



University of Tehran

## 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

Aliasghar Tatari<sup>1</sup> | Mohammad Reza Dehghani Firouzabadi<sup>2\*</sup> | Ali Ghasemian<sup>3</sup>

1. Department of Paper Science and Engineering, Faculty of Wood and Paper Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources (GUASNR), Gorgan, Iran. Email: [a.tatari@gau.ac.ir](mailto:a.tatari@gau.ac.ir)

2. Corresponding Author, Department of Paper Science and Engineering, Faculty of Wood and Paper Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources (GUASNR), Gorgan, Iran. Email: [mdehghani@gau.ac.ir](mailto:mdehghani@gau.ac.ir)

3. Department of Paper Science and Engineering, Faculty of Wood and Paper Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources (GUASNR), Gorgan, Iran. Email: [ghasemian@gau.ac.ir](mailto:ghasemian@gau.ac.ir)

### ARTICLE INFO

#### Article type:

Research Article

#### Article History:

Received 29 January 2023

Revised 11 April 2023

Accepted 15 April 2023

Published online 15 June 2023

#### Keywords:

Cooking liquor,

*Pinus eldarica*,

Pulp,

SO<sub>2</sub>-ethanol-water (SEW).

### ABSTRACT

The SO<sub>2</sub>-ethanol-water (SEW) fractionation process is one of the most effective and high-performance platforms for biorefining lignocellulosic materials. Determining the most appropriate percentage of chemical compounds in the cooking liquor can increase process performance. The objective of this study was to investigate the effect of ethanol concentration in SEW cooking liquor on the properties of *Pinus eldarica* pulp. To achieve this, different ethanol concentrations (26-74%, w/w) in combination with varying percentages of water and fixed 12% SO<sub>2</sub> were considered. Cooking was conducted in a laboratory digester at a maximum temperature of 135°C for 60 minutes for all treatments. The results showed that increasing the ethanol concentration to 53% decreased the pulp yield, but increasing it further to 74% increased the pulp yield. The kappa number of the pulp decreased as the ethanol concentration increased, but with a further increase in concentration, this was reversed. A slight increase in the pH of the cooking liquor (due to the increased ethanol concentration) significantly decreased pulp brightness. According to the selectivity curve, the best ethanol concentration used in the SEW process was 41%, which was consistent with the concentrations of 43.5% and 44% reported previously.

**Cite this article:** Tatari, A., Dehghani Firouzabadi, M.R., 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. *Journal of Forest and Wood Products*, 76 (1), 1-10. DOI: <http://doi.org/10.22059/jfwf.2023.354544.1239>



© The Author(s) **Publisher:** University of Tehran Press.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jfwf.2023.354544.1239>



دانشگاه تهران

## نشریه جنگل و فرآورده‌های چوب

شاپا الکترونیکی: ۰۵۳۰-۲۳۸۳

سایت نشریه: <https://jfwf.ut.ac.ir>

## اثر غلظت اتانول مایع پخت فرآیند جزءسازی دی‌اکسید گوگرد-اتانول-آب (SEW) بر ویژگی‌های خمیر کاغذ کاج الدار (*Pinus eldarica*)

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

۱. گروه علوم و مهندسی کاغذ، دانشکده مهندسی چوب و کاغذ، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: [a.tatari@gau.ac.ir](mailto:a.tatari@gau.ac.ir)
۲. نویسنده مسئول، گروه علوم و مهندسی کاغذ، دانشکده مهندسی چوب و کاغذ، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: [mdehghani@gau.ac.ir](mailto:mdehghani@gau.ac.ir)
۳. گروه علوم و مهندسی کاغذ، دانشکده مهندسی چوب و کاغذ، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: [ghasemian@gau.ac.ir](mailto:ghasemian@gau.ac.ir)

## اطلاعات مقاله

## چکیده

## نوع مقاله:

پژوهشی

## تاریخ‌های مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۰۹

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۱/۲۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۱/۲۶

تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۰۳/۲۵

## کلیدواژه:

خمیر کاغذ،

درجه روشنی،

دی‌اکسید گوگرد-اتانول-آب (SEW)،

کاج الدار،

مایع پخت.

یکی از بسترهای مؤثر و با عملکرد زیاد برای پالایشگاه‌های زیستی مواد لیگنوسلولزی، فرآیند جزءسازی دی‌اکسید گوگرد-اتانول-آب (SEW) است. تعیین مناسب‌ترین درصد ترکیبات شیمیایی مایع پخت، موجب بهره‌وری بیش‌تر این فرآیند می‌گردد. این مطالعه با هدف بررسی اثر غلظت اتانول مایع پخت فرآیند SEW بر ویژگی‌های خمیر کاغذ حاصل از چوب کاج الدار (*Pinus eldarica*) انجام شده است. بدین منظور، غلظت‌های مختلف اتانول (۷۴-۲۶ درصد وزنی/وزنی) در ترکیب با درصدهای مختلف آب و ۱۲ درصد گاز دی‌اکسید گوگرد (به‌طور ثابت برای همه پخت‌ها) در نظر گرفته شد. عملیات پخت در یک دایجستر آزمایشگاهی در دمای بیشینه ۱۳۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۶۰ دقیقه برای همه تیمارها به‌طور یکسان انجام شد. نتایج نشان داد که با افزایش غلظت اتانول تا سطح ۵۳ درصد، مقدار بازده خمیر کاهش می‌یابد و با افزایش آن تا سطح ۷۴ درصد، افزایش پیدا می‌کند. با افزایش غلظت اتانول، عدد کاپای خمیر کاهش می‌یابد و در غلظت‌های بیش‌تر، این روند معکوس می‌شود. افزایش اندک pH مایع پخت (با افزایش غلظت اتانول)، موجب کاهش قابل ملاحظه‌ی درجه روشنی خمیر می‌گردد. با توجه به نمودار گزینش‌پذیری، به نظر می‌رسد که غلظت اتانول ۴۱ درصد بهترین غلظت مورد استفاده در فرآیند SEW باشد که مناسب‌تر از غلظت‌های پیشنهادی ۴۳/۵ و ۴۴ درصد محققین قبلی است.

**استناد:** تاتاری، علی اصغر؛ دهقانی فیروزآبادی، محمدرضا؛ قاسمیان، علی (۱۴۰۲). اثر غلظت اتانول مایع پخت فرآیند جزءسازی دی‌اکسید گوگرد-اتانول-آب (SEW) بر ویژگی‌های خمیر کاغذ کاج الدار (*Pinus eldarica*). نشریه جنگل و فرآورده‌های چوب، ۷۶ (۱)، ۱۰-۱.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jfwf.2023.354544.1239>

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

© نویسندگان.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jfwf.2023.354544.1239>

## ۱. مقدمه

با توجه به افزایش سریع و پیوسته تقاضای جهانی برای فرآورده‌های سلولزی، کاهش دسترسی به ذخایر مواد لیگنوسلولزی و ایجاد قوانین سخت‌گیرانه محیط‌زیستی برای فرآیندهای متداول خمیرسازی، تأکید فزاینده‌ای بر کاربرد فرآیندهای نوظهور خمیرسازی با کارایی و بازدهی زیاد شده است [۱، ۲]. صنعت خمیر و کاغذ نیز برای سودآوری بیش‌تر، تأکید زیادی به افزایش بازده خمیر کاغذ دارد. بازده خمیر کاغذ تحت تأثیر عوامل زیادی از جمله گونه چوبی، آناتومی چوب، شیمی خمیرسازی، سامانه پخت کارخانه خمیر کاغذ، دمای پخت، ابعاد و کیفیت خرده‌چوب، عدد کاپا و سایر عوامل فرعی دیگر قرار دارد [۳].

پالایش زیستی، فرآیند جامع تبدیل زیست‌توده به سوخت‌ها، انرژی و مواد شیمیایی است [۴]. در صنعت خمیر و کاغذ، پالایش زیستی معمولاً به فناوری‌های پیشرفته برای تبدیل مؤثر بخش لیگنینی و همی سلولزی مواد لیگنوسلولزی به سوخت‌های زیستی مایع و محصولات با ارزش افزوده زیاد اطلاق می‌شود [۵]. با توجه به اهمیت پالایشگاه‌های زیستی در فرآیندهای خمیرسازی که به‌طور هم‌زمان خمیر کاغذ و مواد با ارزش افزوده زیاد تولید می‌کنند، کاربرد روش‌های جزء جزء سازی اهمیت زیادی دارد [۶، ۷]. به‌طور کلی، رویکرد روش‌های متداول خمیرسازی نمی‌تواند الزامات مفهوم پالایشگاه‌های زیستی را تأمین نماید. بازیافت مواد شیمیایی استفاده شده در بسیاری از این فرآیندها، نیازمند روش‌های پرهزینه است [۸]. فرآیند خمیرسازی و جزء جزء سازی دی اکسید گوگرد- اتانول- آب (SEW)<sup>۱</sup> با هدف رفع معایب ذکر شده معرفی شده است.

فرآیند خمیرسازی و جزء جزء سازی SEW به‌عنوان یکی از فرآیندهای جزء جزء سازی امیدوارکننده برای مواد لیگنوسلولزی در نظر گرفته می‌شود و ویژگی‌هایی مشابه فرآیند خمیرسازی سولفیت اسیدی و حلال آلی دارد [۹]. این فرآیند در حال حاضر به‌منظور جداسازی ترکیبات اصلی مواد لیگنوسلولزی (سلولز، همی سلولزها و لیگنین) با خلوص زیاد مورد استفاده قرار می‌گیرد. فرآیند SEW در اصل برای جزء جزء سازی مواد لیگنوسلولزی با اهداف پالایش زیستی توسعه یافته است، اما در گزارش‌های قبلی پتانسیل خمیر کاغذهای حاصل از آن پس از جزء جزء سازی مواد لیگنوسلولزی برای تولید طیف وسیعی از کاغذها و خمیرهای حل شونده، مثبت ارزیابی شده است [۶، ۷]. عمده‌ترین مزایای فرآیند SEW شامل کاهش زمان پخت نسبت به فرآیندهای متداول (کرافت و سودا)، استفاده از دمای کم‌تر پخت، درجه روشن‌تر بیشتر خمیر کاغذ به‌دست آمده قبل از رنگ‌بری و کاهش توالی‌های مورد نیاز برای رنگ‌بری آن است [۷، ۱۰]. در حال حاضر، با توجه به ساز و کار نامشخص شیمی این فرآیند، مطالعات و تحقیقات در این حوزه محدود به کشورهای خاص است که به‌طور انحصاری اقدام به تولید مواد با ارزش افزوده زیاد از این فرآیندها می‌کنند [۳].

نوع حلال در فرآیند SEW یک فاکتور مؤثر در لیگنین‌زدایی محسوب می‌شود. متداول‌ترین حلال‌های مورد استفاده در فرآیندهای حلال آلی، الکل‌های آلیفاتیک با وزن مولکولی کم هستند. اتانول به‌دلیل قیمت کم‌تر، دسترسی فراوان، سمیت کم، سادگی بازیابی از راه تقطیر (نقطه جوش کم (حدود ۷۹ درجه سانتی‌گراد)، لیگنین‌زدایی مطلوب‌تر، بازده بیشتر خمیر غربال شده و دستورالعمل‌های ایمنی با سخت‌گیری کم‌تر، متداول‌ترین الکل مورد استفاده در این فرآیند است [۱۱-۱۳].

نسبت حلال به آب یک عامل مهم در فرآیندهای خمیرسازی حلال آلی و تعیین‌کننده رفتار جزء جزء سازی است. تغییر نسبت حلال آلی به آب منجر به تغییر مستقیم pH مایع پخت و ویژگی‌های شیمیایی مواد لیگنوسلولزی می‌شود. این امر، تابع اسیدی هامت<sup>۲</sup> یا در دسترس بودن پروتون می‌باشد [۱۴]. گزارش‌های زیادی پیرامون فرآیند SEW منتشر شده است. از جمله مهم‌ترین این گزارش‌ها می‌توان به جزء جزء سازی گونه چوبی نوئل برای تولید خمیر حل شونده [۶]، جزء جزء سازی شاخه‌ها و سرشاخه‌های مخلوط پهن‌برگان و سوزنی‌برگان [۸] و بررسی خمیرسازی باگاس با فرآیند SEW [۱۵] که در هر سه تحقیق از ۴۳/۵ درصد اتانول (۴۴/۵ درصد آب و ۱۲ درصد گاز دی اکسید گوگرد) در ترکیب مایع پخت استفاده شده است، اشاره کرد. در تحقیقی دیگر، Sharazi و همکاران (۲۰۱۸) از نسبت ۴۴ درصد اتانول (۴۴ درصد آب و ۱۲ درصد گاز دی اکسید گوگرد) برای بررسی اثر نوع حلال در جزء جزء سازی کاه نیشکر استفاده نمودند [۱۲]. با توجه به اینکه در هیچ گزارشی تأثیر غلظت اتانول بر ویژگی‌های خمیرسازی SEW بررسی نشده است، این مطالعه به‌منظور ارزیابی تأثیر استفاده از غلظت‌های مختلف اتانول در فرآیند SEW بر ویژگی‌های خمیر کاغذ حاصل به‌اجرا درآمد.

۱- SO<sub>2</sub>-Ethanol-Water (SEW)

۲- Hammett acidity function (H<sub>0</sub>)

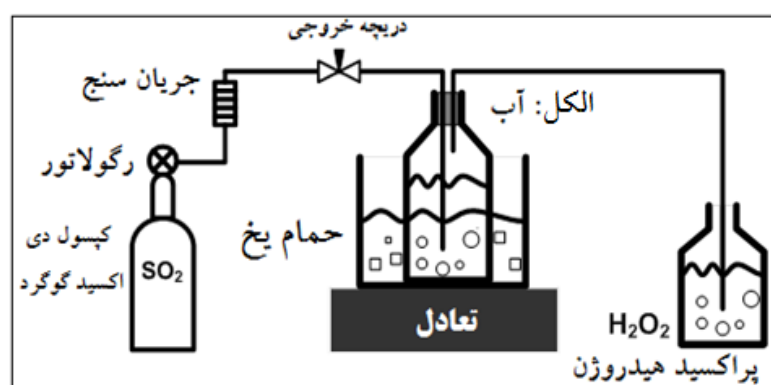
## ۲. روش شناسی پژوهش

در این تحقیق، از ارتفاع برابر سینه سه پایه کاج الدار (*Pinus eldarica*) قطع شده از جنگل آموزشی- پژوهشی شصت کلاته گرگان، سه دیسک تهیه گردید. از این سه دیسک، خرده چوب‌هایی با طول متوسط ۲۵ میلی‌متر، عرض متوسط ۱۵ میلی‌متر و میانگین ضخامت ۳ میلی‌متر تهیه و برای عملیات خمیرسازی استفاده شد. پس از تهیه پودر چوب با ابعاد استاندارد، درصد ترکیبات شیمیایی مواد اولیه براساس استانداردهای ذکر شده در جدول ۱ تعیین گردید.

جدول ۱. استانداردهای تعیین درصد ترکیبات شیمیایی مواد اولیه

استاندارد/مرجع	ترکیبات
TAPPI, T 203 cm-99	سلولز
TAPPI, T 222 om-02	لیگنین نامحلول در اسید
TAPPI, T 222 om-02	لیگنین محلول در اسید
TAPPI, T 204 cm-97	مواد استخراجی محلول در الکل- استون
TAPPI, T 211 om-02	درصد خاکستر

مایع پخت فرآیند SEW شامل دی‌اکسید گوگرد، الکل و آب است که مطابق دستورالعمل آزمایشگاهی ارائه شده توسط محققین مختلف برای مطالعه فرآیند SEW مورد استفاده قرار گرفته است [۱۰-۶]. مایع پخت سفید با تزریق مستقیم گاز دی‌اکسید گوگرد در محلول آب-اتانول سرد (صفر درجه سانتی‌گراد، حمام یخ) تهیه شد (شکل ۱). در این تحقیق، مقدار گاز دی‌اکسید گوگرد برای همه مایع‌های پخت به‌طور ثابت، ۱۲ درصد وزنی/وزنی و مقدار اتانول مایع پخت بین ۲۶-۷۴ درصد متغیر بود. برای هر پخت، به‌طور ثابت ۲۰ گرم خرده چوب با نسبت مایع پخت به چوب ۶ به ۱ در دیگ‌های ۵۰۰ میلی‌لیتری استفاده شد. خمیرسازی با این دیگ‌ها در دایجستر آزمایشگاهی (ساخت شرکت Frank-PTI کشور اتریش) در دمای ۱۳۵ درجه سانتی‌گراد و با مدت زمان خمیرسازی ثابت ۶۰ دقیقه انجام گرفت. در پایان پخت، دیگ‌ها به سرعت در آب سرد قرار داده شدند. سپس، مایع پخت باقی‌مانده در یک کیسه نایلونی از مواد جامد جدا شد. باقی‌مانده جامد به دست آمده از هر دیگ، ۲ بار با ۱۲۰ میلی‌لیتر محلول آب-اتانول (۴۰ درصد حجمی/حجمی در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد) و در نهایت با آب یون‌زدایی شده در دمای محیط شستشو داده شد.



شکل ۱. شماتیک تهیه مایع پخت فرآیند SEW [۱۵].

میزان رطوبت خمیر کاغذها براساس استاندارد TAPPI T 412 cm-02، درجه روشنی خمیر کاغذها براساس استاندارد TAPPI T 452 om-98 و بازده خمیر غربال شده براساس استاندارد TAPPI T 210 cm-03 تعیین شد. مقدار وزده خمیر کاغذ (یعنی ذراتی که از شکاف‌های ۰/۸۴۱ میلی‌متری غربال با مش شماره ۲۰ عبور نکردند) اندازه‌گیری گردید. بازده کل خمیر کاغذ با افزودن بازده خمیر غربال شده به مقدار وزده خمیر محاسبه شد. عدد کاپای نمونه‌های خمیر کاغذ با استفاده از استاندارد TAPPI

99-T 236 cm تعیین گردید. به منظور تعیین pH مایع پخت سفید و مایع پخت باقی مانده، از یک pH متر ثابت دیجیتالی (مدل ۸۲۷ pH Lab، ساخت شرکت Metrohm کشور سوئیس) استفاده شد.

### ۳. یافته‌های پژوهش و بحث

#### ۳-۱. ترکیبات شیمیایی

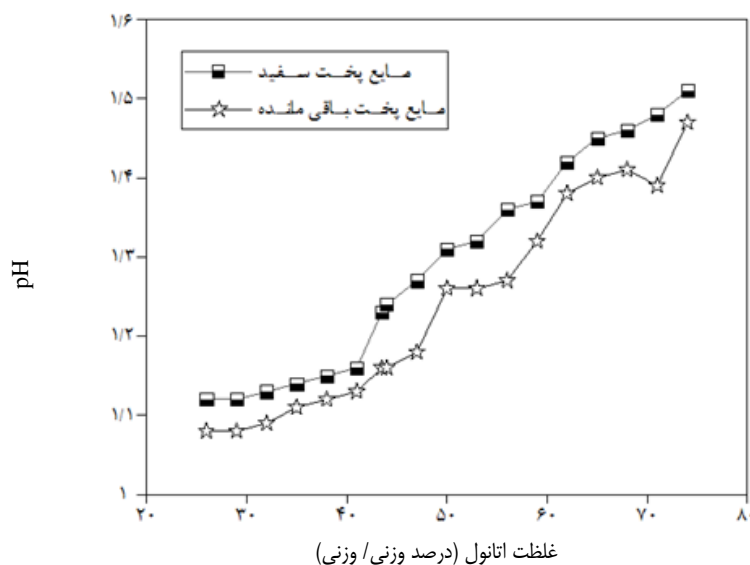
مقادیر ترکیب شیمیایی چوب کاج الدار مورد استفاده در این مطالعه در جدول ۲ ارائه شده است. براساس نتایج، کاج الدار در مقایسه با کاج بروسیا (*Pinus brutia*) دارای مقدار سلولز کم‌تر و نسبت به نوئل دارای مقدار سلولز بیش‌تری است. همچنین، مقادیر درصد لیگنین کل و مواد استخراجی محلول در الکل-استون کاج الدار با نوئل مشابه است.

جدول ۲. مقادیر ترکیبات شیمیایی چوب کاج الدار

ترکیبات (درصد)	کاج الدار [تحقیق حاضر]	کاج بروسیا [۲]	نوئل [۶]
سلولز	۴۹	۵۳/۷	۳۹/۹
لیگنین نامحلول در اسید	۲۹/۱	-	-
لیگنین محلول در اسید	۰/۵۸	-	-
لیگنین کل	۲۹/۶۸	۲۷/۷	۲۸/۹
مواد استخراجی محلول در الکل-استون	۱/۶۶	۴/۸۶	۱/۳۱
درصد خاکستر	۰/۴۹	۰/۳۶	۰/۳۹

#### ۳-۲. اثر غلظت اتانول بر تغییرات pH مایع پخت سفید و باقی مانده

شکل ۲، pH مایع پخت سفید و مایع پخت باقی مانده در خمیرسازی با غلظت‌های مختلف اتانول را نشان می‌دهد. داده‌های حاصل از تعیین pH برای تجزیه و تحلیل فرآیند SEW مهم است. مقدار pH با افزایش غلظت اتانول از مقدار اولیه خود در غلظت ۲۶ درصد وزنی/وزنی یعنی حدود ۱/۱۲ به حدود ۱/۵۱ در بیش‌ترین غلظت اتانول (۷۴ درصد) افزایش یافت. با این حال، مقادیر pH تمام مایع‌های پخت باقی مانده در همه شرایط نسبت به مایع پخت سفید خود کاهش یافت. علت اصلی کاهش pH، مایع پخت باقی مانده نسبت به مایع پخت سفید، تشکیل اسیدهای لیگنوسولفونیک در حین خمیرسازی است. تفاوت‌های اندک در pH مایع پخت سفید دارای غلظت‌های مختلف اتانول موجب تفاوت در مقدار هیدرولیز کربوهیدرات‌ها و انحلال لیگنین می‌شود. تغییرات زیاد pH در فرآیند جزءسازی با غلظت‌های مختلف اتانول بیانگر افزایش فعالیت پروتون است.

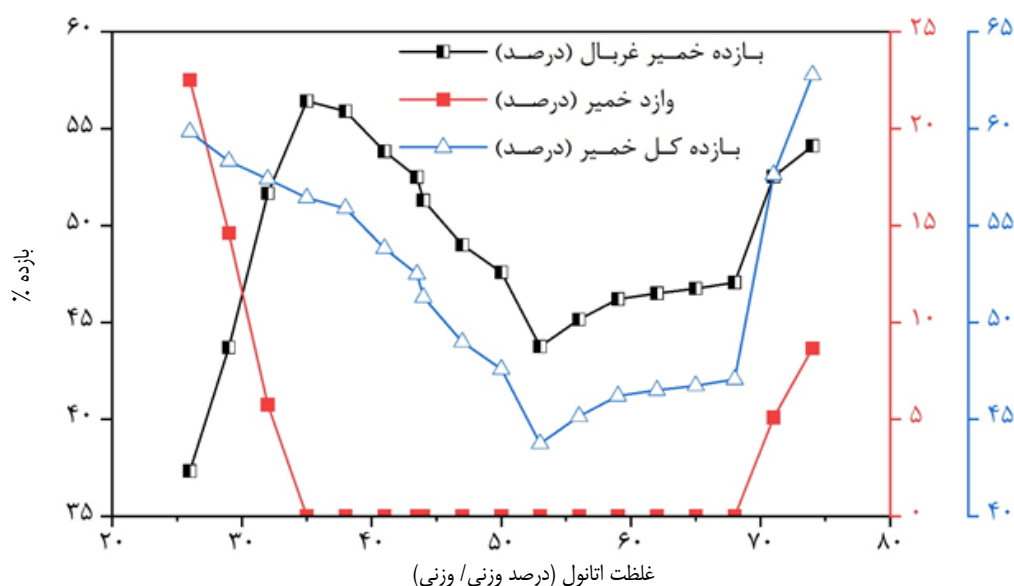


شکل ۲. اثر غلظت اتانول بر تغییرات pH مایع پخت سفید و باقی مانده

### ۳-۳. اثر غلظت اتانول بر تغییرات بازده خمیر کاغذ

اثر غلظت اتانول بر بازده خمیر کاغذ حاصل از جزءسازای به روش SEW در شکل ۳ ارائه شده است. منحنی‌های به دست آمده نشان می‌دهد که با افزایش غلظت اتانول تا سطح ۵۳ درصد وزنی / وزنی، مقدار بازده کل خمیر کاغذ، کاهش و سپس با افزایش غلظت اتانول تا سطح ۷۴ درصد، بازده کل خمیر کاغذ افزایش می‌یابد. به نظر می‌رسد که در غلظت‌های زیاد اتانول، به دلیل افزایش pH، سرعت شکست و تخریب پیوندهای لیگنین آهسته‌تر می‌گردد، در حالی که در غلظت‌های کم اتانول، سرعت نفوذ مایع پخت به داخل خرده‌چوب کاهش می‌یابد و احتمالاً واکنش‌های تراکمی<sup>۱</sup> آغاز می‌گردد [۱۴]. وجود بازده خمیر کاغذ در سمت راست و چپ شکل ۳ بیانگر این مطلب است. همچنین، به نظر می‌رسد که علت اصلی کاهش بازده کل خمیر کاغذ در اثر افزایش غلظت اتانول تا سطح ۵۳ درصد (کاهش اسیدیته)، هیدرولیز و انحلال گسترده‌تر همی سلولزها است [۱۰-۱۶]. نتایج مشابهی توسط Chong و Liew (۲۰۱۶) و Iakovlev و همکاران (۲۰۱۴) گزارش شده است [۳، ۱۴]. در تحقیق دیگری، درباره فرآیند خمیرسازی مشابه (Alcell)، Ni و Hu (۱۹۹۵) گزارش کردند که لیگنین حداکثر حلالیت را در محلول حاوی حدود ۷۰ درصد اتانول و ۳۰ درصد آب از خود نشان می‌دهد، در حالی که در ۳۰ درصد اتانول و ۷۰ درصد آب، حلالیت حدود یک پنجم است [۱۶].

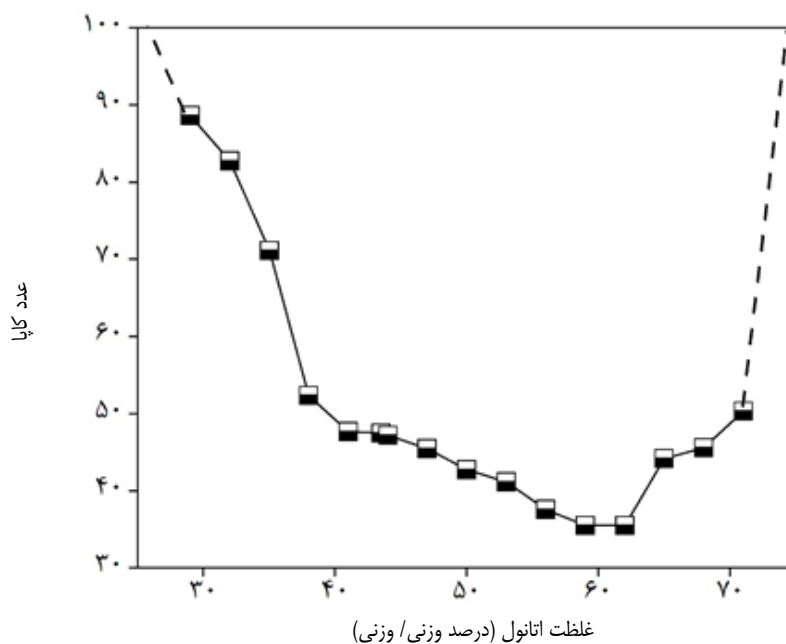
کشش سطحی مخلوط اتانول-آب با نسبت ۵۰/۵۰ در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد حدود  $3 \times 10^{-3}$  نیوتن بر متر است که نزدیک به کشش سطحی اتانول خالص ( $22/3 \times 10^{-3}$  نیوتن بر متر در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد) و بسیار کم‌تر از کشش سطحی آب ( $72/5 \times 10^{-3}$  نیوتن بر متر در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد) می‌باشد. مخلوط اتانول-آب اشباع کامل مواد لیگنوسولزی را به علت نافذ بودن به وسیله کشش سطحی مناسب فراهم می‌کنند. بنابراین، وجود اتانول، نیاز به مرحله آغشته‌سازی اولیه را حذف می‌کند و به طور کلی زمان جزءسازای را کاهش می‌دهد [۱۷]. اتانول سرعت نفوذ مایع پخت و همچنین گاز دی‌اکسید گوگرد را به زیست‌توده لیگنوسولزی افزایش می‌دهد در نتیجه کندانس شدن لیگنین را به حداقل می‌رساند و زمان جزءسازای را کوتاه می‌کند [۱۸]. گزارش‌های قبلی در مورد اثر نسبت حلال به آب نشان می‌دهد که سرعت لیگنین‌زدایی حداکثر در یک مقدار حلال آلی خاص احتمالاً در نقطه‌ای که نسبت سرعت واکنش هیدرولیز به کندانس شدن حداکثر است، اتفاق می‌افتد. لازم به ذکر است که حلال آلی نقشی شبیه به یک باز در خمیرسازی سولفیت اسیدی در کاهش اسیدیته سامانه به عهده دارد. بنابراین، می‌توان الگوهای مشابهی را بین اثرات نسبت حلال آلی به آب (در فرآیند جزءسازای SEW) و مقدار  $SO_2$  متصل (در خمیرسازی سولفیت اسیدی) انتظار داشت. علاوه بر اسیدیته، نسبت حلال آلی به آب نیز اثری مستقیم بر انحلال لیگنین و همی سلولزها دارد [۱۴].



شکل ۳. اثر غلظت اتانول مایع پخت بر بازده خمیر غربال شده و بازده خمیر کاغذ

### ۳-۴. اثر غلظت اتانول بر تغییرات عدد کاپای خمیر کاغذ

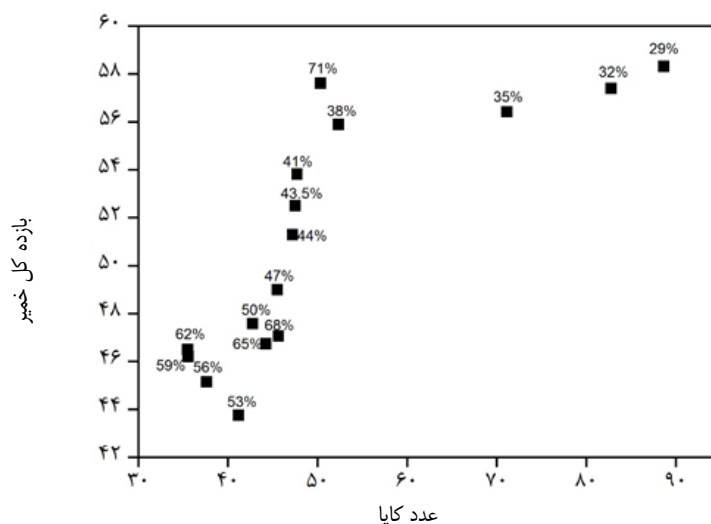
با افزایش غلظت اتانول از ۲۶ درصد تا ۶۲ درصد وزنی/وزنی، مقدار عدد کاپای خمیر کاغذ کاهش یافت؛ به طوری که در غلظت اتانول ۲۹ درصد، عدد کاپا ۸۸/۳ و در غلظت اتانول ۶۲ درصد، مقدار عدد کاپای خمیر کاغذ ۳۵/۵ بود. این بدین معنی است که افزایش غلظت اتانول فقط تا سطح ۶۲ درصد منجر به افزایش لیگنین زدایی و کاهش عدد کاپا می شود. سپس با افزایش غلظت اتانول از ۶۲ تا ۷۴ درصد، مقدار عدد کاپا افزایش می یابد. لازم به ذکر است که تعیین عدد کاپا در غلظت های اتانول ۲۶ و ۷۴ درصد به دلیل لیگنین زدایی بسیار ضعیف (عدد کاپای بیش تر از ۱۰۰) از دقت کافی برخوردار نمی باشد (شکل ۴). خمیر کاغذ در غلظت های بیش تر از ۷۱ درصد اتانول منجر به افزایش ناگهانی لیگنین باقی مانده می شود. این نتیجه را می توان به کاهش اسیدیته مایع پخت با افزایش غلظت اتانول نسبت داد. نتایج مطالعات قبلی نشان می دهد که اسیدیته نقش مهمی در خمیر سازی حلال آلی ایفا می نماید، زیرا انحلال لیگنین از شکست اسیدی پیوندهای  $\alpha$ -آریل اتر و  $\beta$ -آریل اتر در ماکرو مولکول لیگنین ناشی می شود [۱۹].



شکل ۴. اثر غلظت اتانول مایع پخت بر عدد کاپای خمیر کاغذ

### ۳-۵. اثر غلظت اتانول بر تغییرات گزینش پذیری لیگنین زدایی

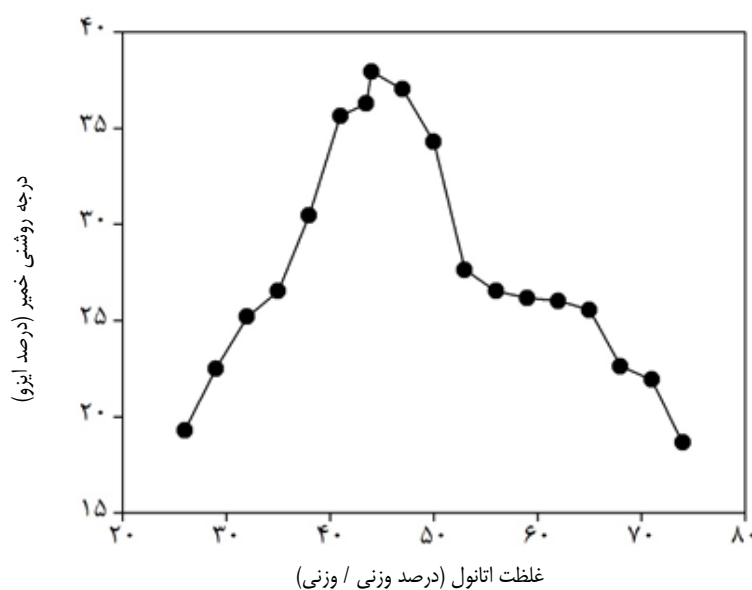
نتایج گزینش پذیری لیگنین زدایی در شکل ۵ ارائه شده است. با افزایش عدد کاپا، بازده خمیر کاغذ افزایش می یابد. بازده خمیر در غلظت ۴۱ درصد حدود ۱/۵ و ۳ درصد بیش تر از بازده خمیر کاغذ در غلظت های ۴۳/۵ و ۴۴ درصد است (شکل ۵). این در حالی است که اعداد کاپای هر سه خمیر کاغذ تقریباً برابرند. در شکل ۴ نیز مشاهده می شود که علی رغم افزایش غلظت اتانول سه خمیر مذکور، اعداد کاپای آن ها تقریباً برابر می باشند. بنابراین، در صورتی که بازده بیشتر، هدف اصلی در خمیر سازی باشد، غلظت ۴۱ درصد نسبت به دو غلظت ۴۳/۵ و ۴۴ درصد مورد استفاده محققین قبلی، مناسب تر خواهد بود.



شکل ۵. اثر غلظت اتانول مایع پخت بر گزینش پذیری خمیر کاغذ

### ۳-۶. اثر غلظت اتانول بر تغییرات درجه روشنی خمیر کاغذ

نتایج نشان داد که افزایش غلظت اتانول مایع پخت تا سطح ۴۴ درصد وزنی/وزنی منجر به افزایش درجه روشنی می‌گردد (شکل ۶). اگرچه مقدار درجه روشنی به‌طور قابل ملاحظه‌ای بستگی به مقدار لیگنین باقی‌مانده در خمیر دارد، با این حال با افزایش غلظت اتانول تا سطح ۴۴ درصد وزنی/وزنی، درجه روشنی افزایش و بعد از آن با افزایش بیش‌تر غلظت اتانول، مقدار آن کاهش یافته است. یعنی علی‌رغم اینکه با افزایش غلظت اتانول در محدوده ۴۴ تا ۶۲ درصد عدد کاپای خمیر کاهش یافته، اما درجه روشنی خمیر کاغذ در این محدوده کاهش یافته است. علت این پدیده در فرآیند SEW، حساسیت زیاد درجه روشنی خمیر به تغییرات pH است. با کاهش اسیدیت (افزایش pH) تمایل خمیر به رنگ قهوه‌ای و تیره‌شدن زیاد است. Christov و همکاران [۲۰] نتایج مشابهی را در خمیرسازی بی‌سولفیت به‌دست آوردند. با این حال، توجه به این نکته ضروری است که درجه روشنی خمیر تنها عاملی نیست که کیفیت کاغذ به‌دست آمده را تعیین می‌کند. خواص دیگری مانند مقاومت، تخلخل و صافی نیز در تعیین کیفیت کلی کاغذ نقش دارند. بنابراین، هنگام انتخاب غلظت اتانول مناسب برای فرآیند جزء‌سازی SEW، در نظر گرفتن طیف وسیعی از عوامل، از جمله خواص مطلوب کاغذ حاصل، نوع چوب مورد استفاده و شرایط خاص فرآیند جزء‌سازی بسیار مهم است.



شکل ۶. اثر غلظت اتانول مایع پخت بر درجه روشنی خمیر کاغذ



#### ۴. نتیجه گیری و پیشنهادها

نتایج نشان داد که بازده کل، عدد کاپا و درجه روشنی خمیر کاغذ به شدت وابسته به غلظت اتانول مایع پخت است. با افزایش غلظت اتانول تا سطح ۵۳ درصد مقدار بازده خمیر، کاهش و سپس با افزایش غلظت تا سطح ۷۴ درصد، بازده خمیر افزایش یافت. با توجه به نمودار گزینش پذیری، غلظت اتانول ۴۱ درصد به عنوان بهترین غلظت مورد استفاده در این پژوهش عنوان شد که مناسب تر از غلظت های پیشنهادی ۴۳/۵ و ۴۴ درصد محققین قبلی است. با افزایش غلظت اتانول تا سطح ۶۲ درصد، مقدار عدد کاپای خمیر کاهش یافت و با افزایش بیش تر غلظت، این روند معکوس گردید. افزایش اندک pH مایع پخت (با افزایش غلظت اتانول)، موجب کاهش قابل ملاحظه درجه روشنی خمیر کاغذ شد.

#### ۵. منابع

- [1]. Tatari, A., Dehghani Firouzabadi, M.R., Saraeyan, A.R., Aryaie Monfared, M.H., & Yadollahi, R., 2017. Effects of washing method on the bagasse pulping characteristics processed by the sulfur dioxide-ethanol-water (SEW) method. *Iranian Journal of Wood and Paper Industries*, 7(4), 549-559. (In Persian)
- [2]. Akgül, M., Çöpür, Y., & Temiz, S. (2007). A comparison of kraft and kraft-sodium borohydrate brutia pine pulps. *Building and Environment*, 42(7), 2586-2590.
- [3]. Liew, K.C., & Chong, E.W.N. (2016). The relationship of pulp yield with ethanol pulping concentrations on Acacia hybrid. *Journal of the Indian Academy of Wood Science*, 13(1), 44-47.
- [4]. Arora, R., Singh, P., Sarangi, P.K., Kumar, S., & Chandel, A.K. (2023). A critical assessment on scalable technologies using high solids loadings in lignocellulose biorefinery: challenges and solutions. *Critical Reviews in Biotechnology*, pp: 1-18.
- [5]. Eugenio, M.E., Ibarra, D., Martín-Sampedro, R., Espinosa, E., Bascón, I., & Rodríguez, A. (2019). Alternative raw materials for pulp and paper production in the concept of a lignocellulosic biorefinery. *Cellulose*, 12, 78.
- [6]. Iakovlev, M., You, X., van Heiningen, A., & Sixta, H. (2014). SO<sub>2</sub>-ethanol-water (SEW) fractionation process: production of dissolving pulp from spruce. *Cellulose*, 21(3), 1419-1429.
- [7]. Iakovlev, M., Hiltunen, E., & van Heiningen, A. (2010). Chemical pulping: paper technical potential of spruce SO<sub>2</sub>-Ethanol-Water (SEW) pulp compared to kraft pulp. *Nordic Pulp & Paper Research Journal*, 25(4), 428-433.
- [8]. Yamamoto, M., Iakovlev, M., & van Heiningen, A. (2014). Kinetics of SO<sub>2</sub>-ethanol-water (SEW) fractionation of hardwood and softwood biomass. *Bioresource Technology*, 155, 307-313.
- [9]. 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*, pp: 1-9. DOI: 10.1007/s13399-023-03785-x.
- [10]. 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.
- [11]. 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.
- [12]. Sharazi, A.M., van Heiningen, A.R., Sumerskii, 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.
- [13]. Sridach, W. (2010). The environmentally benign pulping process of non-wood fibers. *Suranaree Journal of Science & Technology*, 17(2), 105-123.
- [14]. Iakovlev, M., You, X., Heiningen, A.V., & 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.
- [15] Tatari, A., Dehghani Firouzabadi, M.R., Saraeyan, A.R., & Aryaie Monfared, M.H. (2017). Comparative study of the characteristics of pulp and paper prepared by sulfur dioxide-ethanol-water (SEW) and soda from bagasse fiber. *Iranian Journal of Wood and Forest Science and Technology*, 24(3), 221-239. (In Persian)
- [16]. Ni, Y., & Hu, Q. (1995). Alcell® lignin solubility in ethanol-water mixtures. *Journal of Applied Polymer Science*, 57(12): 1441-1446.
- [17]. Iakovlev, M. (2011). SO<sub>2</sub>-ethanol-water (SEW) fractionation of lignocellulosis, Doctoral Dissertation, Department of Forest Products Technology, Aalto University, Finland.
- [18]. Iakovlev, M., & van Heiningen, A. (2012). Efficient fractionation of spruce by SO<sub>2</sub>- ethanol- water treatment: closed mass balances for carbohydrates and sulfur. *ChemSusChem*, 5(8), 1625-1637.

- [19]. Sierra-Alvarez, R., & Tjeerdsma, B.F. (1995). Organosolv pulping of poplar wood from short-rotation intensive culture plantations. *Wood and Fiber Science*, 27(4), 395-401.
- [20]. Christov, L.P., Akhtar, M., & Prior, B.A. (1998). The potential of biosulfite pulping in dissolving pulp production. *Enzyme and Microbial Technology*, 23(1-2), 70-74.