

## بررسی قابلیت تولید خمیرکاغذ رنگبری شده از نرمه‌های خردکن چوب (مطالعه موردی: شرکت صنایع چوب و کاغذ مازندران)

### چکیده

کمبود منابع سلولزی در کشور، قوانین طرح صیانت جنگل و سخت‌گیری‌های محیط زیستی مرتبط با واردات چوب آلات خام، کارخانه‌های مصرف‌کننده مواد اولیه فیبری را با مشکل تأمین مواد اولیه سلولزی روبه‌رو کرده و این شرکت‌ها تلاش می‌کنند تا از منابع جایگزین با حداکثر بازده استفاده نمایند. در این تحقیق قابلیت تولید خمیرکاغذ رنگبری شده از نرمه‌های خردکن چوب در شرکت صنایع چوب و کاغذ مازندران (ضخامت ۴-۲ میلی‌متر و پهنای کمتر از ۸ میلی‌متر) بررسی می‌شود. بدین منظور نرمه‌های خردکن طی فرایند خمیرسازی سودا-آنتراکینون پخته‌شده و در ادامه با توالی بدون کلر عنصری DOED1P و توالی بدون کلر HEP رنگبری شدند. جهت خمیرسازی از سه متغیر فرایندی شامل: قلیایی فعال (در چهار سطح: ۱۴، ۱۶، ۱۸ و ۲۰ درصد)، زمان پخت در درجه حرارت بیشینه (در سه سطح: ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ دقیقه) و نسبت مایع پخت به وزن خشک چوب (دو سطح: ۵ و ۶ به ۱) در درجه حرارت بیشینه ثابت ۱۶۵ درجه سانتی‌گراد و مقدار مصرف ثابت ۰/۲ درصد آنتراکینون استفاده شد. متغیرهای فرایند خمیرسازی بر روی بازده، عدد کاپا و گرانروی خمیرکاغذها با استفاده از طرح آزمایش فاکتوریل در قالب بلوک‌های کامل تصادفی تجزیه و تحلیل شدند. همچنین درصد لیگنین، بازده، گرانروی، درجه پلیمریزاسیون و وزن مولکولی نمونه خمیرکاغذها، در هر یک از توالی‌های رنگبری مذکور مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان داد با تشدید شرایط پخت، عدد کاپا، بازده و گرانروی کاهش می‌یابد و افزایش قلیایی فعال نسبت به دو متغیر دیگر، تأثیر بیشتری بر شدت افت نتایج داشته است (مؤثرترین عامل به ترتیب درصد قلیا، زمان پخت و نسبت مایع پخت به وزن خشک چوب می‌باشد). بهینه‌ترین شرایط پخت (بازده: ۴۹/۵٪؛ عدد کاپا: ۴۹/۴۵ و گرانروی: ۱۰۹۶ ml/g) در قلیایی فعال ۲۰ درصد، زمان پخت ۱۲۰ دقیقه و نسبت مایع پخت به وزن خشک چوب ۶ به ۱ به دست آمده است. توالی رنگبری DOED1P در عدد کاپا مشابه، بازده بیشتری نسبت به توالی HEP داشته که نشان از گزینش پذیری بیشتر ماده رنگ‌بر دی‌اکسید کلر نسبت به هیپوکلریت سدیم می‌باشد. همچنین طی توالی‌های رنگ‌بری، بیشترین میزان افت عدد کاپا، گرانروی، بازده و درجه پلیمریزاسیون و وزن مولکولی مربوط به فاز ابتدای توالی (D0 و H) بوده که این به دلیل دسترسی آسان‌تر به لیگنین و گزینش پذیری کمتر هیپوکلریت سدیم و تخریب کربوهیدرات‌ها می‌باشد.

واژگان کلیدی: نرمه‌های خردکن، خمیرسازی سودا آنتراکینون، توالی رنگ‌بری DOED1P و HEP.

عبداله بریمانی<sup>۱</sup>

علی قاسمیان<sup>۲\*</sup>

الیاس افرا<sup>۳</sup>

سید رحمان جعفری پطرودی<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری، گروه علوم و مهندسی کاغذ، دانشکده مهندسی چوب و کاغذ، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، ایران

<sup>۲</sup> استاد، گروه علوم و مهندسی کاغذ، دانشکده مهندسی چوب و کاغذ، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، ایران

<sup>۳</sup> دانشیار، گروه علوم و مهندسی کاغذ، دانشکده مهندسی چوب و کاغذ، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، ایران

<sup>۴</sup> استادیار و کرسی تحقیقات پالایش زیستی در توسعه مواد لیگنوسلولزی، دانشکده مدیریت منابع طبیعی، دانشگاه Lakehead، انتاریو، کانادا

مسئول مکاتبات:

[ghasemian@gau.ac.ir](mailto:ghasemian@gau.ac.ir)

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۸/۳۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۰/۲۸

## مقدمه

با توجه به محدودیت‌های تأمین منابع چوبی، تعدد کارخانه‌های فیبری و تداوم قوانین سخت‌گیرانه طرح صیانت از جنگل و مقررات محیط زیستی، بحث بهره‌برداری حداکثری از منابع فیبری در بخش صنعت کشور با سرمایه‌گذاری، به‌روزرسانی و تغییر فرایند در کارخانه‌های مذکور، روزبه‌روز در حال گسترش بوده و این شرکت‌ها تلاش خود را در توانمندسازی حداکثری فرایند تولید در جهت به‌کارگیری ضایعات همراه با کاهش تولید این ضایعات بکار برده‌اند تا علاوه بر جبران کمبود این منابع، بتوانند بخشی از هزینه تولید را نیز کاهش دهند [۱،۲]. شرکت چوب و کاغذ مازندران، سرآمد و تابع این تفکرات در کشور بوده که تمامی تلاش‌ها خود را در سال‌های اخیر با بهره‌گیری از نیروهای توانمند در این راه، قدم برداشته است (ضمن تداوم محدودیت‌های تحریم). با توجه به ظرفیت اسمی ۱۷۵ هزار تنی شرکت در تولید انواع کاغذ چاپ و تحریر و کاغذهای بسته‌بندی، مقدار انواع چوب آلات مصرفی شرکت بیش از ۳۰۰ هزار تن در سال می‌باشد و در صورت تداوم تولید شرکت در حداکثر ظرفیت تولید، میزان ضایعات خردکن و پوست‌کن در تولید خرده چوب (از انواع چوب آلات) در حدود ۲۵ هزار تن خواهد بود که سهم ضایعات کوچک یا خاکاره به بیش از ۱۰ هزار تن در سال می‌رسد. در سال‌های اخیر با توجه به افزایش استفاده از هیزم و برخی گونه‌های باغی، تولید ناخواسته این ضایعات نیز تشدید شده است. ضایعات مذکور در سال‌های گذشته، با قیمت کم به مشتریان (کارخانه‌های نئوپان و...) فروخته می‌شد که ارزش‌افزوده آن‌چنانی برای شرکت به همراه نداشته و حتی با توجه به ذخیره آن در محل‌های روباز، حجم زیادی از آن تحت‌تأثیر شرایط جوی و میکروارگانیسم به ضایعات غیرقابل‌استفاده تبدیل می‌شدند.

ظرفیت تولید و مصرف جهانی کاغذ و مقوا با افزایش تقاضا در حال گسترش بوده و در سال ۲۰۲۱ به حدود ۴۱۷ میلیون تن رسیده است که به معنای رشد ۱۹ درصدی آن نسبت به سال ۲۰۰۴ می‌باشد [۳]. با این حال افزایش تقاضای کاغذ و مقوا در مقابل محدودیت‌های مرتبط با تأمین چوب، چالشی بزرگی برای صنایع خمیر و

کاغذ محسوب شده و افزایش قیمت چوب و هزینه تولید را در برداشته است [۴،۵]. این نگرانی‌ها جامعه تحقیقاتی در بخش صنعت خمیر و کاغذ را به سمت شناسایی منابع جایگزین، روش‌های به‌کارگیری، خمیرسازی و رنگ‌بری مناسب برای آن‌ها، جهت حفظ پایداری محیط‌زیست سوق داده است [۶-۸].

بر اساس مطالعات Zhang و همکاران (۲۰۲۰)، ضایعات خرده چوب‌های ریز گونه‌های مختلف چوبی، حاوی ترکیبات مشابه مواد خام تجاری اصلی خودشان بوده و به دلیل داشتن اندازه کوچک‌تر و ضخامت کمتر، پتانسیل مناسبی در تولید خمیر کاغذ و رنگ‌بری دارند [۹]. Chen و همکاران (۲۰۲۲) در مطالعه خود خواص و کاربرد خمیر کرافت تهیه‌شده از خاکاره بامبو را مورد بررسی قرار دادند. محققین ابتدا کاغذ دست‌ساز با وزن پایه ۱۲۰ گرم بر مترمربع از خمیر کرافت خاکاره بامبو و خمیر OCC<sup>۱</sup> ساخته و پس از آزمایش و بررسی اعلام نمودند الیاف خمیر خاکاره بامبو نسبتاً شکسته، توزیع محکم‌تر و سطح ناهموار و ترک‌های ریز بی‌شماری داشته و این در صورتی است که الیاف خمیر OCC، باریک، صاف و بلند می‌باشند. کاغذ ساخته‌شده از خمیر خاکاره بامبو نفوذپذیری و مقاومت کشش بسیار بیشتری نسبت به خمیر OCC داشته و الگوی پراکنش X-ray آن نیز درجه کریستالیت (بلورینگی) بیشتر را نسبت به خمیر OCC نشان می‌دهد. نتایج همچنین نشان داد که به دلیل افزایش نیرو و پیوند بین‌مولکولی، مقاومت کشش افزایش یافته اما ناحیه کشیدگی طی شکست کاهش یافته است [۱۰]. Xu و همکاران (۲۰۱۵) نیز موفق شدند از ضایعات گونه چوب اکالیپتوس در مقیاس صنعتی در تعدادی از کارخانه‌های خمیر کاغذ در جنوب چین، خمیر کاغذ مناسب تولید کنند [۱۱].

جهت تولید خمیر کاغذ بسته به نوع محصول کاغذی، گونه فیبری و امکانات، از فرایندهای مختلف، شیمیایی، شیمیایی-مکانیکی و مکانیکی استفاده می‌شود [۱۲]. در این تحقیق از فرایند خمیرسازی شیمیایی سودا - آنتراکینون به دلیل ارائه خمیر مرغوب، تیمار سبک‌تر و عدم استفاده از ترکیبات گوگردی (عدم انتشار آلاینده‌های

<sup>۱</sup>.Old Corrugated Container

فرایند تولید خرده چوب در شرکت چوب و کاغذ بدین ترتیب بوده که چوب‌آلات ذخیره شده در انبار<sup>۴</sup> ابتدا وارد دستگاه پوست‌کن<sup>۵</sup> شده و پس از عبور از یک‌سری رول-های غلتکی و نوار نقاله<sup>۶</sup> و در ادامه شستشوی ثانویه به سمت خردکن<sup>۷</sup> انتقال می‌یابند. در ادامه خرده‌چوب‌ها تولیدشده در خردکن‌ها وارد الک لرزان<sup>۸</sup> شده و به چهار دسته درجه‌بندی می‌شوند: ۱- خرده چوب‌های بزرگتر از اندازه<sup>۹</sup> به خردکن ثانویه<sup>۱۰</sup> رفته و به اندازه قابل قبول تبدیل می‌شوند (در صفحه بالای الک با قطر منافذ گرد ۴۵ میلی‌متر باقی می‌مانند). ۲- خرده چوب‌های خیلی ضخیم<sup>۱۱</sup> با ضخامت بیش از ۸ میلی‌متر نیز پس از الک به دستگاه برش دهنده تراشه<sup>۱۲</sup> منتقل شده و پس از اصلاح ضخامت توسط نوار نقاله به محل ذخیره خرده چوب‌های پذیرفته‌شده انتقال می‌یابد (صفحه دوم با قطر منافذ ۸ میلی‌متر)، ۳- خرده چوب‌های قابل قبول<sup>۱۳</sup> توسط نوار نقاله به استکرها (انباشته‌سازها)<sup>۱۴</sup> منتقل می‌شوند (صفحه سوم: خرده چوب‌های با ضخامت ۵-۴ میلی‌متر، پهنای ۳۰-۱۰ میلی‌متر)، ۳۴- خاکاره‌های چوب<sup>۱۵</sup> عبور کرده از سوراخ‌های صفحه سوم الک توسط نوار نقاله‌ای به محل ذخیره خاکاره انتقال داده می‌شود (ضخامت ۴-۲ میلی‌متر و پهنای کمتر از ۸ میلی‌متر). دسته چهارم الک یعنی خاکاره‌ها، ماده اولیه این مطالعه بوده که در فرایند تولید خمیر مورد استفاده قرار نگرفته و با قیمت کم به فروش می‌رسد؛ لذا با توجه به مسائل مطرح‌شده هدف از این تحقیق، بررسی قابلیت‌های تولید خمیر کاغذ رنگ‌بری شده از ضایعات ریز خرده چوب (خاکاره‌ها) با فرایند خمیرسازی سودا -آنتراکینون طی رنگ‌بری با توالی بدون کلر عنصری D<sub>0</sub>ED<sub>1</sub>P و توالی HEP بوده است.

هوا و ایجاد بوی بد)، سودآوری تولید خمیر در ظرفیت کم، تخریب کمتر سلولز با حذف بیشتر لیگنین، هزینه کمتر تولید، بازیابی مناسب‌تر مواد شیمیایی و بازده مناسب در گونه‌های غیرچوبی و ضایعات چوبی استفاده‌شده است [۹، ۱۴، ۱۵]. رنگ‌بری خمیر کاغذ نیز یکی از مهم‌ترین فرایندها در صنایع کاغذ بوده که باهدف حذف گروه‌های رنگ‌ساز و لیگنین باقیمانده خمیر به منظور افزایش دائمی روشنایی خمیر کاغذ انجام می‌شود. در حال حاضر، فرایند رنگ‌بری در صنعت طی توالی بدون کلر عنصری ECF انجام می‌شود [۱۶، ۱۷]. بسیاری از تحقیقات انجام‌شده در ارتباط با رنگ‌بری چوب‌های پهن-برگان با توالی رنگ‌بری بدون کلر TCF، به استحکام ضعیف‌تر الیاف، قابلیت روشنایی کمتر، بازده کمتر، نیازهای انرژی بیشتر و هزینه سرمایه‌گذاری بیشتر آن گزارش نمودند که قابلیت جایگزینی آن را به جای فرایند ECF کاهش داده است [۱۸]. در ایالات متحده آمریکا، فرایند ECF به‌عنوان بهترین فناوری صنعتی رنگ‌بری موجود در نظر گرفته‌شده و در اروپا نیز، گروه محیط زیستی تصمیم گرفته است که تفاوت معنی‌داری بین TCF<sup>۲</sup> و ECF<sup>۲</sup> در نظر نگیرد. در حدود ۸۰ درصد کارخانه‌های خمیرسازی جهان (۲۰۲۱) از توالی صنعتی ECF برای رنگ‌بری خمیر کاغذ استفاده می‌کنند و به‌مرور زمان نیز حتی برخی از کارخانه‌هایی که از توالی TCF بهره می‌برند نیز به سمت استفاده از توالی رنگ‌بری بدون کلر عنصری پیش می‌روند [۱۹]. استفاده از رنگ‌بری بدون کلر عنصری با استفاده از دی‌اکسید کلر (ClO<sub>2</sub>) بیشترین سهم را در فناوری دوستدار محیط‌زیست برای تولید خمیر رنگ‌بری شده تشکیل می‌دهد [۲۰]. هم‌اکنون در شرکت چوب و کاغذ مازندران، از فرایند رنگ‌بری با حفظ لیگنین (پروکسید هیدروژن) در خط تولید خمیر CMP<sup>۲</sup> استفاده می‌شود و به نظر می‌رسد با توجه به شرایط ماده اولیه و بازار مصرف کاغذ (نیاز به کاغذ چاپ و تحریر باکیفیت‌تر) شرکت می‌بایست به دنبال به‌روزرسانی تجهیزات همگام با فرایند تولید آن اقدام نماید.

4. Yard

5. Drum Debarker

6. Conveyor

7. Chipper

8. Vibration Screen

9. Over size

1. Rechipper 0

1. Over thick 1

1. Chip Slicer 2

1. Accept 3

1. Chips transfer stackers 4

1. Fine 5

2. Totally chlorine free (TCF)

3. Chemi-Mechanical Pulping (CMP)

## مواد و روش‌ها

### آماده‌سازی مواد اولیه فیبری

نرمة‌های کارخانه چوب و کاغذ مازندران (ضخامت ۴-۲ میلی‌متر و پهنای کمتر از ۸ میلی‌متر) به‌صورت کاملاً تصادفی از محل انباشت ضایعات خردکن گونه صنوبر تهیه شد و پس از انتقال به آزمایشگاه دانشگاه علوم کشاورزی و



شکل ۱. مراحل تولید خمیر

انجام شد. انتخاب بهترین شرایط خمیرسازی سودا آنتراکینون برحسب متغیرهای مختلف غلظت قلیا (۱۴، ۱۶، ۱۸ و ۲۰ درصد بر مبنای وزن خشک)، زمان پخت در درجه حرارت بیشینه (۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ دقیقه) و نسبت مایع پخت به وزن خشک چوب ۵ الی ۶ به ۱ در دمای ثابت ۱۶۵ درجه سانتی‌گراد و مصرف ثابت ۰/۲ درصد آنتراکینون تعیین شد. در ادامه ۲۴ تیمار آزمایشی در ۳ تکرار انجام شد. بعد از هر پخت ابتدا مایع پخت سیاه جدا شده و سپس جداسازی الیاف بعد از غربال و واژده با استفاده از غربال با اندازه ۱۶ مش مستقر در بالای الک ۲۰۰ مش انجام گرفت. مجموعه الیاف باقی‌مانده بر روی غربال ۱۶ مش و ۲۰۰ مش معادل بازده کل و الیاف باقی‌مانده بر روی غربال ۱۶ مش به‌عنوان واژده و الیاف عبور کرده از غربال ۱۶ مش و باقی‌مانده بر روی غربال

### اندازه‌گیری ویژگی‌های شیمیایی

به‌منظور اندازه‌گیری درصد ترکیبات شیمیایی نرمة‌های خردکن، نمونه‌ها طبق استاندارد T۲۵۷ cm-۰۲ آسیاب شده و درصد مواد استخراجی، لیگنین (لیگنین کلاسون)، سلولز و خاکستر آن‌ها به ترتیب با استفاده از استانداردهای شماره T۲۸۰ pm-۹۹، T۲۲۲ om-۰۲، T۲۶۴ om-۹۸ و T۲۱۱ om-۰۲ آیین‌نامه تاپی اندازه‌گیری شد.

### خمیرسازی سودا - آنتراکینون (S-AQ)

خمیرسازی در دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان با استفاده از یک دیگ پخت الکتریکی ساخت کشور اتریش، دارای شش محفظه ۲،۵ لیتری و با سرعت چرخش ۱۰ دور در دقیقه که توسط روغن گلیسیرین گرم می‌شود با استفاده از فرایند سودا - آنتراکینون (S-AQ)

به‌عنوان شرایط بهینه در نظر گرفته شد. عدد کاپا و بازده هرکدام از آن‌ها به ترتیب با استفاده از استانداردهای شماره T236 om-99، T236 om-99 و T236 om-99 آیین نامه TAPPI و گرانیروی نیز طبق روش ۵۳۵۱:۲۰۱۰ استاندارد ISO محاسبه شد.

۲۰۰ مش به‌عنوان خمیرکاغذ قابل‌قبول، توزین و گزارش‌شده‌اند. درنهایت از بین شرایط پخت (جدول ۱)، نمونه با شرایط قلیائیت ۲۰ درصد (هیدروکسید سدیم)، ۰٫۲ درصد آنتراکینون، زمان ۱۲۰ دقیقه، نسبت مایع پخت به وزن خشک چوب ۶ به ۱ و دمای ۱۶۵ درجه سانتی‌گراد

جدول ۱- شرایط پخت های آزمایشگاهی مورد استفاده در این تحقیق

شماره	قلیایی فعال (%)	نسبت مایع پخت به وزن خشک چوب (L:W)	زمان پخت (دقیقه)
۱			۶۰
۲		۵	۹۰
۳			۱۲۰
۴	۱۴		۶۰
۵		۶	۹۰
۶			۱۲۰
۷			۶۰
۸		۵	۹۰
۹	۱۶		۱۲۰
۱۰			۶۰
۱۱		۶	۹۰
۱۲			۱۲۰
۱۳			۶۰
۱۴		۵	۹۰
۱۵	۱۸		۱۲۰
۱۶			۶۰
۱۷		۶	۹۰
۱۸			۱۲۰
۱۹			۶۰
۲۰		۵	۹۰
۲۱	۲۰		۱۲۰
۲۲			۶۰
۲۳		۶	۹۰
۲۴			۱۲۰

\* در همه نمونه‌های پخت، مقدار مصرف آنتراکینون و دمای پخت ثابت و به ترتیب ۰/۲ درصد و ۱۶۵ درجه سانتی‌گراد بوده است.

پراکسید هیدروژن) با استفاده از کیسه‌های پلی‌اتیلنی و حمام آبی انجام شد و در کلیه مراحل شستشوی کامل خمیر با آب مقطر بر روی الک با مش ۲۰۰ انجام شد و سپس pH نهایی اندازه‌گیری شد. مشخصات سطوح مصرفی این مواد رنگ‌بر و متغیرهای فرایندی آن‌ها در جدول ۲ آمده است.

### رنگ‌بری

جهت رنگ‌بری از توالی‌های رنگ‌بری بدون کلر عنصری (ECF) بهره گرفته شد. رنگ‌بری با توالی‌های چندمرحله‌ای DOEDIP (توالی رنگ‌بری چندمرحله‌ای دی‌اکسید کلر اولیه، استخراج قلیایی و به دنبال آن دی‌اکسید کلر ثانویه و پراکسید هیدروژن) و HEP (هیپوکلریت سدیم، استخراج قلیایی و به دنبال آن

### مرحله کی‌لیت کردن (Q)

جهت حذف یون‌های فلزات واسطه از خمیر کاغذ (منگنز، آهن و مس)، به‌عنوان عامل از بین‌برنده ماده فعال رنگ‌بری (پروکسید هیدروژن)، نمونه‌های خمیر کاغذ با درصد خشکی ۱۰، در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد و در مدت ۴۰ دقیقه توسط EDTA ۰/۲ درصد بر مبنای وزن خشک خمیر کاغذ و pH در حدود ۴/۵ تیمار شدند.

### مرحله دی‌اکسید کلر

سپس نمونه خمیر شستشو و آگیری شده طی مرحله D<sub>0</sub> برحسب وزن خشک چوب در داخل کیسه پلاستیکی

پلی‌اتیلنی ریخته شد و ماده‌ی رنگ‌بری دی‌اکسید کلر را به مقدار لازم ( $D_0 = 0.3$ ) درصد از عدد کاپا و D<sub>1</sub> نصف مرحله اول) به آن اضافه شد و سپس با استفاده از آب مقطر، درصد خشکی خمیر (۱۰٪) تنظیم شده است. در ادامه خمیر در حمام آبی به مدت ۶۰ دقیقه در مرحله D<sub>0</sub> و به مدت ۱۲۰ دقیقه در مرحله D<sub>1</sub> تحت تأثیر دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفت. در طول زمان رنگ‌بری، هر ۵-۱۰ دقیقه یک‌بار کیسه را از حمام خارج کرده و خمیر داخل آن خوب مخلوط گردید (این کار به رنگ‌بری بهتر و یکنواخت‌تر خمیر کمک می‌نماید).

جدول ۲- متغیرهای مورد استفاده برای فرایند رنگ‌بری در این مطالعه.

H	P	D <sub>1</sub>	E	D <sub>0</sub>	Q	شرایط رنگ‌بری
۹۰	۹۰	۱۲۰	۶۰	۶۰	۳۰	زمان (دقیقه)
۷۰	۷۰	۷۰	۷۰	۷۰	۶۰	دما (درجه سانتی‌گراد)
۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۳	درصد خشکی خمیر
-	-	۵۰٪ (D <sub>0</sub> )	-	۰/۳ (K) *	-	مقدار مصرف CLO <sub>2</sub> (%)
۰/۶	۰/۸ (P)	-	۰/۳ (D <sub>0</sub> )	-	-	NaOH (%)
-	۳	-	-	-	-	مقدار H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (%)
-	۳	-	-	-	-	مقدار Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> (%)
۴	-	-	-	-	-	مقدار NaClO (%)
-	-	-	-	-	۰/۵	EDTA (%)
۱۱	۱۰/۳	۲/۷	۱۱	۲/۸	۵/۲	نهایی pH

\* K: عدد کاپا، D<sub>0</sub>: مرحله اول رنگ‌بری با دی‌اکسید کلر، E: استخراج قلیایی، D<sub>1</sub>: مرحله دوم رنگ‌بری با دی‌اکسید کلر، Q: کی‌لیت کردن و P: پراکسید هیدروژن

### مرحله پروکسید (P)

در این روش ابتدا سیلیکات سدیم و هیدروکسید سدیم به خمیر در داخل بشر افزوده و با خمیر مخلوط شد. سپس پراکسید هیدروژن موردنظر به آن افزوده شد. در ادامه عملیات رنگ‌بری خمیر کاغذ در ۷۵ درجه سانتی‌گراد برای مدت‌زمان ۹۰ دقیقه انجام شد. مرحله H: ابتدا هیدروکسید سدیم به خمیر افزوده و با آن مخلوط شد. سپس هیپوکلریت سدیم موردنظر به آن اضافه‌شده و در نهایت رنگ‌بری خمیر کاغذ در حمام آب گرم با دمای ۷۵ °C به مدت‌زمان ۳۰ دقیقه انجام گردید. خمیر رنگ‌بری شده نیز با آب مقطر شسته شده و با اسیدسولفوریک رقیق و pH آن به ۵/۵ رسانده شد.

### طرح آماری

تجزیه و تحلیل داده‌های این بررسی با استفاده از طرح فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با استفاده از نرم‌افزار SPSS انجام شد.

### نتایج و بحث

#### ترکیبات شیمیایی

مقدار ترکیبات شیمیایی اصلی نرمه‌های خردکن (گونه صنوبر) تهیه‌شده از شرکت چوب و کاغذ مازندران شامل سلولز، همی سلولزها، لیگنین، مواد استخراجی و خاکستر به ترتیب ۵۱/۸۵، ۲۳/۶۳، ۲۱/۱۲، ۲/۲۲ و ۱/۱۸ درصد بدست آمده است. گلی و همکاران (۲۰۱۶) در تحقیق

چوب ۶ به ۱) اندازه‌گیری شده است. با توجه به این‌که افزایش مقدار مصرف هیدروکسید سدیم و زمان پخت بیشتر، سبب لیگنین‌زدایی بیشتر خمیر می‌شود، در نتیجه آن عدد کاپا و بازده کل خمیر کاغذ کم شده [۲،۳] و به دنبال تخریب بیشتر ترکیبات شیمیایی اصلی الیاف ناشی از اثر تخریبی هیدروکسید سدیم بر روی همی‌سلولزها، لیگنین و تخریب اتصال گلوکوزیدیک زنجیره سلولز، گر انرژی خمیر نیز کاهش یافته است (شکل ۴). تأثیر مستقل غلظت مصرف هیدروکسید سدیم، زمان پخت و اثر متقابل مصرف هیدروکسید سدیم، زمان پخت و نسبت مایع پخت بر روی بازده کل (جدول ۳) در سطح اعتماد آماری ۹۵ درصد، معنی‌دار بوده؛ ولی تأثیر مستقیم نسبت مایع پخت به وزن خشک چوب بر روی بازده کل (جدول ۳) در سطح اعتماد آماری ۹۵ درصد، معنی‌دار نمی‌باشد. همان‌طوری که از شکل ۲ مشخص است، افزایش مصرف قلیا هم‌زمان با اعمال سایر متغیرهای فرایندی، شدت افت بازده کل به دلیل تخریب بیشتر کربوهیدرات‌ها بیشتر مشهود می‌باشد. همچنین شدت افت بازده در نسبت مایع پخت به وزن خشک چوب ۵ به ۱ بیشتر از ۶ به ۱ می‌باشد (شکل ۲).

خود تحت عنوان بررسی جایگزینی تولید روزنامه چوب و کاغذ مازندران با مخلوط گونه‌ها بر ویژگی‌های خمیر کاغذ CMP، مقادیر سلولز، همی سلولزها، لیگنین، مواد استخراجی و خاکستر را در گونه چوب صنوبر به ترتیب ۵۱/۵۶، ۲۱/۹۳، ۲۲/۷۰، ۳/۳۳ و ۰/۴۸ محاسبه نمودند [۲۱]. بنابراین به لحاظ ترکیبات شیمیایی نرمه های خردکن می‌تواند به عنوان جایگزین مناسبی برای خرده چوب های مورد استفاده در تولید خمیر کاغذ به شمار رود.

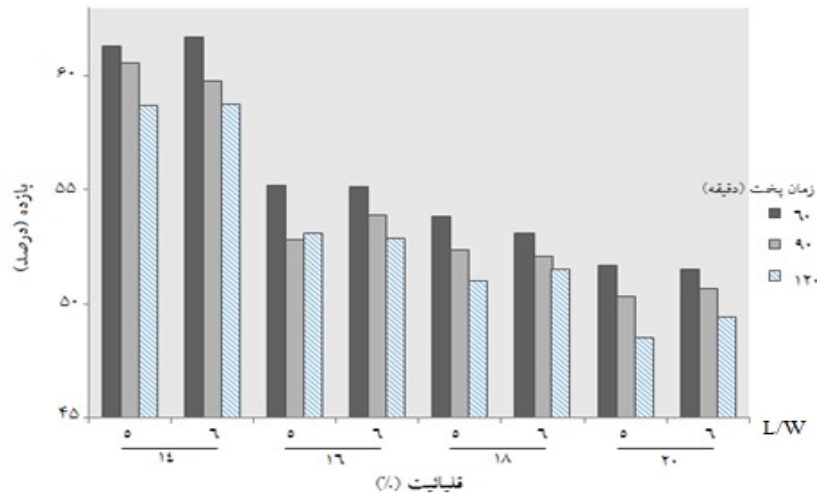
### بازده، عدد کاپا و گر انرژی

نتایج مرتبط با ویژگی‌های خمیر کاغذ تهیه‌شده از فرایند خمیرسازی سودا - آنتراکینون شامل بازده، عدد کاپا و گر انرژی پس از پخت به ترتیب در شکل‌های ۲ الی ۴ آورده شده و تجزیه واریانس داده‌ها نیز در جداول ۱ الی ۳ خلاصه‌شده است. بیش‌ترین بازده کل در شرایط پخت ملایم (دمای ۱۶۵ درجه سانتی‌گراد، ۱۴ درصد قلیا (هیدروکسید سدیم)، زمان ۶۰ دقیقه، نسبت مایع پخت به وزن خشک چوب ۵ به ۱) و کم‌ترین بازده کل نیز در شدیدترین شرایط پخت خمیر (دمای ۱۶۵ درجه سانتی‌گراد زمان ۱۲۰ دقیقه و ۲۰ درصد قلیا (هیدروکسید سدیم)، نسبت مایع پخت به وزن خشک

جدول ۳- تجزیه واریانس تأثیر عوامل متغیر بر بازده کل خمیر کاغذ

منبع تغییرات	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	آماره آزمون F	سطح معنی‌داری
قلیائیت	۳	۶۵۱/۸۶۰	۲۱۷/۲۸۷	۱۴۳۳/۱۷۲	** ۰/۰۰۰
زمان	۲	۵۳/۷۸۲	۲۶/۸۹۱	۱۷۷/۳۶۸	** ۰/۰۰۰
نسبت مایع پخت به وزن خشک چوب	۱	۰/۰۲۰	۰/۰۲۰	۰/۱۳۲	۰/۷۲۰
قلیائیت × زمان × نسبت مایع پخت به وزن خشک چوب	۶	۲/۸۲۱	۰/۴۷۰	۳/۱۰۱	۰/۲۲۲
خطا	۲۴	۳/۶۳۹	۰/۱۵۲		
کل	۴۷	۷۱۶/۲۷۰			

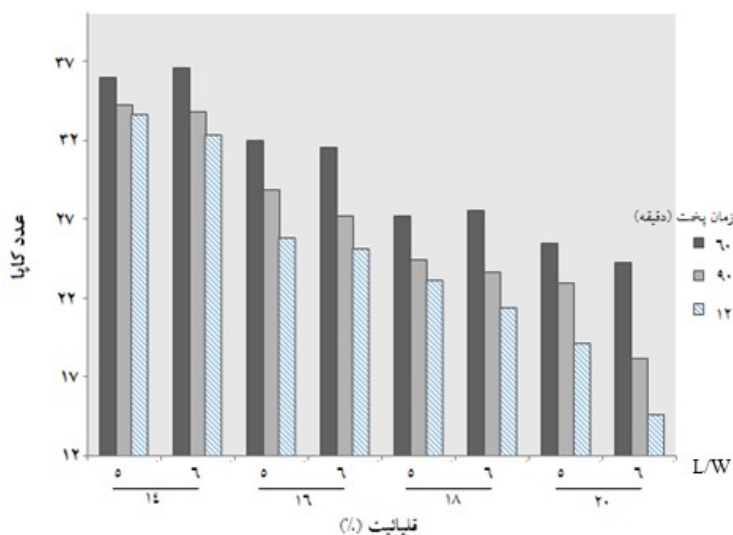
\*\* معنی‌دار در سطح احتمال ۹۵ درصد



شکل ۲- تأثیر زمان پخت در درجه حرارت بیشینه بر روی بازده کل خمیر کاغذ.

درصد نیز مشاهده شده که عدد کاپای خمیر کاهش می‌یابد. در یک بازده مشخص با افزایش قلیا میزان عدد کاپای خمیر کاهش پیدا می‌کند و بالعکس در یک عدد کاپای مشخص با افزایش قلیا بازده خمیر کاغذ نیز کاهش می‌یابد [۲۰]. همچنین Saracian و همکاران (۲۰۰۸)، اعلام کردند با توجه به رابطه مستقیم بین لیگنین باقیمانده در خمیر کاغذ و عدد کاپا، با لیگنین‌زدایی بیشتر مقادیر عدد کاپا کاهش می‌یابد [۲۲]. Copar and Tozluglu (۲۰۰۷)، اعلام کردند لیگنین‌زدایی صنوبر نسبت به سایر گونه‌ها گزینش‌پذیرتر می‌باشد، از طرف دیگر بازده خمیر کاغذ گونه صنوبر نسبت به سایر گونه‌های پهن‌برگ بیشتر بوده و عدد کاپای آن کمتر است؛ که این یک مزیت بزرگ برای استفاده از این گونه در صنعت کاغذسازی می‌باشد [۲۳].

از جدول تجزیه واریانس ۴ مشخص است که تأثیر عوامل متغیر (مستقل و متقابل) بر روی بر عدد کاپا در سطح ۹۵ درصد معنی‌دار است. افزایش زمان پخت همراه با افزایش غلظت مصرف قلیا، فرصت و قلیای بیشتر را برای لیگنین‌زدایی فراهم می‌کند که در نتیجه آن عدد کاپا و بازده کاهش می‌یابد. زمان بیشتر به معنی فرصت بیشتر برای واکنش لیگنین‌زدایی می‌باشد و در زمان طولانی‌تر، هیدروکسید سدیم شانس بیشتری برای شرکت در واکنش خواهد داشت. بیش‌ترین عدد کاپا مربوط به تیمار با قلیای فعال ۱۴ درصد و زمان ۶۰ دقیقه (در هر دو نسبت‌های مایع پخت به وزن خشک چوب ۵ و ۶ به ۱) و کم‌ترین عدد کاپا نیز مربوط به تیمار با قلیای فعال ۲۰ درصد و زمان ۱۲۰ دقیقه می‌باشد (در نسبت مایع پخت به وزن خشک چوب ۶ به ۱). با افزایش زمان پخت و افزایش قلیای فعال از سطح ۱۴ به سطح ۲۰



شکل ۳- تأثیر زمان پخت در درجه حرارت بیشینه بر بر روی عدد کاپا.

جدول ۴- تجزیه واریانس تأثیر عوامل متغیر بر عدد کاپا خمیر کاغذ.

منبع تغییرات	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	آماره آزمون F	سطح معنی‌داری
قلیائیت	۳	۱۲۳۶/۷۸۴	۴۱۲/۲۶۱	۳۶۵۹/۵۳۱	** .۰/۰۰۰
زمان	۲	۲۶۷/۵۳۲	۱۳۳/۷۶۶	۱۱۸۷/۴۰۵	** .۰/۰۰۰
نسبت مایع پخت به وزن خشک چوب	۱	۲۲/۶۶۰	۲۲/۶۶۰	۲۰۱/۱۴۷	** .۰/۰۰۰
قلیائیت × زمان × نسبت مایع پخت به وزن خشک چوب	۶	۴/۴۸۸	۰/۷۴۸	۶/۶۴۰	** .۰/۰۰۰
خطا	۲۴	۲/۷۰۴	۰/۱۱۳		
کل	۴۷	۱۵۷۹/۵۶۴			

\*\* معنی‌دار در سطح احتمال ۹۵ درصد

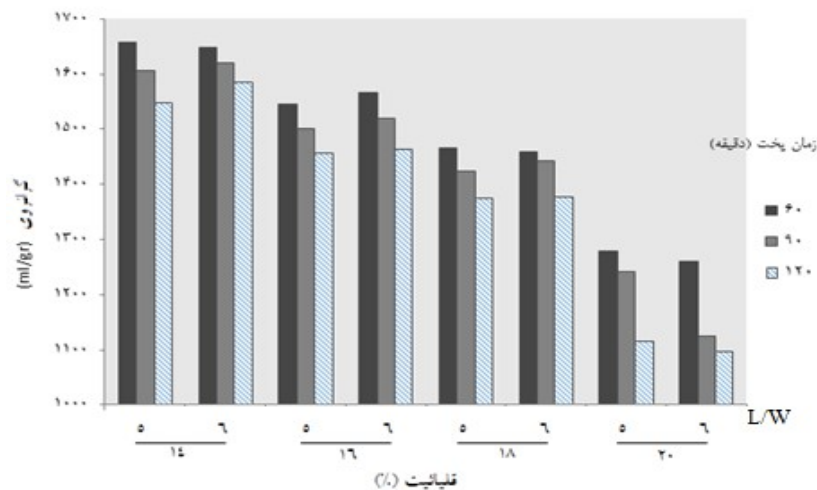
آمد (قلیایی فعال ۲۰ درصد، زمان ۱۲۰ دقیقه و نسبت مایع پخت به وزن خشک چوب ۶ به ۱). زیرا در این حالت شکست پیوندهای گلیکوزیدی به دلیل انرژی زیادتر امکان‌پذیر شده است. در غلظت بیشتر هیدروکسید سدیم، زمان پخت بیشتر، سبب واکنش‌دهی بیشتر الیاف و دسترسی بیشتر مایع پخت به داخل منافذ و دیواره سلولی شده که این مسئله تخریب بیشتر کربوهیدرات‌ها و لیگنین و در نتیجه کاهش سریع‌تر گرانروی خمیر کاغذ را به دنبال دارد [۶].

نتایج جدول ۵ تجزیه واریانس نشان می‌دهد که تأثیر عوامل متغیر (مستقل و متقابل شامل غلظت مصرف هیدروکسید سدیم، زمان پخت و نسبت مایع پخت به وزن خشک چوب) به‌طور معنی‌داری در سطح اطمینان ۹۵ درصد بر گرانروی خمیر کاغذ تأثیر دارد. بیشترین گرانروی نیز مربوط به نمونه تحت تیمار قلیایی فعال ۱۴ درصد، زمان پخت ۶۰ دقیقه و نسبت مایع پخت به وزن خشک چوب ۵ به ۱ می‌باشد. به‌علاوه مطابق با انتظار، کم‌ترین گرانروی خمیر کاغذ در شدیدترین شرایط پخت به دست

جدول ۵- تجزیه واریانس تأثیر عوامل متغیر بر گرانیوی خمیر کاغذ.

منبع تغییرات	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	آماره آزمون F	سطح معنی‌داری
قلیائیت	۳	۱۱۷۱۰۹۵/۸۳۳	۳۹۰۳۶۵/۲۷۸	۱۲۶۴۴/۴۱۰	** ./.۰۰۰
زمان	۲	۹۴۵۷۲/۱۲۵	۴۷۲۸۶/۰۶۲	۱۵۳۱/۵۳۲	** ./.۰۰۰
نسبت مایع پخت به وزن خشک چوب	۱	۳۱۰/۰۸۳۳	۳۱۰/۰۸۳	۱۰/۰۴۳	** ./.۰۰۰
قلیائیت × زمان × نسبت مایع پخت به وزن خشک چوب	۶	۶۷۰۳/۶۲۵	۱۱۱۷/۲۷۱	۳۶/۱۸۷	** ./.۰۰۰
خطا	۲۴	۷۴۱/۰۰۰	۳۰/۸۷۵		
کل	۴۷	۱۲۹۲۳۸۴/۰۰۰			

\*معنی‌دار در سطح احتمال ۹۵ درصد



شکل ۴- تأثیر زمان پخت در درجه حرارت بیشینه بر روی گرانیوی خمیر کاغذ.

سدیم قابل توجه بوده که این شیب کاهش‌دهنده عدد کاپا و حذف لیگنین با ماده رنگ‌بر H سبب تولید خمیر با عدد کاپای و درصد لیگنین کمتر در خمیر نهایی رنگ‌بری نیز شده است. هیپوکلریت یک رنگ‌بر واقعی است. این ترکیب ترجیحاً بعضی از گروه‌های رنگ‌ساز لیگنین را از بین می‌برد. انتخاب‌پذیری آن کمتر از دی‌اکسید کلر بوده و در موارد معدودی، برای رنگ‌بری خمیر پربازده نیز به کار می‌رود. محلول هیپوکلریت، در کارخانه خمیر کاغذ از طریق مخلوط‌کردن کلر با محلول NaOH یا دوغاب  $\text{Ca(OH)}_2$  تهیه می‌شود [۲۴].

### رنگ‌بری

**لیگنین و عدد کاپا:** با توجه به جدول ۶ مشاهده می‌شود لیگنین موجود در خمیر کاغذ رنگ‌بری نشده با یکدیگر برابر بوده و لذا رنگ‌بری بر روی خمیر کاغذهای با میزان لیگنین مشابه صورت گرفته و بنابراین نتایج رنگ‌بری می‌تواند قابل مقایسه باشد. عدد کاپای خمیر کاغذ طی توالی‌های رنگ‌بری  $\text{D}_0\text{ED}_1\text{P}$  و HEP سیر نزولی داشته و از مقدار ۱۴/۵۷ در خمیر رنگ‌بری نشده به ۰/۸۷ و ۰/۷۲ به ترتیب برای توالی  $\text{D}_0\text{ED}_1\text{P}$  و HEP رسیده است. کاهش عدد کاپا طی مرحله رنگ‌بری هیپوکلریت

جدول ۶- عدد کاپا، مقادیر لیگنین و بازده رنگ‌بری خمیر کاغذ در مراحل مختلف رنگ‌بری.

توالی رنگ‌بری	کاپا	مقدار لیگنین (%)	بازده مراحل رنگ‌بری (%)
خمیر کاغذ رنگ‌بری نشده	۱۴/۵۷	۲/۱۸۵	۱۰۰
D0	۶/۲۳	۰/۹۳۴۵	۹۴/۸۷
E	۴/۱۷	۰/۶۲۵۵	۹۹/۴۱
D1	۱/۲۴	۰/۱۸۶	۹۸/۶۹
P	۰/۸۷	۰/۱۳۰۵	۹۹/۵۸
بازده کل (%)			
H	۲/۱۴	۰/۳۲۱	۹۳/۰۷
E	۱/۶۵	۰/۲۴۷۵	۸۹/۲۷
P	۰/۷۲	۰/۱۰۸	۹۷/۵۴
بازده کل (%)			
			۸۶/۳

همان‌گونه که از جدول ۶ ملاحظه می‌شود بخش اصلی لیگنین در مرحله اول توالی رنگ‌بری حذف شده و با توجه به کاهش دسترسی به لیگنین، در ادامه توالی، لیگنین سخت‌تر از خمیر خارج می‌شود. به همین علت با پیشرفت مراحل رنگ‌بری از فاز ابتدا به انتها طی توالی  $D_0ED_1P$  و همچنین HEP بازده رنگ‌بری افزایش پیدا کرده است. کمترین بازده در توالی رنگ‌بری  $D_0ED_1P$  مربوط به فاز ابتدای ( $D_0$ ) به دلیل دسترسی بیشتر و حذف راحت‌تر لیگنین و در توالی HEP نیز در فاز ابتدای (H) علاوه بر علت ذکر شده قبلی به انتخاب‌پذیری کم هیپوکلریت سدیم و تخریب کربوهیدرات‌ها می‌باشد. از مرحله رنگ‌بری با پروکسید هیدروژن بیشتر باهدف بهبود درجه روشنی خمیر استفاده می‌شود. پروکسید هیدروژن یک اسید ضعیف است و جزء فعال رنگ‌بر نیز آنیون هسته‌دوست پرهیدروکسیل ( $HO_2$ ) است که به ساختار کربونیلی حمله می‌کند و بدون تخریب و حل قابل ملاحظه لیگنین، آن را به سیستمی با خصلت رنگ‌سازی ضعیف‌تر تبدیل می‌کند. شرایط رنگ‌بری با پروکسید هیدروژن شبیه شرایط رنگ‌بری با اکسیژن است و اجزا واکنش‌پذیر مشابه البته با نسبت‌های متفاوت تولید می‌شوند. یون هسته‌دوست پرهیدروکسیل یک اکسیدکننده ملایم است که عمدتاً با گروه‌های کربونیل ترکیب می‌شود؛ اما این نوع حمله برای کمک به لیگنین زدایی کافی نیست. رادیکال‌های

هیدروکسیل حاصل از تجزیه پروکسید، اکسیدکننده‌های قوی لیگنین هستند؛ اما متأسفانه به سلولز و کربوهیدرات هم حمله می‌کنند. برای اجتناب از تجزیه پروکسید یا کاستن از این تجزیه که با یون فلزات واسطه کاتالیز می‌شود، رنگ‌بری باید تحت کنترل شدید و با استفاده از عوامل پایدارکننده مناسب انجام شود [۲۴].

### گرانروی

گرانروی، درجه پلیمریزاسیون (بسپارش) و وزن مولکولی نمونه خمیر کاغذ (تهیه‌شده از نرمه‌های خردکن) طی توالی‌های رنگ‌بری  $D_0ED_1P$  و HEP در جدول ۷ ارائه شده است. همان‌طور که از جدول مشاهده می‌شود با ادامه توالی رنگ‌بری از فاز یک به فاز انتهای هر یک از توالی‌های رنگ‌بری  $D_0ED_1P$  و HEP میزان گرانروی خمیر کاغذ (خمیر کاغذ تهیه‌شده از نرمه‌های خردکن) سیر نزولی داشته و میزان افت توالی رنگ‌بری HEP در مرحله اول رنگ‌بری با هیپوکلریت سدیم شدیدتر بوده که این مسئله به علت انتخاب‌پذیری کمتر آن نسبت به دی‌اکسید کلر و شکست بیشتر پیوند ۱-۴- $\beta$ - گلیکوزیدی در زنجیر سلولز رخ می‌دهد [۶]. این روند در مورد DP ( $kg/mol$ ) و وزن مولکولی ( $M_w$ ) نیز به همین ترتیب ملاحظه شد (جدول ۷).

جدول ۷- نتایج ارزیابی گرانروی، DP و وزن مولکولی در نمونه‌های خمیر کاغذ تیمارهای مختلف گونه.

M <sub>w</sub> (g/mol)	(kg/mol) DP <sub>w</sub>	گرانروی (ml/g)	توالی رنگ‌بری
۱۴۶۱/۳	۱۴۰۹	۱۰۹۶	خمیر کاغذ رنگ‌بری نشده
۱۴۱۷/۶	۱۳۷۰/۷	۱۰۶۳/۲	D0
۱۳۴۵	۱۳۰۶/۸	۱۰۰۸/۷	E
۱۳۰۳/۱	۱۲۷۸/۳	۹۷۷/۳	D1
۱۲۲۱	۱۲۶۵/۳	۹۱۵/۸	P
۱۳۲۵/۳	۱۲۸۷/۷	۹۹۴/۹	H
۱۲۸۵/۸	۱۲۴۹/۳	۹۶۴/۳	E
۱۲۳۸/۲	۱۲۲۵/۸	۹۲۸/۶	P

بیشتر و هزینه رنگ‌بری زیادتر). درجه روشنی اولیه خمیر کاغذ در بهینه‌ترین شرایط پخت قبل از رنگ‌بری ۵۰/۳۷ درصد بوده و پس از رنگ‌بری با توالی‌های D<sub>0</sub>ED<sub>1</sub>P و HEP به ترتیب به ۷۱/۲ و ۷۲/۴۸ رسیده است که این به علت مقدار لیگنین باقیمانده کمتر در توالی HEP نسبت به توالی D<sub>0</sub>ED<sub>1</sub>P به دلیل شدت لیگنین-زدایی بیشتر و انتخاب‌پذیری کمتر هیپوکلریت سدیم بود. به‌واسطه به هم چسبیدن و جمع شدگی خاکاره و نرمة-های چوب در دیگ پخت، استفاده از دیگ پخت‌های کرووی معلق با یک نسبت بیشتر مایع پخت به ماده اولیه، برای پخت‌های ناپیوسته و برای مطالعات آینده پیشنهاد می‌شود. همچنین حذف اکسیژن به‌دام‌افتاده نیز به-خصوص برای فرایندهای قلیایی جهت پیشگیری از تخریب پلی‌ساکاریدها ضروری می‌باشد. نتایج این تحقیق قابلیت زیاد نرمة‌ها خردکن شرکت چوب و کاغذ مازندران را در تولید خمیر کاغذ رنگ‌بری شده تحت شرایط تیمار ملایم با حفظ DP و بازده در جهت بهبود خواص مقاومتی کاغذهای چاپ و تحریر مکانیکی تولیدی شرکت چوب و کاغذ مازندران را نشان می‌دهد. از این رو و بر اساس نتایج این تحقیق، نرمة‌های خردکن به عنوان یک ماده لیگنوسلولزی جایگزین برای خرده چوب به‌منظور تولید خمیر کاغذ رنگ‌بری شده پیشنهاد می‌شود. ضمناً این تحقیق به‌کارگیری مفهوم اقتصاد دایره‌ای را بیشتر نمایان کرده و مصرف مواد اولیه فیبری مورد نیاز صنایع خمیر و کاغذ را به لحاظ بهینه‌سازی ضایعات و قیمت تمام شده مدیریت خواهد نمود.

با توجه شکل ۶، مقدار گرانروی خمیر رنگ‌بری شده نهایی در هر دو توالی نزدیک هم می‌باشد؛ ولی شدت افت گرانروی در توالی HEP نسبت به خمیر رنگ‌بری شده شدیدتر می‌باشد.

### نتیجه‌گیری

در این تحقیق، تأثیر سه متغیر مستقل قلیایی فعال، زمان پخت و نسبت مایع پخت به وزن خشک چوب جهت شناسایی قابلیت خمیرسازی نرمة‌های خردکن شرکت چوب و کاغذ مازندران طی فرایند سودا -آنتراکینون مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که افزایش مقدار مصرف قلیایی فعال، زمان پخت و نسبت مایع پخت به وزن خشک چوب به ترتیب اثر بیشتری بر روی افت گرانروی، عدد کاپا و بازده داشته است. همچنین بهینه-ترین شرایط پخت در مصرف قلیایی فعال ۲۰ درصد و زمان ۱۲۰ دقیقه به‌دست‌آمده و در صورت کنترل فرایند با حفظ درجه پلیمریزاسیون، بازده و تخریب کمتر کربوهیدرات‌ها می‌توان خمیر مناسب جهت رنگ‌بری به دست آورد و در صورت تخریب کمتر کربوهیدرات‌ها با عدد کاپا کمتر می‌توان با مصرف مواد شیمیایی رنگ‌بر کمتر (هزینه کمتر)، پساب و آلودگی کمتر به خمیر کاغذ رنگ‌بری شده شیمیایی مناسب جهت تولید انواع کاغذ و مقوای سفید دست‌یافت. همچنین طی دو توالی D<sub>0</sub>ED<sub>1</sub>P و HEP که دو فرایند صنعتی بکار رفته در صنعت خمیر کاغذ می‌باشند رنگ‌بری خمیر کاغذ مذکور انجام شد. نتایج بررسی نشان داد که با فرایند D<sub>0</sub>ED<sub>1</sub>P می‌توان به بازده بیشتری نسبت به فرایند HEP رسید (با یک مرحله

## منابع

- [1] Iroegbu, A.O.C., Ray, S.S., Mbarane, V., Bordado, J.C., and Sardinha, J.P. 2021. Plastic pollution: a perspective on matters arising: challenges and opportunities. *ACS Omega*, 6: 19343–19355.
- [2] Lucia, L.A., Argyropoulos, D.S., Adamopoulos, L., and Gaspar, A.R. 2007. Chemicals, materials, and energy from biomass: A review. *Materials, Chemicals, and Energy from Forest Biomass*. Chapter 1, Pp: 2-30.
- [3] <https://www.fao.org/forestry/statistics/80571/en/>
- [4] Bhardwaj, S., Bhardwaj, a.b., and Negi, N.K.a. 2019. Cleaner approach for improving the papermaking from agro and hardwood blended pulps using biopolymers. *Journal of Cleaner Production*. Volume 213, Pp 134-142.
- [5] Tewari, P.K., Batra, V., and Balakrishnan, M. 2009. Efficient water use in industries: cases from the Indian agro-based pulp and paper mills. *Journal of Environmental Management*. 90(1): Pp 265-73.
- [6] Afiqah, A.N., Sapuan, S.M., and Ilyas, R.A. 2021. Pulp and paper production: A review. *Seminar on Advanced Bio- and Mineral based Natural Fibre Composites*. Pp 10-13.
- [7] Huang, G.T. 2011. Dental pulp and dentin tissue engineering and regeneration: Advancement and challenge. *Front. Biosci. Elite Ed.*, 3, Pp 788–800.
- [8] Sharma, P., Sood, C., Singh, G., and Capalash, N. 2015. An eco-friendly process for biobleaching of eucalyptus kraft pulp with xylanase producing bacillus halodurans. *Journal of Cleaner Production*. 87, Pp 966-970
- [9] Zhang, X., Li, J., Gong, J., Kuang, Y., He, S., Xu, J., Mo, L., Man, Y., Zhu, W., Song, J., and Song, T. 2020. Cleaner approach for medium consistency eucalyptus slab pulp production using ozone bleaching under turbulent mixing. *Journal of Cleaner Production*. Volume 276, Pp 124-201.
- [10] Chen, H., Wang, Y., Qiu, J., Song, J., Wang, J., Liu, M., Wo, Q., Jiang, L., and Yang, T. 2022. Properties and application of kraft pulp prepared from waste bamboo powder, *BioResources* 17(4), Pp 6262-6276.
- [11] Xu, Y., and Li, X. (2013). "Recent advance in non-wood fiber pulping technology for desilication," *Journal of Shaanxi University of Science and Technology*. 3(1), Pp 18-22.
- [12] Mossello, A.A., Jalaluddin, H., Tahir, P.M., Resalti, H., Ibrahim, R., Fallah Shmsi, S.R., and Mohmamed, A.Z. 2010. "A review of literatures related of using kenaf for pulp production (beating, fractionation, and recycled fiber) *Modern Applied Science*., vol. 4, no. 9, Pp 21-29.
- [13] Jiménez, L., Serrano, L., Rodríguez, A., and Sánchez, R. 2009. Soda-anthraquinone pulping of palm oil empty fruit bunches and beating of the resulting pulp. *Bioresource Technology*. Volume 100, Issue 3, Pp 1262-1267
- [14] Yue, W., Cai, Y., Rong, Q., Cao, L., and Wang, X. 2014. A hybrid MCDA-LCA approach for assessing carbon footprints and environmental impacts of China's paper producing industry and printing services. *Environmental Systems Research*. 3(1): 4
- [15] Chinga-Carrasco, G., and Syverud, K. 2014. Pretreatment-dependent surface chemistry of wood nano cellulose for pH-sensitive hydrogels. *Journal of Biomaterials Applications*. 29(3). Pp 423-432.
- [16] Li, X., Ye, J., Chen, J., Yu, J., Ding, M. and Hong, J., 2015. Dissolution of wheat straw with aqueous NaOH/Urea solution. *Fibers and Polymers*, 16(11), Pp 2368-2374.
- [17] Jour, P., Halldén, K., and Wackerberg, E. 2013. Environmental systems analysis of alternative bleaching sequences with focus on carbon footprint. *The 46th ABTCP International Pulp and Paper Congress*, 8-10. Sao Paulo, Brazil.
- [18] CPI. 2021. Environmental aspects of ecf and tcf chemical woodpulp bleaching. [https://thecpi.org.uk/library/PDF/Public/Publications/Fact%20Sheets/FS\\_ECF\\_TCF.pdf](https://thecpi.org.uk/library/PDF/Public/Publications/Fact%20Sheets/FS_ECF_TCF.pdf)
- [19] Requejo, A., Rodríguez, A., Colodette, J.L., and Jiménez, L. 2012. TCF bleaching sequence in kraft pulping of olive tree pruning residues. *Bioresource Technology*. 117(8). Pp117-23.
- [20] Mirshokraei, S.A. 2003. *Pulp and paper technologists*. Ayije press. Second edition. 501p. (In Persian)
- [21] Goli, M., Zabihzadeh, M., Asadpour, G., and Barzan, A. 2016. Evaluation alternative in mwpi's newsprint production with mixture of species on the properties of cmp paper. *J. of Forest and Wood*. 39: 3. 625-635 . (In Persian)
- [22] Saraeian, A.R., Khalili, A., Aliabadi, M., and Dahmardeh, M. 2008. Comparison of Soda and Kraft Pulp Properties of Populus deltoids Sapwood and Heartwood. *Journal of Wood and Forest Science and Technology*, 17(4). Pp125-137. (In Persian)
- [23] Copar, Y., and Tozluglu, A. 2007. A comparison of kraft, kraft-AQ, kraft NaBH pulp of brutia pine. *Bioresources technology*, 63. Pp 536-542.
- [24] Ghasemian, A., and Armand, Kh. 2020. CMP pulp bleaching using hydrogen peroxide and sodium hypochlorite. *Iranian Journal of Wood and Paper Science Research* Vol. 35 No. (1). (In Persian)

## Feasibility Study of Wood Chipper Fines for Producing Bleached Cellulosic Pulps: A Case Study of Mazandaran Wood and Paper Industries

### Abstract

The scarcity of cellulose fiber resources in the country, along with stringent forest protection laws and environmental regulations on the import of raw wood, presents challenges for wood fiber factories in securing cellulose starting materials. Consequently, these companies are actively exploring alternative sources with optimal efficiency. This research investigates the feasibility of using wood chipper fines for the production of bleached cellulosic pulps. For this purpose, chipper fines from Mazandaran Wood and Paper Industries were processed using a soda-anthraquinone pulping method, followed by bleaching with D<sub>0</sub>ED<sub>1</sub>P and HEP sequences. The study considered three pulping variables: active alkalinity (levels: 14, 16, 18, and 20%), cooking time at maximum temperature (levels: 60, 90, and 120 minutes), and the ratio of liquor to the dry weight of the wood fines (levels: 5:1 and 6:1). The pulping process was maintained at a constant temperature of 165 degrees Celsius, with a consistent 0.2% anthraquinone concentration. A factorial test design (randomized complete blocks) was employed to analyze the impact of these variables on the yield, kappa number, and viscosity of the bleached cellulose pulps. Additionally, the effects of each bleaching sequence on lignin content, yield, viscosity, degree of polymerization, and molecular weight of the cellulose pulp were determined. The findings revealed that intensified cooking conditions led to decreases in kappa number, yield, and viscosity. The influence of active alkali was more significant than that of the other two variables, confirming the importance of the percentage of active alkali, cooking time, and liquor-to-wood ratio as factors. Optimal cooking conditions (yield: 49.5%; kappa number: 49.45; viscosity: 1096 ml/g) were identified at 20% active alkali, 120 minutes of cooking time, and a 6:1 liquor-to-dry weight ratio. The D<sub>0</sub>ED<sub>1</sub>P bleaching sequence demonstrated higher efficiency compared to the HEP sequence at the same kappa number, highlighting the superior selectivity of chlorine dioxide over sodium hypochlorite. Notably, the initial stages of the bleaching sequences (D<sub>0</sub> and H) exhibited the most significant reductions in kappa number, viscosity, yield, degree of polymerization, and molecular weight, attributed to easier access to lignin and the reduced selectivity of sodium hypochlorite, causing carbohydrate degradation. Wood chipper fines undergo less intense treatment compared to standard wood chips. The research underscores the substantial capability of wood chipper fines in producing bleached cellulosic pulps under mild pulping conditions, maintaining the degree of polymerization and yield. This holds promise for enhancing the properties of mechanical writing and printing papers produced by Mazandaran Wood and Paper Industries.

**Keywords:** Chipper fines, Anthraquinone soda pulping, DEDP bleaching sequence, HEP bleaching sequence.

A. Brimani<sup>1</sup>  
A. Ghasemian<sup>2\*</sup>  
E. Afra<sup>3</sup>  
S. R. Djafaripetroudy<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Ph.D. Student, Dept. of Paper Sciences and Engineering, Faculty of Wood and Paper Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran

<sup>2</sup> Professor, Dept. of Paper Sciences and Engineering, Faculty of Wood and Paper Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran

<sup>3</sup> Associate Prof., Dept. of Paper Sciences and Engineering, Faculty of Wood and Paper Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran

<sup>4</sup> Assistant Professor & Bio-refining Research Chair in Lignocellulosic Materials Development, Natural Resources Management faculty, Lakehead University, Ontario, Canada

Corresponding author:  
[ghasemian@gau.ac.ir](mailto:ghasemian@gau.ac.ir)

Received: 2023/11/21  
Accepted: 2024/01/18