

## تأثیر اختلاط الکل‌های مختلف بر ویژگی‌های خمیر کاغذ حاصل از فرآیند جزء‌سازی دی‌اکسید گوگرد- الکل-آب (SAW)

### چکیده

تحقیق حاضر با هدف بررسی تأثیر اختلاط انواع مختلف الکل‌ها شامل متانول، ایزوپروپانول و ۲-متیل-۲-پروپانول با اتانول (الکل متداول در فرآیند جزء‌سازی SAW) بر ویژگی‌های خمیر کاغذ حاصل انجام گرفته است. درصد اختلاط هر یک از سه الکل ذکر شده با اتانول به میزان صفر، ۵، ۱۰، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد در نظر گرفته شد. در این تحقیق، از چوب کاج الدار (*Pinus eldarica*) برای عملیات تهیه خمیر کاغذ استفاده گردید. بر اساس نتایج، ضرایب زاویه رگرسیون خطی رابطه بین عدد کاپا و لیگنین باقی‌مانده در خمیر کاغذ مربوط به جزء‌سازی با اتانول، متانول، ایزوپروپانول و ۲-متیل-۲-پروپانول به ترتیب ۰/۱۵۳، ۰/۱۵۱، ۰/۱۵۱ و ۰/۱۴۸ بود. با افزایش درصد متانول (از صفر به ۱۰۰ درصد وزنی/وزنی) در اختلاط با اتانول، مقدار لیگنین باقی‌مانده و بازده کل خمیر کاغذ (بدون هیچ‌گونه وازده) افزایش می‌یابد. با توجه به شکل گزینندگی، با اضافه کردن ۵ الی ۱۰ درصد از هر یک از سه الکل مورد بررسی به جای معادل وزنی اتانول، خمیر کاغذ حاصل ویژگی‌های متفاوتی ایجاد نمود. اضافه کردن این مقدار متانول موجب افزایش بازده خمیر کاغذ همراه با افزایش درصد لیگنین آن می‌شود. افزودن این مقدار ۲-متیل-۲-پروپانول موجب کاهش بازده خمیر کاغذ همراه با افزایش درصد لیگنین آن می‌گردد و افزودن این مقدار ایزوپروپانول موجب کاهش مقدار لیگنین خمیر کاغذ همراه با کاهش بازده آن می‌شود. به‌طور کلی نتایج این مطالعه نشان داد که امکان استفاده از الکل‌های متانول و ایزوپروپانول به‌صورت خالص و یا در ترکیب با اتانول در فرآیند SAW وجود دارد.

واژگان کلیدی: اختلاط الکل‌ها، بازده خمیر کاغذ، دی‌اکسید گوگرد- الکل-آب (SAW)، فرآیند جزء‌سازی.

علی اصغر تاتاری<sup>۱</sup>  
 محمدرضا دهقانی فیروزآبادی<sup>۲\*</sup>  
 علی قاسمیان<sup>۳</sup>

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

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

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

مسئول مکاتبات:

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

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۹/۱۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۱/۱۳

### مقدمه

در میان فرآیندهای شیمیایی و حلال آلی مورد استفاده در تهیه خمیر کاغذ، روش جزء‌سازی دی‌اکسید گوگرد- اتانول-آب (SEW) توجه زیادی را به خود جلب کرده است [۱]. این روش شامل جداسازی

خالص‌سازی اجزای مختلف مواد لیگنوسلولزی با استفاده از ترکیب گاز دی‌اکسید گوگرد، اتانول و آب می‌باشد [۲]. شیمی و واکنش‌های اصلی فرآیند SEW مشابه فرآیند سولفیت اسیدی است [۳]. این فرآیند در صنایع سلولزی [۴] و سوخت‌های زیستی [۵] کاربرد زیادی دارد. دی-

الداریکا یا کاج تهران نیز شناخته می‌شود [۱۰]، پتانسیل و کاربردهای قابل توجهی در صنعت کاغذسازی دارد. خواص خمیر کاغذ حاصل از گونه کاج الدار مانند طول الیاف، ویژگی‌های فیزیکی (به‌ویژه نوری) و مکانیکی، عواملی مهم در تعیین به‌کارگیری آن برای انواع مختلف کاغذ هستند [۱]. استفاده از الکل‌های مختلف به‌عنوان حلال کمکی در فرآیند SAW پتانسیل‌های متنوعی را برای بهبود و بهینه‌سازی این فرآیند و جداسازی مواد لیگنوسولوزی ارائه می‌دهد. هر الکل به‌عنوان یک حلال کمکی دارای ویژگی‌ها و خصوصیات منحصر به فردی است. علاوه بر اتانول که حلال متداول مورد استفاده در این فرایند است، متانول و ایزوپروپانول نیز برای اجرای این فرآیند پتانسیل مناسبی دارند [۹]. این پتانسیل تنوع در انتخاب الکل‌ها می‌تواند به محققان و صنایع مختلف کمک کند تا به نتایج بهتری در این فرآیند دست یابند و کاربردهای گسترده‌تری را در صنایع مختلف تحقق بخشند. تنوع در انتخاب الکل‌ها و اختلاط مختلف آن‌ها می‌تواند به تنظیم دقیق‌تر و بهینه‌تر فرآیند SAW برای دستیابی به خواص مورد نظر کمک کند و امکان جداسازی اجزای خاص را فراهم نماید. در این مطالعه تأثیر اختلاط الکل‌های مختلف بر ویژگی‌های خمیر کاغذ کاج الدار در فرآیند SAW مورد بررسی قرار گرفته است.

## مواد و روش‌ها

### تهیه مواد اولیه

در این تحقیق، از چوب کاج الدار برای عملیات تهیه خمیر کاغذ استفاده شد. ویژگی‌های چپس و جزئیات آنالیزهای شیمیایی انجام شده در خصوص این چوب به تفصیل در گزارش منتشر شده قبلی [۸] ارائه شده است. در این مطالعه از الکل‌های متانول، ایزوپروپانول و ۲-متیل-۲-پروپانول به‌منظور اختلاط با اتانول (همگی تهیه‌شده از شرکت مرک آلمان) به‌عنوان حلال استفاده شد. ویژگی‌های این الکل‌ها در جدول ۱ ارائه شده است.

اکسید گوگرد به‌عنوان یک حلال قوی عمل می‌کند و قادر به استخراج و جداسازی ترکیبات مختلف بر اساس حلالیت آن‌ها است. الکل و آب به‌عنوان حلال‌های کمکی عمل می‌کنند و کارایی فرآیند جزء‌سازی را افزایش می‌دهند [۶].

از ابتدای توسعه فرآیند SEW در زمینه جزء‌سازی مواد لیگنوسولوزی تا حال حاضر، این روش از طریق تحقیقات گسترده به‌تکامل خود ادامه داده و فرصت‌های متعددی را برای تحقیق و توسعه آینده ارائه کرده است. این زمینه‌های تحقیقاتی شامل بهینه‌سازی پارامترهای فرآیند برای افزایش راندمان جداسازی، کاوش در استفاده از حلال‌های جدید و کشف کاربردهای نوآورانه در صنایع مختلف می‌باشد. در نظر گرفتن اثرات زیست‌محیطی، اقدامات احتیاطی ایمنی و تحقیقات مداوم برای اطمینان از استفاده پایدار و مؤثر از این تکنیک بسیار مهم است [۷]. از آنجا که اخیراً استفاده از الکل‌های مختلف و مقایسه آنها با اتانول مورد توجه محققین قرار گرفته، نام فرآیند SEW به SAW (دی‌اکسید گوگرد-الکل-آب) تغییر یافته است [۹].

Tatari و همکاران (۲۰۲۳) در مطالعه اثر غلظت اتانول مایع پخت فرآیند جزء‌سازی SEW بر ویژگی‌های خمیر کاغذ کاج الدار (*Pinus eldarica*) گزارش کردند که با افزایش غلظت اتانول تا سطح ۵۳ درصد، مقدار بازده خمیر کاغذ کاهش می‌یابد و با افزایش آن تا سطح ۷۴ درصد، افزایش می‌یابد. با افزایش غلظت اتانول از عدد کاپای خمیر کاغذ کاسته می‌شود و در غلظت‌های بیشتر، این روند معکوس می‌گردد. افزایش اندک pH مایع پخت (با افزایش غلظت اتانول)، موجب کاهش قابل ملاحظه درجه روشنایی خمیر می‌گردد [۸]. Sharazi و همکاران (۲۰۱۸) در مطالعه اثر نوع حلال بر لیگنین به‌دست آمده از جزء‌سازی باگاس نیشکر به‌روش SAW گزارش کردند که در این فرآیند، میزان لیگنین باقی‌مانده در خمیرهای حاصل از جزء‌سازی با ایزوپروپانول، کمتر از اتانول و متانول است [۹]. کاج الدار که به نام‌های کاج

جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی الکل‌های مورد استفاده.

ویژگی	اتانول	متانول	ایزوپروپانول	۲- متیل-۲- پروپانول
	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH	CH <sub>3</sub> OH	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> O	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> O
فرمول شیمیایی				
وزن مولی (گرم بر مول)	۴۶/۰۷	۳۲/۰۴	۶۰/۱	۷۴/۱۲
نقطه جوش (درجه سانتی‌گراد)	۷۸/۳	۶۴/۵	۸۲/۴	۸۲
pH	۷/۳۳	۸-۷/۳	۶/۷-۵	۷
دانسیته (گرم بر سانتی‌متر مکعب)	۰/۷۸۹	۰/۷۹۲	۰/۷۸۶	۰/۷۸۱
قیمت تجاری هر گالن آمریکایی (دلار) *	۲/۷۹	۲/۳۵	۲۶-۲۲	۲۲

\* [۱۱]

گرفته شد. برای هر پخت، به‌طور ثابت از ۲۰ گرم خرده-چوب با نسبت مایع پخت به چوب ۶ به ۱ در مینی-دیگ‌های ۵۰۰ میلی‌لیتری استفاده شد. تهیه خمیر کاغذ با این مینی‌دیگ‌ها در دایجستر آزمایشگاهی ساخت شرکت Frank-PTI کشور اتریش (شکل ۱) در دمای ۱۳۵ درجه سانتی‌گراد و با مدت زمان ثابت ۶۰ دقیقه انجام گرفت. در پایان پخت، دیگ‌ها به‌سرعت در آب سرد قرار داده شدند. سپس، مایع پخت باقی‌مانده در یک کیسه نایلونی، از مواد جامد جدا شد. باقی‌مانده جامد به‌دست آمده از هر دیگ، ۲ بار با ۱۲۰ میلی‌لیتر محلول آب-اتانول (۴۰ درصد حجمی/حجمی با دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد) و در نهایت با آب یون‌زدایی شده در دمای محیط شستشو داده شد [۶].

### فرآیند جزء‌سازی SAW

مایع پخت فرآیند SAW شامل دی‌اکسید گوگرد، الکل و آب است که مطابق دستورالعمل آزمایشگاهی ارائه‌شده توسط محققین مختلف برای مطالعه فرآیند SAW مورد استفاده قرار گرفته است [۴-۱]. مایع پخت سفید با تزریق مستقیم گاز دی‌اکسید گوگرد در محلول آب-الکل سرد (صفر درجه سانتی‌گراد، حمام یخ) تهیه شد. در این تحقیق، مقدار گاز دی‌اکسید گوگرد برای همه مایع‌های پخت به‌طور ثابت ۱۲ درصد وزنی/وزنی منظور شد. مقدار الکل مورد استفاده نیز به‌میزان ۴۴ درصد وزنی/وزنی مایع پخت بود. درصد اختلاط هر یک از الکل‌های متانول، ایزوپروپانول و ۲-متیل-۲-پروپانول با اتانول به-میزان صفر، ۵، ۱۰، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد در نظر



شکل ۱- (الف) دایجستر و (ب) مینی‌دیگ پخت مورد استفاده.

عبور نکردند) اندازه‌گیری گردید. بازده کل خمیر کاغذ با افزودن بازده خمیر غربال‌شده به مقدار بازده خمیر کاغذ محاسبه شد. مقدار لیگنین غیر محلول در اسید، لیگنین محلول در اسید و عدد کاپای خمیرهای کاغذ، به‌ترتیب طبق دستورالعمل‌های شماره T 222-om-02، T 250 Um و T 236 cm-99 استاندارد TAPPI تعیین گردید.

### تعیین ویژگی‌های خمیر

میزان رطوبت خمیر کاغذها بر اساس دستورالعمل شماره T 412 cm-02 و بازده خمیر غربال‌شده بر اساس دستورالعمل شماره T 210 cm-03 استاندارد TAPPI تعیین شد. مقدار بازده خمیر کاغذ (یعنی ذراتی که از شکاف‌های ۰/۸۴۱ میلی‌متری غربال با مش شماره ۲۰

مورد استفاده در این تحقیق اندازه‌گیری شد. مقدار لیگنین محلول در اسید در همه خمیرهای مورد مطالعه صفر بود. با ترسیم نمودار عدد کاپا- لیگنین کل باقی‌مانده در خمیر کاغذ، معادله رگرسیون خطی مربوطه به‌دست آمد. ضرایب زاویه رگرسیون خطی رابطه بین عدد کاپا و لیگنین باقی‌مانده مربوط به جزء-سازای با اتانول، متانول، ایزوپروپانول و ۲-متیل-۲-پروپانول خالص به-ترتیب ۰/۱۵۳، ۰/۱۵۱، ۰/۱۵۱ و ۰/۱۴۸ بود (شکل ۲). van Heiningen و Iakovlev (۲۰۱۱) گزارش کردند که رابطه بین مقدار لیگنین باقی‌مانده و عدد کاپا (ضریب زاویه) در خمیرهای SEW مشابه خمیرهای سولفیت است [۱۲]. Brogdon (۲۰۰۱) گزارش کرد که با افزایش مقدار ساختارهای لیگنین اکسید شده در لیگنین باقی‌مانده خمیر کاغذ رنگ‌بری شده، یعنی کینون‌هایی که پرمنگنات کمتری مصرف می‌کنند، همبستگی بین لیگنین و عدد کاپا از ۰/۱۵ به ۰/۱۸ تغییر می‌کند [۱۳].

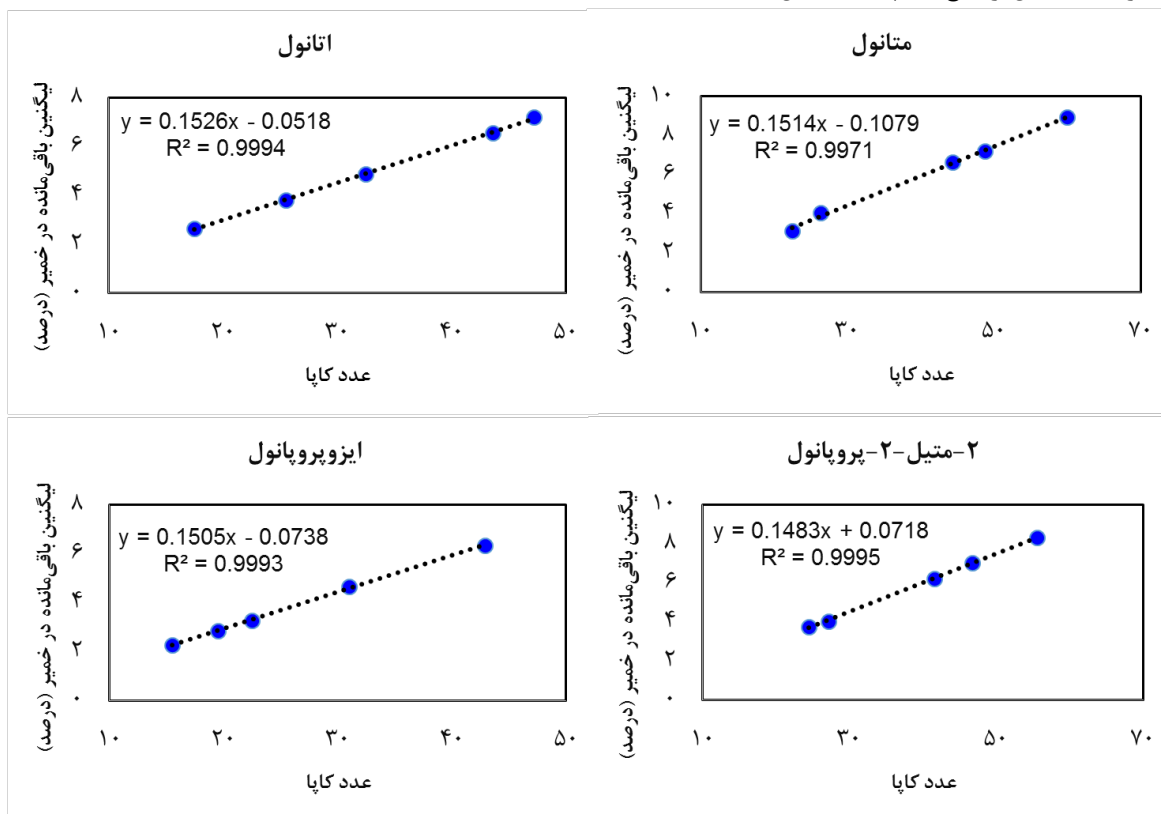
### تعیین ضریب زاویه رگرسیون خطی رابطه بین عدد کاپا و لیگنین باقی‌مانده در خمیر کاغذ

برای تعیین ضریب زاویه رگرسیون خطی، لیگنین باقی‌مانده در خمیرهای کاغذ در مقابل عدد کاپای محاسبه شده آن‌ها در یک نمودار قرار گرفت. پس از ترسیم رگرسیون خطی برازش‌کننده به نقاط به‌دست آمده (با استفاده از نرم‌افزار اکسل ۲۰۲۱) در هر نمودار، شیب هر خط که همان ضریب زاویه رگرسیون‌های خطی می‌باشند، محاسبه شد.

### نتایج و بحث

#### رابطه بین عدد کاپا و لیگنین خمیر کاغذ (تعیین ضریب زاویه)

بر اساس روش قید شده در بخش مواد و روش‌ها، لیگنین محلول و غیر محلول در اسید و عدد کاپای پنج خمیر کاغذ حاصل از مایع‌های پخت با الکل‌های مختلف



شکل ۲- رابطه بین عدد کاپا و لیگنین باقی‌مانده در خمیر کاغذ (تعیین ضریب زاویه).

کند [۱۷]. اتانول و متانول هر دو الکل‌های متداول در فرآیندهای حلال آلی هستند؛ اما اتانول با سمیت کمتر و کاربرد گسترده‌تر در صنایع تهیه خمیر کاغذ، به‌عنوان یک انتخاب مطلوب شناخته می‌شود. همچنین، متانول نیز مزایای زیادی در تهیه خمیر کاغذ دارد. برای مثال، تولید مقدار کمی متانول در طول واکنش‌های خمیرسازی، می‌تواند تلفات را در طول فرآیند بازیابی جبران نماید [۱۵]. با این حال، محدودیت‌های کاربردی به‌دلیل سمیت بیشتر متانول، ممکن است انتخاب بین این دو الکل را منوط به شرایط خاص و موارد مرتبط با صنعت و فرآیند نماید.

### تأثیر اختلاط ایزوپروپانول با اتانول بر بازده و لیگنین باقی‌مانده در خمیر

نتایج نشان داد که ترکیب ایزوپروپانول ۱۰ درصد با اتانول در مقایسه با اتانول خالص، لیگنین‌زدایی را بهبود می‌بخشد. همچنین بیانگر این است که مقادیر نسبتاً بیشتری از لیگنین و کربوهیدرات‌ها در طول جزء‌سازی با ایزوپروپانول خالص نسبت به اتانول خالص حل می‌شود (شکل ۴). در مقایسه اتانول و ایزوپروپانول می‌توان بیان کرد که هر دو الکل در صنعت خمیرسازی به‌عنوان الکل‌های مهمی شناخته می‌شوند. اتانول با حلالیت زیاد، به‌خوبی با دیگر مواد خمیرسازی ترکیب می‌شود و می‌تواند ویژگی‌های خمیرها را بهبود بخشد. با این حال، اتانول و ایزوپروپانول به‌دلیل داشتن خواص لیگنین‌زدایی بهتر و مقررات ایمنی سخت‌گیرانه کمتر، در سیستم جزء‌سازی SAW، حلال‌های ارجح هستند [۹]. انتخاب بین این دو الکل باید با توجه به نیازها و خصوصیات مورد نیاز در فرآیند خمیرسازی صورت گیرد. تا به امروز، استفاده از ایزوپروپانول در خمیرسازی چندان متداول نبوده است، اما گزارش‌های قبلی نشان می‌دهد که افزودن ایزوپروپانول می‌تواند موجب تسریع لیگنین‌زدایی نسبت به حلال‌های دیگر شود [۹، ۱۶]. علت این موضوع می‌تواند به انحلال‌پذیری ذاتی بیشتر لیگنین در ایزوپروپانول نسبت به متانول و اتانول نسبت داده شود. توانایی الکل‌های مختلف برای انحلال لیگنین به ظرفیت پیوند هیدروژنی و پارامترهای حلالیت

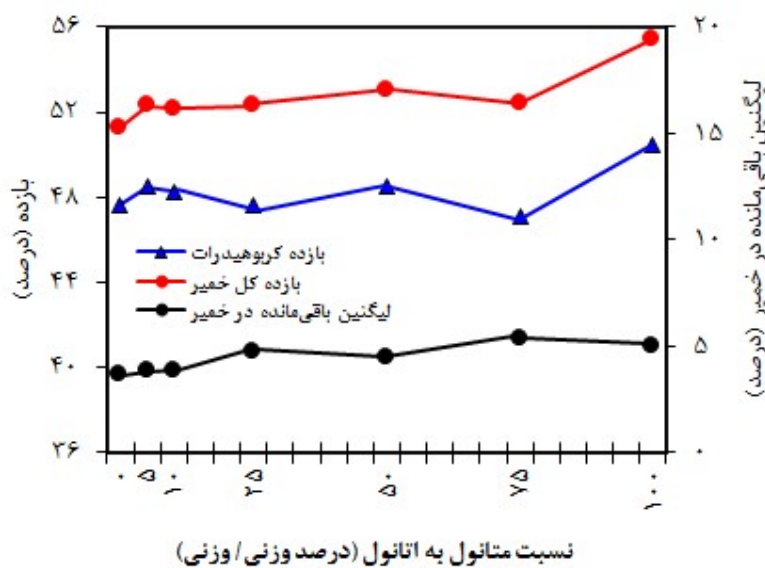
### تأثیر اختلاط متانول با اتانول بر بازده و لیگنین باقی‌مانده در خمیر

نتایج نشان داد که با افزایش درصد متانول (از صفر به ۱۰۰ درصد وزنی/وزنی) در اختلاط با اتانول، مقدار لیگنین باقی‌مانده، بازده کربوهیدرات‌ها و بازده کل خمیر کاغذ افزایش می‌یابد (شکل ۳). قابل ذکر است که هیچ بازده خمیری در نتیجه استفاده از مقادیر مختلف متانول در فرآیند SAW مشاهده نشد. علی‌رغم استفاده از دما و زمان پخت زیاد (۱۸۰ درجه سانتی‌گراد و ۱۳۵ دقیقه) در فرآیندهای تهیه خمیر کاغذ مبتنی بر متانول، وجود بازده خمیر کاغذ، همچنان یکی از معایب آن است [۱۴، ۱۵]. در این مطالعه، با اعمال دمای کمتر (۱۳۵ درجه سانتی‌گراد) و زمان کوتاه‌تر (۶۰ دقیقه)، بازده بیشتری برای خمیر کاغذ (بدون بازده) به‌دست آمده است. دلیل افزایش بازده کل خمیر و عدد کاپا در خمیرهای کاغذ تهیه شده با متانول خالص یا در ترکیب با اتانول، علاوه بر انحلال کمتر کربوهیدرات‌ها، انحلال ضعیف‌تر لیگنین در متانول نسبت به سایر الکل‌ها (اتانول و ایزوپروپانول) است [۹] که این انحلال ضعیف‌تر نیز بر اساس پارامترهای حلالیت هیلدبراند (مقدار  $\delta$ ) قابل تبیین است [۱۶]. برخلاف فرآیندهای حلال آلی دیگر که وجود بازده را در تهیه خمیر با متانول گزارش کرده‌اند [۱۵، ۱۷]، کاربرد متانول در روش SAW توانسته است خمیری با بازده کل و کربوهیدرات بیشتر تولید نماید که علی‌رغم دارا بودن درصد لیگنین بیشتر، بازده نیز نداشته باشد.

از لحاظ مزایایی مانند مصرف انرژی کمتر برای بازیابی (نقطه جوش کمتر) [۱۸] و افزایش بازده کل خمیر کاغذ (بدون بازده) به‌ویژه برای تولید کاغذهایی که نیاز به فرآیند رنگ‌بری ندارند، استفاده از متانول در فرآیند SAW می‌تواند مفید باشد. متانول به‌عنوان یک الکل مقرون به‌صرفه در نظر گرفته می‌شود (البته هر چند قیمت تجاری اتانول از متانول بیشتر است، اما از لحاظ بهره‌وری و کاربرد، این اختلاف قیمت به نفع اتانول می‌باشد). Sridach (۲۰۱۰) گزارش کرد که علاقه به خمیرسازی با اتانول و متانول نه تنها از نظر هزینه قابل توجیه است، بلکه کیفیت قابل قبول خمیر کاغذ تولیدی و سهولت بازیابی حلال نیز استفاده از اتانول و متانول را جذاب می‌-

کاج الدار) می‌باشد، تمام واحدهای آن گویایسیل و مقدار  $\delta$  آن  $27/73$  MPa0.5 در نظر گرفته می‌شود. بر اساس تئوری پارامتر حلالیت هیلدبراند، هرچه مقدار  $\delta$  بسیار و حلال نزدیک‌تر باشد، حلالیت بسیار در آن حلال بیشتر خواهد بود [۱۹]. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که در هنگام ترکیب مقادیر متفاوت ایزوپروپانول با اتانول، مقدار  $\delta$  حلال به بسیار (لیگنین) نزدیک‌تر می‌شود و از این طریق حلالیت لیگنین افزایش می‌یابد.

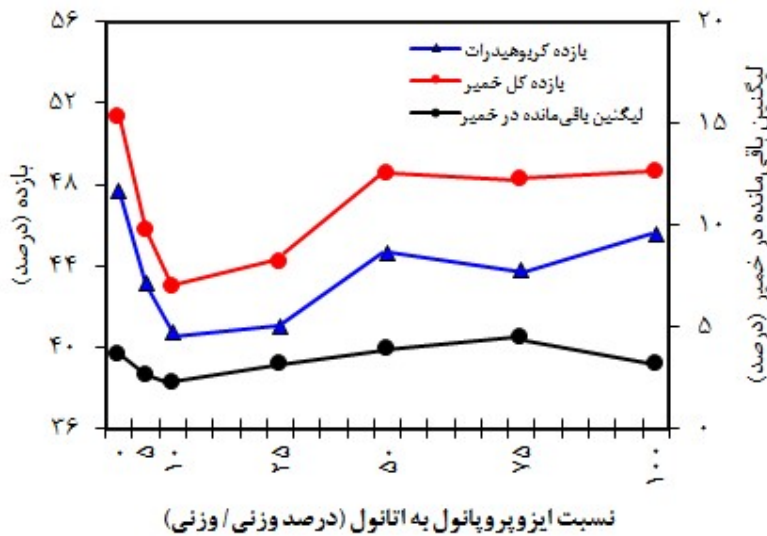
هیلدبراند ( $\delta$ ) آن بستگی دارد. بنابراین، انحلال بیشتر لیگنین در ایزوپروپانول را می‌توان بر اساس پارامترهای حلالیت هیلدبراند تبیین نمود. بر این اساس، مقدار  $\delta$  لیکور تازه تهیه شده با متانول، اتانول و ایزوپروپانول به-ترتیب  $37/03$ ،  $36/46$  و  $34/60$  MPa0.5 است. مقدار  $\delta$  برای ساختارهای معمولی واحدهای فنیل پروپان سیرینجیل، گویایسیل و پراهیدروکسی فنیل به-ترتیب  $27/73$ ،  $29/12$  و  $36/49$  MPa0.5 است [۱۶]. با توجه به اینکه گونه چوبی مورد استفاده در این مطالعه، سوزنی‌برگ



شکل ۳- اثر اختلاط متانول با اتانول بر بازده و لیگنین باقی‌مانده در خمیر کاغذ.

درصد می‌شود. با این حال، افزودن ایزوپروپانول به لیکور سولفیت-آنتراکینون خنثی تأثیر کمی بر سرعت جداسازی داشت و خمیرها بدون در نظر گرفتن ایزوپروپانول اضافه‌شده از نظر مقاومت مشابه بودند. خمیرسازی بی‌سولفیت در pH برابر ۴ با ایزوپروپانول باعث تسریع لیگنین‌زدایی شد و گزینش‌پذیرتر از خمیرسازی بدون ایزوپروپانول بود [۲۰].

Sharazi و همکاران (۲۰۱۸) در جزء‌سازی باگاس نیشکر با الکل‌های مختلف گزارش کردند که لیگنین‌زدایی این ماده با ایزوپروپانول بهتر و سریع‌تر از اتانول و متانول انجام می‌شود. افزودن ایزوپروپانول به دلیل کاهش اسیدیته، حلالیت لیگنین با وزن مولکولی بالا را افزایش می‌دهد [۹]. Sakai و Uprichard (۱۹۸۷) بیان کردند که افزودن ایزوپروپانول به لیکور سولفیت خنثی باعث تسریع لیگنین‌زدایی چوب کاج رادیاتا در محدوده ۶۰ تا ۸۰



شکل ۴- اثر اختلاط ایزوپروپانول با اتانول بر بازده و لیگنین باقی مانده در خمیر.

از زمان پخت طولانی و دمای زیاد و همچنین غلظت کم بوتانول می باشد [۲۳]. در تحقیق مرتبط دیگری، Nada و همکاران (۱۹۹۵) در خصوص تهیه خمیر کاغذ از باگاس با فرایند پخت بوتانول- آب گزارش کردند که کاربرد بوتانول تا غلظت ۵۰ درصد، لیگنین زدایی از خمیر باگاس را کاهش و تجزیه کربوهیدراتها را افزایش داده است [۲۴].

#### گزینش پذیری

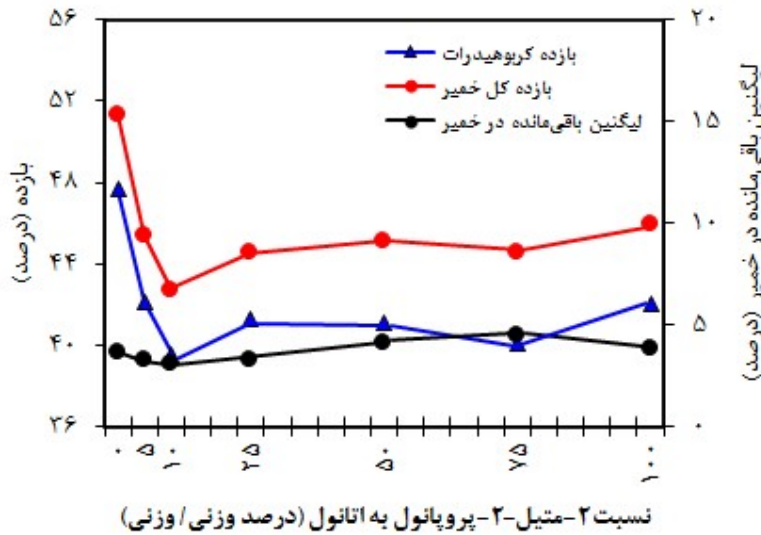
گزینش پذیری در لیگنین زدایی خمیرهای تهیه شده در فرآیند SAW با چهار نوع الکل خالص و اختلاط هر یک از سه الکل دیگر در درصدهای مختلف با اتانول در شکل ۶ ارائه شده است. با توجه به شکل، با اضافه کردن ۵ الی ۱۰ درصد از هر یک از سه الکل مورد بررسی به جای معادل وزنی اتانول، خمیر کاغذ حاصل ویژگی های متفاوتی خواهد داشت. اضافه کردن این مقدار متانول موجب افزایش بازده خمیر کاغذ همراه با افزایش درصد لیگنین آن می شود. اضافه کردن این مقدار ۲-متیل-۲-پروپانول موجب کاهش بازده خمیر کاغذ همراه با افزایش درصد لیگنین آن می گردد و اضافه نمودن این مقدار ایزوپروپانول موجب کاهش مقدار لیگنین خمیر کاغذ همراه با کاهش بازده آن می شود. نتایج بررسی گزینش پذیری همچنین

#### تأثیر اختلاط ۲-متیل-۲-پروپانول با اتانول بر بازده و لیگنین باقی مانده در خمیر کاغذ

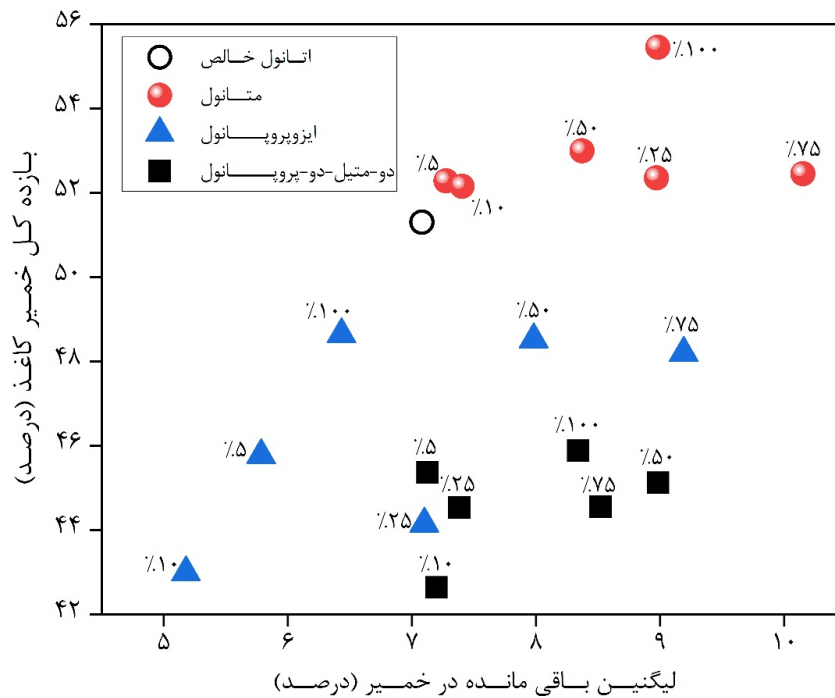
بر اساس نتایج، به نظر می رسد که ۲-متیل-۲-پروپانول تمایل بیشتری به تخریب کربوهیدراتها نسبت به ایزوپروپانول و متانول دارد. زیرا میزان لیگنین زدایی در هنگام استفاده از این الکل و نیز ترکیب این الکل با اتانول تقریباً برابر با اتانول خالص است (شکل ۵). استفاده از مقادیر ۵ و ۱۰ درصد ۲-متیل-۲-پروپانول موجب بهبود لیگنین زدایی شده است، اما در صورت استفاده از مقادیر بالاتر (۲۵، ۵۰، ۷۵ درصد یا به شکل خالص)، مقدار لیگنین باقی مانده در خمیر مجدداً افزایش یافته است. ۲-متیل-۲-پروپانول یک الکل با کشش سطحی کم است [۲۱]. به طور کلی، حلال های آلی کشش سطحی مایع پخت را در دمای زیاد کاهش می دهند و باعث نفوذ آن به داخل چپس و خروج لیگنین می شود [۲۲]. در یک تحقیق مشابه، Jiménez و همکاران (۱۹۹۹) از ترکیب آب و بوتانول برای تولید خمیر از کاه گندم استفاده کردند. آنان گزارش کردند که حساسیت بازده خمیر، pH و مقدار هولوسولوز، آلفاسولوز، لیگنین و مواد استخراجی محلول در اتانول- بنزن به تغییرات زمان پخت بسیار بیشتر از غلظت بوتانول است. به دست آوردن خمیر با مقدار سلولز زیاد مستلزم استفاده

متیل-۲-پروپانول بیشتر است. در صورتی که بازده بیشتر، هدف اصلی در تهیه خمیر کاغذ باشد، استفاده از الکل متانول در ترکیب با اتانول مناسب‌تر خواهد بود.

نشان می‌دهد که در اعداد کاپای (درصد لیگنین‌های باقی‌مانده در خمیر کاغذ) تقریباً یکسان، بازده خمیر حاصل از ترکیب اتانول و متانول همواره از ترکیب اتانول و ۲-



شکل ۵- اثر اختلاط ۲-متیل-۲-پروپانول با اتانول بر بازده و لیگنین باقی‌مانده در خمیر.



شکل ۶- گزینش‌پذیری خمیرهای کاغذ تهیه شده با الکل‌های مختلف.

## نتیجه گیری

تحقیق حاضر نشان داد که اختلاط انواع مختلف الکل ها (متانول، ایزوپروپانول و ۲-متیل-۲-پروپانول) با اتانول در فرآیند دی اکسید گوگرد-الکل-آب (SAW) می تواند تأثیر متفاوتی بر ویژگی های خمیر کاغذ داشته باشد. با افزایش درصد اختلاط متانول به اتانول در مایع پخت SAW، افزایش درصد بازده کل خمیر کاغذ اتفاق می افتد که دلیل آن افزایش درصد لیگنین و کربوهیدرات-

های آن می باشد. با افزایش تا ۱۰ درصد اختلاط ایزوپروپانول به اتانول، کاهش درصد بازده کل خمیر کاغذ روی می دهد که به دلیل کاهش درصد لیگنین و کربوهیدرات های آن است. با افزایش تا ۱۰ درصد اختلاط ۲-متیل-۲-پروپانول به اتانول نیز کاهش درصد بازده کل خمیر کاغذ اتفاق می افتد که دلیل اصلی و عمده آن، کاهش درصد کربوهیدرات های آن می باشد.

## منابع

- [1] Dehghani Firouzabadi, M., and Tatari, A., 2023. SO<sub>2</sub>-ethanol-water (SEW) and Kraft pulp and paper properties of Eldar pine (*Pinus eldarica*): a comparison study. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 1-9. DOI: 10.1007/s13399-023-03785-x.
- [2] Tatari, A., Dehghani Firouzabadi, M., Saraeyan, A., Aryaie Monfared, M. and Yadollahi, R., 2017. Effects of washing method on the bagasse pulping characteristics by sulfur dioxide-ethanol-water (SEW) process. *Iranian Journal of Wood and Paper Industries*, 7(4): 549-559. (In Persian)
- [3] Tatari, A., Dehghani Firouzabadi, M., & Ghasemian, A., 2024. SO<sub>2</sub>-alcohol-water (SAW) fractionation of Eldar pine (*Pinus eldarica*): effects of alcohol type on pulp and paper properties. *European Journal of Wood and Wood Products*, 82: 833-847.
- [4] Yadollahi, R., Dehghani Firouzabadi, M., Resalati, H., Borrega, M., Mahdavi, H., Saraeyan, A., & Sixta, H., 2018. SO<sub>2</sub>-ethanol-water (SEW) and kraft pulping of giant milkweed (*Calotropis procera*) for cellulose acetate film production. *Cellulose*, 25: 3281-3294.
- [5] Sklavounos, E., Iakovlev, M., & van Heiningen, A., 2013. Study on conditioning of SO<sub>2</sub>-ethanol-water spent liquor from spruce chips/softwood biomass for ABE fermentation. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 52(11): 4351-4359.
- [6] Iakovlev, M., You, X., van Heiningen, A. and Sixta, H., 2014. SO<sub>2</sub>-ethanol-water (SEW) fractionation of spruce: kinetics and conditions for paper and viscose-grade dissolving pulps. *RSC Advances*, 4(4): 1938-1950.
- [7] Tatari, A., Dehghani Firouzabadi, M., Saraiyan, A. and Aryaie Monfared, M., 2017. Comparative study of the characteristics of pulp and paper prepared by sulfur dioxide-ethanol-water (SEW) and soda from bagasse fiber. *Journal of Wood and Forest Science and Technology*, 24(3): 221-240. (In Persian)
- [8] Tatari, A., Dehghani Firouzabadi, M. and Ghasemian, A., 2023. The effect of ethanol concentration of the SO<sub>2</sub>-ethanol-water (SEW) process liquor on the characteristics of Eldar pine (*Pinus eldarica*) pulp. *Forest and Wood Products*, 76(1): 1-10. (In Persian)
- [9] Sharazi, A. M., van Heiningen, A. R. P., Summerskii, I., & Bacher, M., 2018. Sugarcane straw lignin obtained by sulfur dioxide-alcohol-water (SAW) fractionation: Effect of solvent. *Industrial Crops and Products*, 115: 235-242.
- [10] Sadeghi, M., Zolfaghari, B., Jahanian-Najafabadi, A. and Abtahi, S.R., 2016. Anti-pseudomonas activity of essential oil, total extract, and proanthocyanidins of *Pinus eldarica* Medw. bark. *Research in Pharmaceutical Sciences*, 11(1): 58-64.
- [11] <https://www.globalpetrolprices.com>. Visited at November 14, 2023.

- [12] Iakovlev, M., & van Heiningen, A., 2011. SO<sub>2</sub>-ethanol-water (SEW) pulping: I. Lignin determination in pulps and liquors. *Journal of wood chemistry and technology*, 31(3): 233-249.
- [13] Brogdon, B. N., 2001. Influence of oxidized lignin structures from chlorine dioxide delignified pulps on the kappa number test. *Journal of pulp and paper science*, 27(11): 364-368.
- [14] Kordsachia, O., Wandinger, B., & Patt, R., 1992. Some investigations on ASAM pulping and chlorine free bleaching of Eucalyptus from Spain. *Holz Als Roh-Und Werkstoff*, 50(3): 85-91.
- [15] Oliet, M., Garcia, J., Rodriguez, F., & Gilarranz, M. A., 2002. Solvent effects in autocatalyzed alcohol-water pulping: comparative study between ethanol and methanol as delignifying agents. *Chemical Engineering Journal*, 87(2): 157-162.
- [16] Sharazi, A. M., & Van Heiningen, A., 2017. Kinetics of sulfur dioxide-alcohol-water (SAW) pulping of sugarcane straw (SCS). *TAPPI Journal*, 16(6): 314-329.
- [17] Sridach, W. 2010. The environmentally benign pulping process of non-wood fibers. *Suranaree Journal of Science & Technology*, 17(2): 105-123.
- [18] Moradbak, A., Tahir, P. M., Mohamed, A. Z., Peng, L. C., & Halis, R., 2016. Effects of alkaline sulfite anthraquinone and methanol pulping conditions on the mechanical and optical paper properties of bamboo (*Gigantochloa scortechinii*). *BioResources*, 11(3): 5994-6005.
- [19] Hildebrand, J. H., & Scott, R. L., 1950. *The solubility of nonelectrolytes*. Reinhold Publishing Corp, New York, USA.
- [20] Sakai, K., & Uprichard, J. M., 1987. Isopropanol-sulphite pulping studies on radiata pine. *Appita*, 40(3): 193-200.
- [21] Asada, C., Katsura, K., Suzuki, A., & Nakamura, Y., 2023. Extraction, separation, and utilization of components contained in waste bamboo by pressurized microwave-assisted ethanol solvent treatment. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 13(9): 8315-8326.
- [22] Muurinen, E., 2000. *Organosolv pulping: A review and distillation study related to peroxyacid pulping*. Oulu University Press. ISBN 951-42-5660-3.
- [23] Jiménez, L., Maestre, F., & Pérez, I., 1999. Use of butanol-water mixtures for making wheat straw pulp. *Wood Science and Technology*, 33: 97-109.
- [24] Nada, A. A., Ibrahem, A. A., Fahmy, Y., & Abou-Yousef, H. E., 1995. Bagasse pulping with butanol-water system. *Research and Industry-New Delhi*, 40: 224-230.

## The effect of blending different alcohols on the properties of pulp obtained from the SO<sub>2</sub>-alcohol-water (SAW) fractionation process

### Abstract

The present study aimed to investigate the effect of blending different types of alcohols, including methanol, isopropanol, and 2-methyl-2-propanol with ethanol, the common alcohol in the SO<sub>2</sub>-alcohol-water (SAW) process. The percentage of blending each of the three mentioned alcohols with ethanol at levels of 0, 5, 10, 25, 50, 75 and 100% was considered. In this study, *Pinus eldarica* wood was used for pulping operations. According to the results, the coefficients of linear regression between the kappa number and residual lignin in the pulp related to fractionation with ethanol, methanol, isopropanol, and 2-methyl-2-propanol were 0.153, 0.151, 0.151, and 0.148, respectively. With an increase in the percentage of methanol (from 0 to 100 w/w%) in the blend with ethanol, the amount of residual lignin and the overall pulp yield (without any rejects) increased. Based on the selectivity results, adding 5 to 10% of each of the three alcohols under study instead of an equivalent weight of ethanol will result in different properties of the pulp. Adding this amount of methanol increases the pulp yield along with an increase in its lignin content. Adding this amount of 2-methyl-2-propanol reduces the pulp yield along with an increase in its lignin content, and adding this amount of isopropanol reduces the amount of pulp lignin along with a decrease in its yield. In general, the results of this study showed that it is possible to use methanol and isopropanol alcohols in pure form or in combination with ethanol in the SAW process.

**Keywords:** Blending of alcohols, Pulp yield, SO<sub>2</sub>-alcohol-water (SAW), Fractionation process.

A. Tatari<sup>1</sup>  
M. Dehghani Firouzabadi<sup>2\*</sup>  
A. Ghasemian<sup>3</sup>

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

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

<sup>3</sup> Professor, Department of Paper Science and Engineering, Faculty of Wood and Paper Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran

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

Received: 2023/12/09  
Accepted: 2024/02/02