. Tehran: Arvich Publication. (In Persian)
- [9] Kissinger, M., Fix, J. and Rees, W.E., 2007. Wood and non-wood pulp production: comparative ecological footprinting on the Canadian prairies. *Ecological Economics*, 62(3-4), pp. 552-558. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2006.07.019>.
- [10] Zhong, L., Wang, H. and Hui, L., 2018. Pulping and papermaking of non-wood fibers. in Kazi, M.D.S.N. (ed.) *Pulp and paper processing*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.79017>.
- [11] Kim, S. and Dale, B.E., 2004. Global potential bioethanol production from wasted crops and crop residues, *Biomass and Bioenergy*, 26(4), pp. 361–375. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2003.08.002>.
- [12] FAOSTAT (2021). *Crops and Livestock Products*. Available at: <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL/> (Accessed: [date]).
- [13] Kim, S. and Dale, B.E., 2003. Cumulative energy and global warming impact from the production of biomass for biobased products. *Journal of Industrial Ecology*, 7(3-4), pp. 147-162. <https://doi.org/10.1162/108819803323059442>.
- [14] Hedjazi, S., Kordsachia, O., Patt, R., Latibari, A.J. and Tschirner, U., 2009. Alkaline sulfite-anthraquinone (AS/AQ) pulping of wheat straw and totally chlorine-free (TCF) bleaching of pulps. *Industrial Crops and Products*, 29(1), pp. 27-36. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2008.03.013>.
- [15] Shivhare Lal, P., Bist, V., Sharma, A. and Swaroop, V., 2013. Utilization of soda ash in pulping and bleaching operation as a substitution or partial replacement of sodium hydroxide. *Journal of Forest Products & Industries*, 2(5), pp. 5-12.
- [16] Puitel, A.C., Marin, N. and Gavrilescu, D., 2015. Lignocellulosic agricultural residues—a virgin fibre supply solution for paper-based packaging. *Cellulose Chemistry and Technology*, 49(7-8), pp. 633-639.
- [17] Espinosa, E., Tarres, Q., Delgado-Aguilar, M., Gonzalez, I., Mutje, P. and Rodriguez, A., 2016. Suitability of wheat straw semichemical pulp for the fabrication of lignocellulosic nanofibres and their application to papermaking slurries. *Cellulose*, 23, pp. 837-852. <https://doi.org/10.1007/s10570-015-0807-8>.
- [18] Tripathi, S.K., Bhardwaj, N.K. and Ghatak, H.K., 2017. Determination of main parameters affecting ozone bleaching of wheat straw pulp using Plackett–Burman design. *Ozone: Science & Engineering*, 40(2), pp. 148-156. <https://doi.org/10.1080/01919512.2017.1352483>.
- باقی‌مانده شاخص اصلی نیست، خمیر کاغذهای تولیدی با این فرآیند از کاه گندم مناسب تولید کاغذهای لاینر و تست لاینر برای مصارف بسته‌بندی می‌باشند. علاوه بر این با مصرف روز افزون کارتن و مقوا برای اهداف بسته‌بندی و تمایل به بازیافت مکرر آن‌ها در صنعت کاغذ، به‌طور طبیعی در هر مرحله بازیافت از مقاومت‌های آن‌ها کاسته می‌شود و لذا ضروری است که جهت حفظ کیفیت و حداقل استانداردها از الیاف بکر برای تقویت خمیر کاغذهای بازیافتی استفاده کرد که الیاف خمیر کاغذ کربنات سدیم می‌تواند در این حالت به‌عنوان بهبود دهنده مقاومت‌های مکانیکی در ترکیب کاغذهای بازیافتی بسته‌بندی استفاده شوند.

## منابع

- [1] Latta, G.S., Plantinga, A.J. and Sloggy, M.R., 2016. The effects of internet use on global demand for paper products. *Journal of Forestry*, 114(4), pp. 433–440. <https://doi.org/10.5849/jof.15-096>.
- [2] Hubbe, M.A., Venditti, R.A. and Rojas, O.J., 2007. What happens to cellulosic fibers during papermaking and recycling? A review. *BioResources*, 2(4), pp. 739-788.
- [3] Chamberlain, D. and Kirwan, M.J., 2012) *Handbook of paper and paperboard packaging technology*. 2nd edn. Wiley-Blackwell. <https://doi.org/10.1002/9781118470930.ch2>.
- [4] Marin, N., Puitel, A.C., Chesca, A. and Gavrilescu, D., 2016. Response surface modeling of wheat straw pulping using sodium carbonate and sodium hydroxide mixtures. *Cellulose Chemistry and Technology*, 51(7-8), pp. 745-753.
- [5] Han, N., Zhang, J., Hoang, M., Gray, S. and Xie, Z., 2021. A review of process and wastewater reuse in the recycled paper industry. *Environmental Technology & Innovation*, 24, 101860. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101860>.
- [6] Nawaz, A., Mohi, B. and Lakhhan, A., 2012. Effect of product packaging in consumer buying decision. *Journal of Business Strategies*, 6(2), pp. 1-10.
- [7] Razmpour, Z., Kermanian, H., Ramezani, O., Mahdavi, S. and Rahmaninia, M., 2012. The effect of NSSC waste paper recycling times on the properties of the produced recycled pulp. *Environmental Sciences*, 9(2), Winter. (In Persian)
- [8] Latibari, A., Khosravani, A. and Rahmaninia, M., 2008) *Technology of paper recycling*. R.W.J.