

(OPEN ACCESS)

Investigation on the impact of cellulase dosage and reaction time on the pulp fiber refining and properties of paper

Omid Darvishzadseh¹, Ahmad Jahan Latibari^{2*}, Amir Lashgari³, Shadman Pourmousa³
and Ajang Tajdini⁴

1-Ph.D. Candidate, Dept. of Wood and Paper Science and Technology, Ka. C. Islamic Azad University, Karaj, Iran

2*-Corresponding Author, Professor, Dept. of Wood and Paper Science and Technology, Ka. C. Islamic Azad

University, Karaj, Iran, Email: latibari.aj@gmail.com

3-Associate Professor, Dept. of Wood and Paper Science and Technology, Ka. C. Islamic Azad University, Karaj, Iran

4- Professor, Dept. of Wood and Paper Science and Technology, Ka. C. Islamic Azad University, Karaj, Iran

Article Info

Article type:

Full Length Research Paper

Article history:

Received: 29 July 2026

Revised: 09 August 2026

Accepted: 11 August 2026

Published online: 21

September 2026

Keywords:

Cellulase,
refining,
kraft pulp,
freeness,
strength properties.

ABSTRACT

Background and Objectives: Pulp refining is considered as an essential unit operation in the development of the paper properties. However, it is intensive energy consumer in the era that world is struggling with energy shortage. Therefore, paper industry has been searching various alternative including application of chemicals to reduce refining energy. Also, during the refining stage, compressive and shear stresses cause swelling, flexibility, and internal and external fibrillation of the fibers, increasing the potential contact surface for fiber bonds. On the other hand, excessive refining can increase fiber shortening and fines production. The objective and aim of this research were concentrated on the application of cellulase enzyme as an environmental friendly process to optimize the refining energy and improve the properties of pulp fibers and paper.

Material and Methods: Two sequences of enzyme treatment and refining were used; first enzyme treatment then refining called ER and first refining then enzyme treatment call RE. Pulp mixture was composed of 70% hardwood kraft and 30% softwood kraft pulps. Three dosages of enzyme were selected at 200, 300, and 400 ppm (based on dry weight of pulp) and three reaction times of 60, 90, and 120 minutes. Sample preparation and all tests were performed according to TAPPI standard test procedures. The freeness of the pulp of each of the 19 treatments (control and 18 treatments) was measured, hand sheet was prepared, and strengths and optical measurements were performed. The analyses included response surface models selected on the basis of leave-one-out cross-validation. Principal component analysis (PCA), hierarchical clustering, descriptive comparison of nine condition-matched pairs, rank correlation, and multi-response desirability analysis coupled with sensitivity analysis.

Finding: Based on the average values of the results, the values of ER treated pulps compared to RE were varied as follow; burst strength index, 2.5 against 1.70 kPa.m²/g, tensile strength index, 51.43 against 42.16 N.m/g and brightness 82.88% against 80.05%. However, tear strength index was lower after enzyme

treatment. The highest values burst strength index and tensile strength index values obtained applying ER300-120 treatment were 2.90 kPa.m²/g, and 60.14 N.m/g respectively. Principal component analysis (PCA) was performed on 14 complete, non-constant response variables after z-score standardization. Hierarchical clustering was conducted using Ward's method and Euclidean distance. Given the nature of the available data, the statistical comparisons and conclusions were reported on a descriptive and exploratory basis.

Conclusions: The results of strength properties, freeness degree, and optical properties showed that the order of enzymatic treatment and refining is effective on pulp performance. The average values of the measured properties for ER treatment were higher than respective values for RE treatment. The values of burst strength index and tensile strength index were 66.7% and 43.5% respectively higher than control sample. The response of the RE treatment was not uniform and the average values of the tensile strength index was fairly higher than control sample, but the other properties were lower than control. The tear strength index of all treatments was lower than control which can be attributed to destruction of the fiber integrity. This finding necessitates the appropriate selection of variables to reach optimum results.

Cite this article: Omid Darvishzadseh, Ahmad Jahan Latibari, Amir Lashgari, Shadman Pourmousa and Ajang Tajdini. 2026. Investigation on the impact of cellulase dosage and reaction time on the pulp fiber refining and properties of paper. Iranian Journal of Wood and Paper Science Research, 41(3), 289-304. <https://doi.org/10.22092/ijwpr.2026.373712.1852>



Copyright: © 2025 by the authors. This is an open access, peer-reviewed article published by Research Institute of Forests and Rangelands (<http://ijwpr.areeo.ac.ir/>) and distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

بررسی تأثیر مقدار مصرف و زمان واکنش آنزیم سلولاز بر پالایش الیاف خمیر کاغذ و ویژگی‌های کاغذ

امید درویش‌زاده^۱، احمد جهان‌لتیباری^{۲*}، امیر لشگری^۳، شادمان پورموسی^۴ و آژنگ تاجدینی^۴

۱-دانش آموخته دکتری گروه علوم صنایع چوب و کاغذ، واحد کرج، دانشگاه آزاد اسلامی، کرج، ایران

۲- نویسنده مسئول، استاد گروه علوم صنایع چوب و کاغذ، واحد کرج، دانشگاه آزاد اسلامی، کرج، ایران، پست الکترونیک: latibari.aj@gmail.com

۳- دانشیار گروه علوم صنایع چوب و کاغذ، واحد کرج، دانشگاه آزاد اسلامی، کرج، ایران

۴- استاد گروه علوم صنایع چوب و کاغذ، واحد کرج، دانشگاه آزاد اسلامی، کرج، ایران

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله:	سابقه و هدف: فرایند پالایش خمیر کاغذ به عنوان یکی از ارکان اساسی در صنایع تولید کاغذ، نقش اصلی در توسعه ویژگی‌های مقاومتی شبکه الیاف کاغذ ایفا می‌کند. ولی کاغذسازی همسو با بحران جهانی انرژی با چالش مصرف زیاد انرژی، به‌ویژه در بخش پالایش الیاف مواجه است. به‌ناچار این صنعت کوشش‌های زیادی در راستای کاهش انرژی از جمله افزودن مواد شیمیایی جایگزین به عمل آورده است. همچنین در مرحله پالایش، تنش‌های فشاری و برشی موجب واکنشیدگی، انعطاف‌پذیری و فیبریلاسیون داخلی و خارجی الیاف می‌شوند و سطح تماس بالقوه برای پیوندهای الیافی را افزایش می‌دهند. در نقطه مقابل پالایش بیش از اندازه، می‌تواند کوتاه شدن الیاف و تولید نرمه را افزایش دهد. این پژوهش باهدف ارزیابی استفاده از آنزیم سلولاز به‌عنوان یک فراوری دوستدار محیط‌زیست برای بهینه‌سازی مصرف انرژی و بهبود خواص خمیر کاغذ و کاغذ، انجام شده است.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۵/۰۷	مواد و روش‌ها: دو توالی «اول آنزیم سپس پالایش ER» و «اول پالایش سپس آنزیم RE» در سه مقدار مصرف سلولاز ۲۰۰، ۳۰۰ و ۴۰۰ قسمت در میلیون (نسبت به وزن الیاف) و سه زمان واکنش ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ دقیقه (جمعاً ۱۸ ترکیب شرایط) بررسی شدند. خمیر کاغذ پایه، مخلوطی شامل ۷۰ درصد وزنی خمیر کاغذ کرافت الیاف کوتاه پهن‌برگ و ۳۰ درصد وزنی خمیر کاغذ کرافت الیاف بلند سوزنی‌برگ بود. از خمیر کاغذ هریک از ۱۹ ترکیب (شاهد و ۱۸ ترکیب) براساس دستورالعمل‌های TAPPI درجه روانی خمیر کاغذ اندازه‌گیری و کاغذ دست‌ساز تهیه و ویژگی‌های مقاومتی و نوری آن اندازه‌گیری شد. فایل تحلیلی شامل میانگین ۱۹ ترکیب فاکتوریل، برای پاسخ‌های مکانیکی، درجه روانی و ویژگی‌های نوری بود. مدل‌های سطح پاسخ با انتخاب بر پایه اعتبارسنجی حذف‌تکی، تحلیل مؤلفه‌های اصلی، خوشه‌بندی سلسله‌مراتبی، مقایسه توصیفی نه جفت هم‌شرایط، همبستگی رتبه‌ای و مطلوبیت چندپاسخی همراه با تحلیل حساسیت بود.
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۵/۱۸	نتایج: بر پایه میانگین شرایط دوز-زمان، ER در مقایسه با RE شاخص مقاومت به ترکیدن (۲/۵۰ در برابر ۱/۷۰ $\text{kPa}\cdot\text{m}^2/\text{g}$)، شاخص مقاومت به کشش (۵۱/۴۴ در برابر ۴۴/۱۶ $\text{N}\cdot\text{m}/\text{g}$) و روشنی (۸۲/۷۸ در برابر ۸۰/۰۵ درصد) بیشتری داشت، درحالی‌که در هر دو توالی شاخص مقاومت به پاره شدن کمتری از شاهد نشان دادند. بیشترین شاخص مقاومت به ترکیدن و شاخص مقاومت به کشش در ۳۰۰-۱۲۰ ER به ترتیب ۲/۹۰ و ۶۰/۱۴ بود که ۶۶/۷ و ۴۳/۵ درصد بیشتر از شاهد است. نتایج توصیفی نشان داد که ۳۰۰-۱۲۰ ER مناسب‌ترین توازن تعیین‌شده میان خواص مبتنی بر پیوند و پاسخ پالایش را در شرایط این آزمایش فراهم می‌کند.
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۵/۲۰	نتیجه‌گیری: نتایج ویژگی‌های مقاومتی، درجه روانی و خصوصیات نوری نشان داد که ترتیب انجام تیمار آنزیمی و پالایش بر عملکرد خمیر کاغذ مؤثر است. توالی ER در مقایسه با RE میانگین ویژگی‌های مقاومتی و نوری برتری داشت. در ۳۰۰-۱۲۰ ER، مقاومت به ترکیدن و مقاومت به کشش نسبت به شاهد به ترتیب ۶۶/۷ و ۴۳/۵ درصد افزایش یافت. عملکرد RE یکنواخت نبود، چون میانگین شاخص مقاومت به کشش آن اندکی بیشتر از
تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۶/۳۰	
واژه‌های کلیدی:	
سلولاز،	
پالایش،	
خمیر کاغذ کرافت،	
درجه روانی،	
ویژگی‌های مقاومتی.	

شاهد بود، ولی در مورد سایر ویژگی‌ها کمتر از شاهد قرار گرفتند و میانگین زردی در این توالی افزایش یافت. شاخص مقاومت به پاره شدن در همه شرایط آنزیمی کمتر از شاهد بود. این محدودیت باید هنگام انتخاب دوز و زمان به همراه مزایای مقاومت به کشش و مقاومت به ترکیدن در نظر گرفته شود؛ علت آن، کم شدن اندازه الیاف و ایجاد نرمه و صدمه به مقاومت ذاتی الیاف است.

استناد به این مقاله: امید درویش‌زاده، احمد جهان‌لتیباری، امیر لشگری، شادمان پورموسی و آژنگ تاج‌دینی. ۱۴۰۵. بررسی تأثیر مقدار مصرف و زمان واکنش آنزیم سلولاز بر پالایش الیاف خمیرکاغذ و ویژگی‌های کاغذ. نشریه تحقیقات علوم چوب و کاغذ ایران، ۴۱(۳)، ۳۰۴-۲۸۹.

DOI: <https://doi.org/10.22092/ijwpr.2026.373712.1852>

مقدمه

کلیات، ضرورت و اهمیت پژوهش

صنعت خمیر و کاغذ در انتقال دانش، بسته‌بندی و محصولات بهداشتی نقش مهمی دارد. بر پایه آمار رسمی سازمان خواربار و کشاورزی ملل متحد، در سال ۲۰۲۴ تولید جهانی خمیرکاغذ از چوب، کاغذ بازیافتی و کاغذ و مقوا به ترتیب ۱۸۹، ۲۴۱ و ۴۲۳ میلیون تن گزارش شد (FAO, 2025)؛ که این مقیاس تولید، اهمیت بهبود بهره‌وری مواد و انرژی را در زنجیره تولید کاغذ نشان می‌دهد.

در تولید کاغذ، سوسپانسیون الیاف سلولزی بکر یا بازیافتی پس از آماده‌سازی به شبکه‌ای درهم‌تنیده تبدیل می‌شود؛ که پیش‌نیاز آن پالایش الیاف است. در مرحله پالایش، تنش‌های فشاری و برشی موجب واکشیدگی، انعطاف‌پذیری و فیبریلایسیون داخلی و خارجی الیاف می‌شوند و سطح تماس بالقوه برای پیوندهای بین‌الیافی را افزایش می‌دهند. در نقطه مقابل، پالایش بیش‌ازاندازه، می‌تواند کوتاه شدن الیاف و تولید نرمه را افزایش دهد؛ بنابراین پاسخ مقاومتی و آبگیری باید همزمان ارزیابی شود (Gharehkhani et al., 2015).

رویکردهای زیست‌فناورانه و استفاده از آنزیم‌ها در رنگ‌بری زیستی، جوهرزدایی، کنترل رسوبات و اصلاح الیاف مورد توجه قرار گرفته‌اند. سلولازها در شرایط ملایم عمل می‌کنند و در صورت کنترل نوع و دوز آنزیم می‌توانند دسترسی‌پذیری دیواره الیاف و رفتار آن را در پالایش تغییر دهند؛ بااین‌حال، فراوری شدید ممکن

است خواص مقاومتی را کاهش دهد (Bajpai, 1999; Przybysz Buzala et al., 2016)

سازوکار عملکرد آنزیم سلولاز و پیشینه پژوهش سلولازها مجموعه‌ای از آنزیم‌ها هستند که با همکاری یکدیگر پیوندهای (۱→۴) β گلیکوزیدی سلولز را هیدرولیز می‌کنند. اندوگلوکانازها عمدتاً در نواحی آمورف برش‌های درون‌زنجیره‌ای ایجاد می‌کنند؛ سلوبیوهیدرولازها از انتهای زنجیره عمل می‌کنند و بتاگلوکوزیدازها سلوبیوز را به گلوکز تبدیل می‌کنند. سهم هر جزء و شدت اثر آن به منشأ آنزیم، ویژگی خمیرکاغذ و شرایط فراوری بستگی دارد (Bajpai, 1999).

در پالایش زیستی هدف تجزیه کامل الیاف نیست، بلکه ایجاد تغییر کنترل‌شده در سطح و دیواره الیاف است. فراوری مناسب می‌تواند نفوذ آب و تغییر شکل‌پذیری الیاف را تسهیل کند و شدت اعمال مکانیکی لازم برای رسیدن به پاسخ معین را کاهش دهد؛ اما افزایش بیش‌ازحد دوز یا زمان می‌تواند یکپارچگی الیاف و مقاومت به پاره شدن را تضعیف کند (Ko et al., 2010; Haske-Cornelius et al., 2020).

پژوهش‌های پیشین نشان داده‌اند که اثر سلولاز بر پالایش، تابع نوع خمیرکاغذ، ترکیب آنزیمی، دوز و زمان واکنش است. البته کاهش شدت یا زمان پالایش همراه با تغییر خواص مقاومتی در خمیرکاغذهای مختلف گزارش شده است، ولی بهترین شرایط بین مطالعات، یکسان نیست و در دوزهای شدید احتمال افت مقاومت وجود

دارد (Haske-Cornelius et al., 2020; Choi et al., 2025; Park et al., 2025).

یکی از متغیرهای مهم کاربرد آنزیم، چگونگی تماس آن با الیاف و پالایش است: توالی اول آنزیم سپس پالایش (ER) یا اول پالایش سپس آنزیم (RE). پالایش اولیه سطح و ریزفیریل‌های بیشتری در معرض آنزیم قرار می‌دهد، درحالی‌که پیش‌تیمار آنزیمی می‌تواند دیواره الیاف را پیش از اعمال تنش مکانیکی اصلاح کند. نتایج مطالعات توالی تیمار نشان می‌دهد اثر نهایی به نوع خمیرکاغذ و پاسخ موردنظر وابسته است و باید همراه با ویژگی‌های مقاومتی، آبگیری و ساختاری بررسی شود (Hossein et al., 2015). باوجود مطالعات انجام‌شده، مقایسه هم‌زمان دو توالی ER و RE در ترکیب خمیرکاغذ کرافت الیاف کوتاه و بلند، در دامنه‌ای از غلظت و زمان، همراه با پاسخ‌های مکانیکی، نوری و درجه روانی، کمتر گزارش شده است. ازاین‌رو، ارزیابی یکپارچه این پاسخ‌ها می‌تواند تفاوت رفتاری دو توالی را روشن‌تر کند. بنابراین هدف این پژوهش بررسی اثر توالی اعمال سلولاز و پالایش بر درجه روانی، خواص مکانیکی و نوری کاغذ دست‌ساز انتخاب شده است. برای مقایسه الگوهای چندمتغیره نیز تحلیل مؤلفه‌های اصلی و خوشه‌بندی سلسله‌مراتبی بر میانگین ثبت‌شده هر شرط دوز-زمان انجام شد.

مواد و روش‌ها

آماده‌سازی مواد اولیه (خمیرکاغذ و آنزیم)

خمیرکاغذ پایه، مخلوطی شامل ۷۰ درصد وزنی خمیرکاغذ کرافت الیاف کوتاه پهن‌برگان و ۳۰ درصد وزنی خمیرکاغذ کرافت الیاف بلند سوزنی‌برگان بود. این ترکیب برای دستیابی به توازن میان خواص مبتنی بر پیوند و مقاومت به پاره شدن انتخاب شد.

پس از توزین بر مبنای وزن خشک و غوطه‌وری اولیه در آب، مخلوط الیاف در جداکننده الیاف آزمایشگاهی پراکنده شد تا سوسپانسیون یکنواختی تشکیل شود. درجه روانی اولیه براساس TAPPI T ۲۲۷ برابر ۶۴۰ میلی‌لیتر استاندارد کانادایی اندازه‌گیری شد.

آنزیم مورد استفاده، یک فرآورده تجاری سلولاز با منشأ میکروبی و فعالیت غالب اندوگلوکاناز بود.

طراحی آزمایش و توالی فراوری‌های آنزیمی

طرح آزمایش شامل دو توالی ER و RE، سه غلظت آنزیم (۲۰۰، ۳۰۰ و ۴۰۰ ppm) و سه زمان واکنش (۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ دقیقه) بود. با احتساب یک شاهد پالایش‌شده بدون آنزیم، ۱۹ ترکیب آزمایشی تعریف شد: ۱ شاهد + (۲ توالی $\times$ ۳ غلظت $\times$ ۳ زمان).

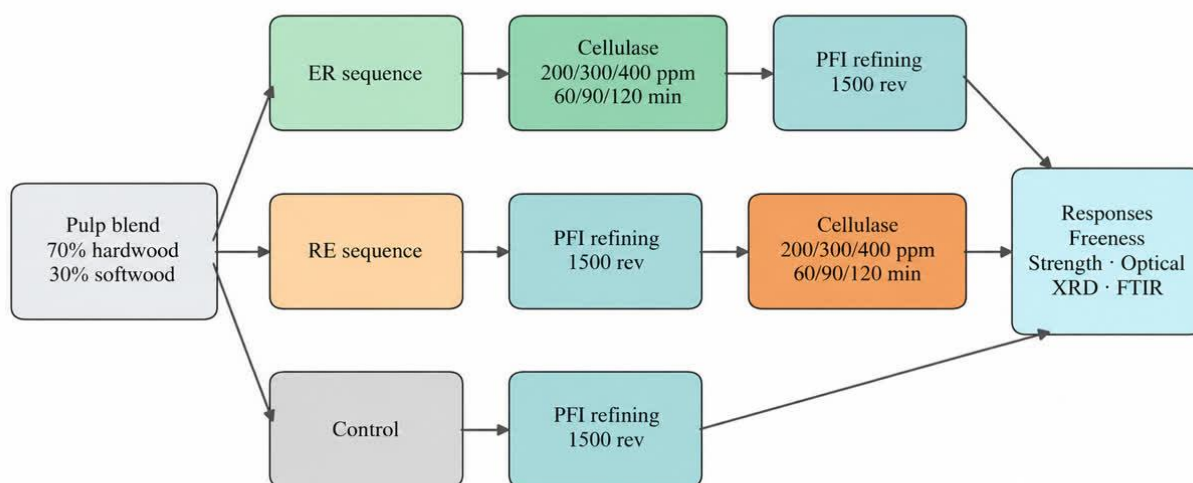
شکل ۱ طرح آزمایش را در سه مسیر نشان می‌دهد: توالی آنزیم-پالای (ER)، توالی پالایش-آنزیم (RE) و شاهد بدون آنزیم. ترکیب دو توالی، سه غلظت سلولاز و سه زمان واکنش، ۱۸ تیمار آنزیمی را ایجاد کرد که همراه با شاهد، مجموعاً ۱۹ شرط آزمایشی را برای ارزیابی درجه روانی، ویژگی‌های مقاومتی، نوری و ساختاری تشکیل دادند.

در توالی اول آنزیم سپس پالایش (ER): سوسپانسیون خمیرکاغذ با درجه روانی اولیه ۶۴۰ میلی‌لیتر استاندارد کانادایی با سلولاز در غلظت‌های ۲۰۰، ۳۰۰ و ۴۰۰ ppm و زمان‌های ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ دقیقه به آرامی هم زده شد. پس از پایان واکنش، آنزیم با جوشاندن کوتاه‌مدت غیرفعال گردید و درجه روانی مرحله اول اندازه‌گیری شد. سپس خمیرکاغذ در پالایشگر آزمایشگاهی PFI با ۱۵۰۰ دور پالایش و درجه روانی نهایی ثبت شد.

شاهد: خمیرکاغذ اولیه با درجه روانی ۶۴۰ میلی‌لیتر استاندارد کانادایی، بدون افزودن آنزیم، در پالایشگر PFI با ۱۵۰۰ دور پالایش شد و درجه روانی آن به ۵۲۰ میلی‌لیتر استاندارد کانادایی رسید.

در توالی اول پالایش سپس آنزیم (RE): سوسپانسیون خمیرکاغذ ابتدا تحت همان شرایط شاهد، در پالایشگر PFI با ۱۵۰۰ دور پالایش و به درجه روانی ۵۲۰ میلی‌لیتر استاندارد کانادایی رسانده شد. سپس سلولاز با غلظت‌ها و زمان‌های مذکور افزوده شد. پس از غیرفعال‌سازی حرارتی آنزیم، درجه روانی نهایی ثبت گردید.

Experimental sequences and measured responses



ER: enzyme then refining; RE: refining then enzyme; 18 enzyme conditions plus one control.

شکل ۱- توالی‌های آزمایشی و پاسخ‌های اندازه‌گیری شده

Figure 1. Experimental sequences and measured responses

در سطح توصیفی و اکتشافی گزارش شدند.

نتایج

نتایج اندازه‌گیری‌های انجام شده در شکل‌های ۲ تا ۸ خلاصه شده است.

در نمونه شاهد که با ۱۵۰۰ دور PFI پالایش شد، درجه روانی از ۶۴۰ به ۵۲۰ میلی‌لیتر استاندارد کانادایی رسید. شاخص‌های مقاومت به ترکیدن، مقاومت به پاره شدن و مقاومت به کشش به ترتیب ۱/۷۴، ۶/۳۴ $\text{kPa}\cdot\text{m}^2/\text{g}$ و ۴۱/۹۲ $\text{mN}\cdot\text{m}^2/\text{g}$ و N.m/g اندازه‌گیری شد. این مقادیر مبنای مقایسه توصیفی شرایط آنزیمی قرار گرفتند.

دو توالی ER و RE الگوهای متفاوتی در پاسخ‌های مقاومتی، نوری و درجه روانی نشان دادند. از آنجا که اندازه‌گیری مستقیم طول الیاف، ریزاختر سطح یا انرژی ویژه پالایش در این مجموعه انجام نشده است، تفسیر سازوکارها به صورت محتاطانه و در تطبیق با منابع علمی ارائه می‌شود. در توالی ER، شاخص مقاومت به ترکیدن در همه شرایط از شاهد بیشتر بود و بیشترین مقدار در ER^{۳۰۰-۱۲۰} برابر ۲/۹۰ $\text{kPa}\cdot\text{m}^2/\text{g}$ ثبت شد. شاخص مقاومت به کشش

ارزیابی خواص مکانیکی و نوری

از خمیرکاغذ هریک از ۱۹ ترکیب، بر اساس TAPPI T ۲۰۵ کاغذ دست‌ساز تهیه و در دمای 23 ± 1 درجه سلسیوس و رطوبت نسبی 50 ± 2 درصد آماده‌سازی شد. وزن پایه مطابق TAPPI T ۴۱۰، شاخص مقاومت به کشش (N.m/g) مطابق TAPPI T ۴۹۴، شاخص مقاومت به پاره شدن مطابق TAPPI T ۴۱۴ و شاخص مقاومت به ترکیدن (kPa.m²/g) مطابق TAPPI T ۴۰۳ اندازه‌گیری شد. درجه روشنی و زردی با اسپکتروفوتومتر انعکاسی مطابق TAPPI T 1216 تعیین گردید.

تحلیل آماری و چندمتغیره

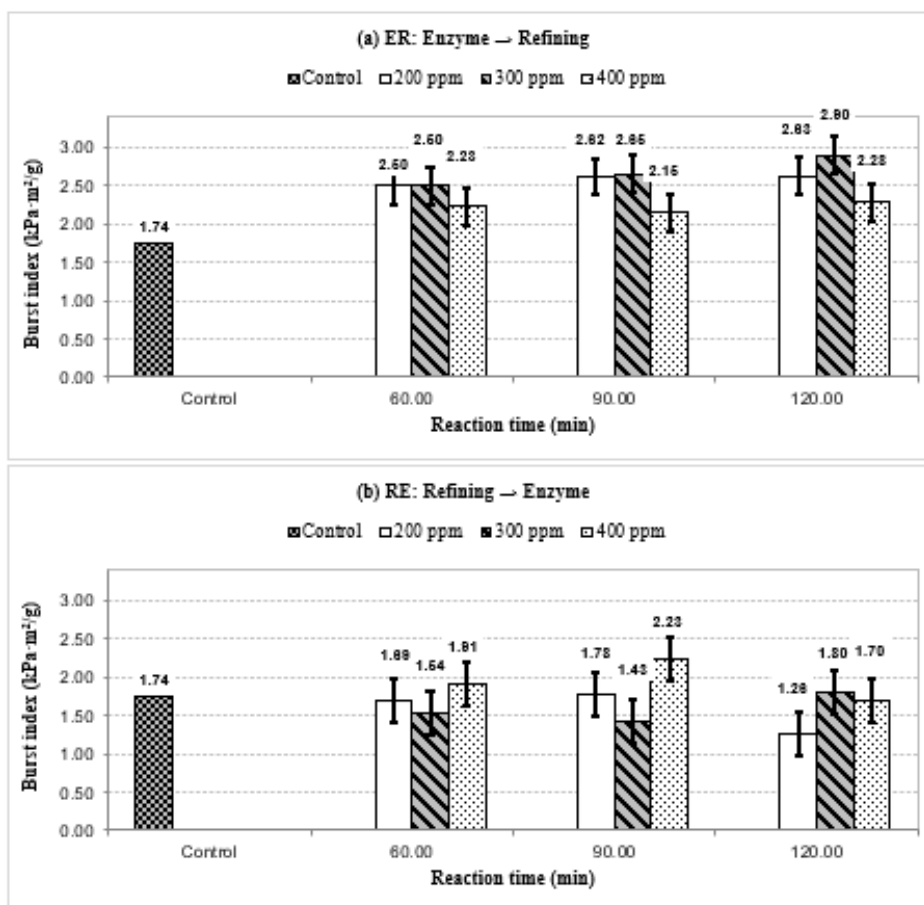
تحلیل‌ها با استفاده از میانگین ثبت‌شده برای هر یک از ۱۹ شرط آزمایشی انجام شد. برای توصیف هر توالی، میانگین و انحراف معیار میان ۹ شرط دوز-زمان محاسبه گردید. تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) بر ۱۴ پاسخ کامل و غیر ثابت پس از استانداردسازی Z انجام شد. خوشه‌بندی سلسله‌مراتبی با روش Ward و فاصله اقلیدسی استفاده گردید. با توجه به ماهیت داده‌های موجود، مقایسه‌ها و نتیجه‌گیری‌های آماری

ER در ۸ شرط از ۹ شرط از شاهد بیشتر بود و بیشینه آن در $ER_{300-120}$ به $60/14 \text{ N}\cdot\text{m/g}$ رسید. در مقابل، شاخص مقاومت به پاره شدن در تمام ۱۸ شرط آنزیمی کمتر از شاهد بود و کمترین مقدار، $2/44 \text{ mN}\cdot\text{m}^2/\text{g}$ در ER_{400-90} مشاهده شد.

میانگین انحراف معیار شرایط دوز-زمان برای ER و RE به ترتیب در شاخص مقاومت به ترکیدن $2/50 \pm 0/24$ و $1/70 \pm 0/28 \text{ kPa}\cdot\text{m}^2/\text{g}$ در شاخص مقاومت به کشش $44/16 \pm 4/62 \text{ N}\cdot\text{m/g}$ و در روشنی $51/44 \pm 5/83$

میانگین انحراف معیار شرایط دوز-زمان برای ER و RE به ترتیب در شاخص مقاومت به ترکیدن $2/50 \pm 0/24$ و $1/70 \pm 0/28 \text{ kPa}\cdot\text{m}^2/\text{g}$ در شاخص مقاومت به کشش $44/16 \pm 4/62 \text{ N}\cdot\text{m/g}$ و در روشنی $51/44 \pm 5/83$

میانگین انحراف معیار شرایط دوز-زمان برای ER و RE به ترتیب در شاخص مقاومت به ترکیدن $2/50 \pm 0/24$ و $1/70 \pm 0/28 \text{ kPa}\cdot\text{m}^2/\text{g}$ در شاخص مقاومت به کشش $44/16 \pm 4/62 \text{ N}\cdot\text{m/g}$ و در روشنی $51/44 \pm 5/83$



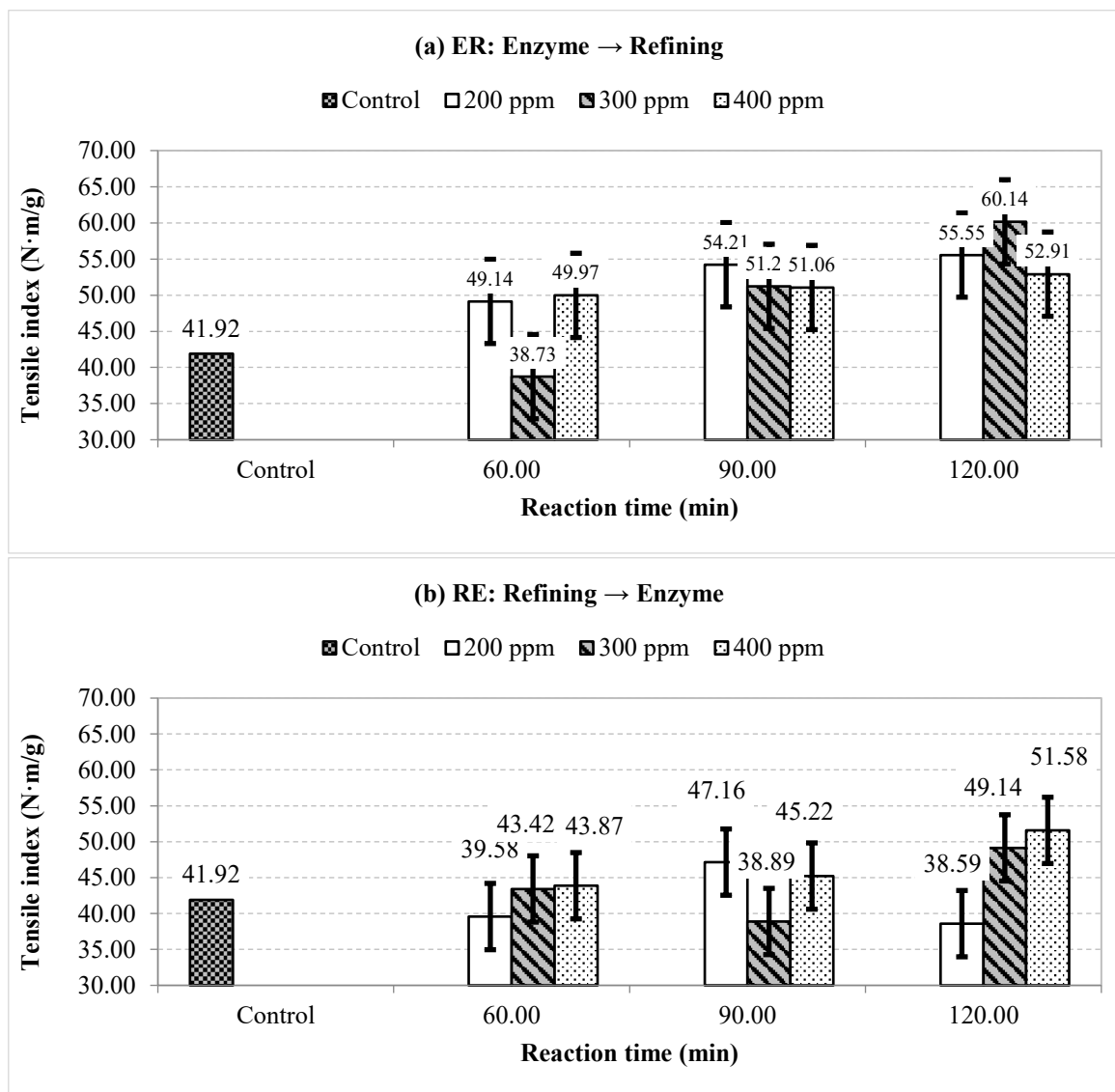
شکل ۲- اثر غلظت سلولاز و زمان واکنش بر شاخص مقاومت به ترکیدن

Figure 2. Effect of cellulase dosage and reaction time on burst index
Error bars show sequence SD across nine dose-time condition means (ER: 0.24; RE: 0.28)

بود و بیشترین مقدار، برابر $2/90 \text{ kPa}\cdot\text{m}^2/\text{g}$ در تیمار $ER_{300-120}$ ثبت شد. در توالی RE پاسخ یکنواخت نبود

بررسی شکل ۲ نشان می‌دهد که در توالی ER، شاخص مقاومت به ترکیدن در تمام تیمارهای آنزیمی از شاهد بیشتر

و مقادیر در گستره ۱/۲۶ تا ۲/۲۳ $\text{kPa}\cdot\text{m}^2/\text{g}$ قرار گرفت؛ شاخص مؤثرتر از افزودن آنزیم پس از پالایش بود. بنابراین، تقدم تیمار آنزیمی بر پالایش برای افزایش این



شکل ۳- اثر غلظت سلولاز و زمان واکنش بر شاخص مقاومت به کشش

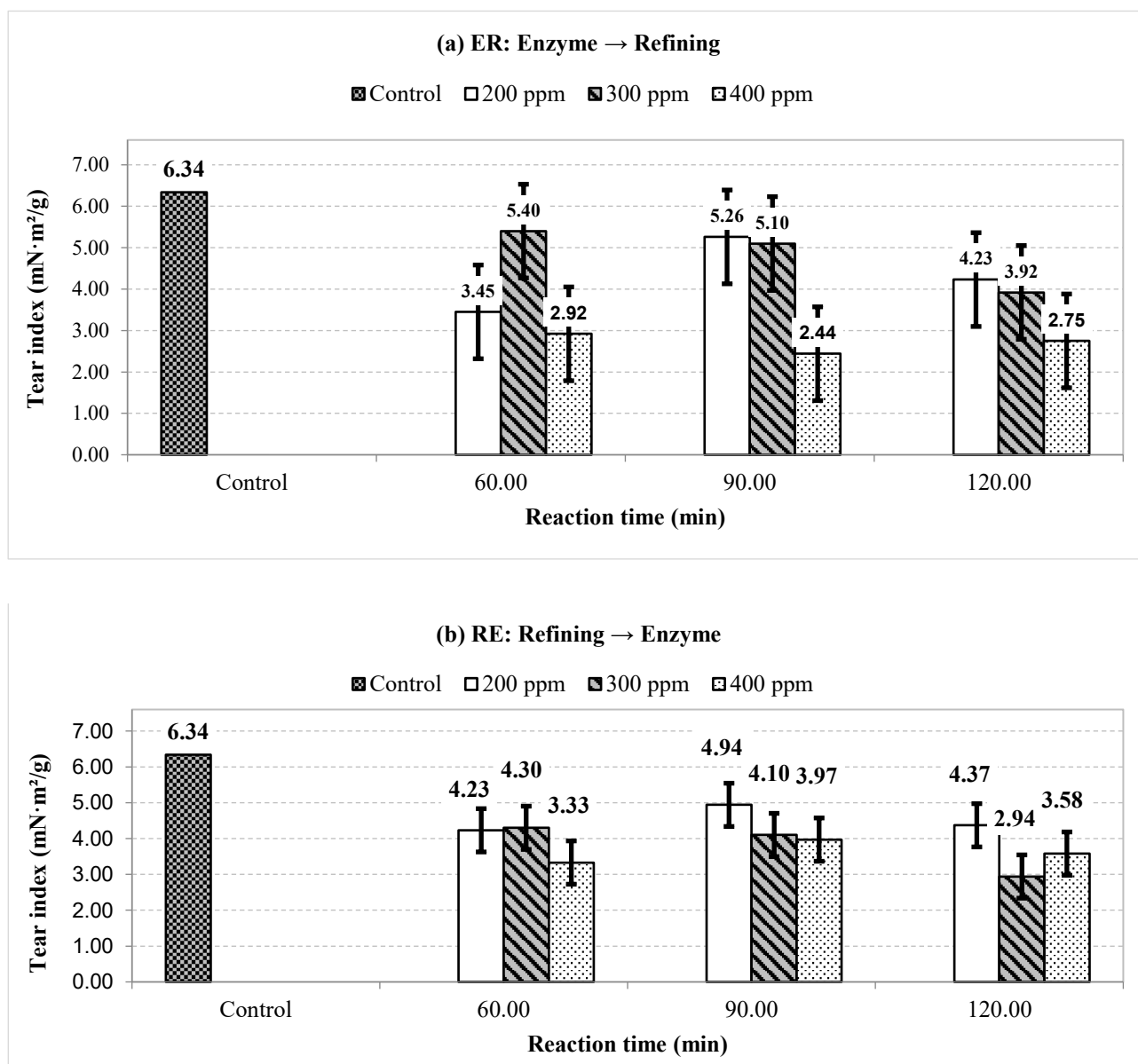
Figure 3- Effect of cellulase dosage and reaction time on tensile index
Error bars show sequence SD across nine dose-time condition means (ER: 5.83; RE: 4.62)

۱۲۰ به دست آمد، درحالی که سه شرط کمتر از شاهد قرار گرفتند.

در مقابل، کاهش مقاومت به پاره شدن در همه شرایط آنزیمی می تواند با کاهش مقاومت ذاتی الیاف یا تغییر توزیع نرمه ها مرتبط باشد. اثبات این سازوکارها به اندازه گیری

مطابق شکل ۳، در توالی ER هشت تیمار از نه تیمار، شاخص مقاومت به کشش بیشتری نسبت به شاهد ۴۱/۹۲ $\text{N}\cdot\text{m}/\text{g}$ داشتند. بیشینه ۶۰/۱۴ $\text{N}\cdot\text{m}/\text{g}$ در ۱۲۰-۳۰۰ ER مشاهده شد. در توالی RE دامنه تغییرات محدودتر و پاسخ ها نوسانی بود؛ بیشترین مقدار ۵۱/۵۸ $\text{N}\cdot\text{m}/\text{g}$ در ۴۰۰-RE

مستقیم طول الیاف و ریزساختار نیاز دارد (Gharehkhani, Przybysz Buzala et al., 2016; et al., 2015).



شکل ۴- اثر غلظت سلولاز و زمان واکنش بر شاخص مقاومت به پاره شدن

4. Effect of cellulase dosage and reaction time on tear index Error bars show sequence SD across nine dose-time condition means (ER: 1.13; RE: 0.60)

به پاره شدن همراه نشد و انتخاب شرایط تیمار باید با توجه و همزمان به این افت انجام شود. نتایج ویژگی‌های مقاومتی، درجه روانی و خصوصیات نوری نشان داد که ترتیب انجام تیمار آنزیمی و پالایش بر عملکرد خمیر کاغذ مؤثر است. شاخص مقاومت به ترکیدن در

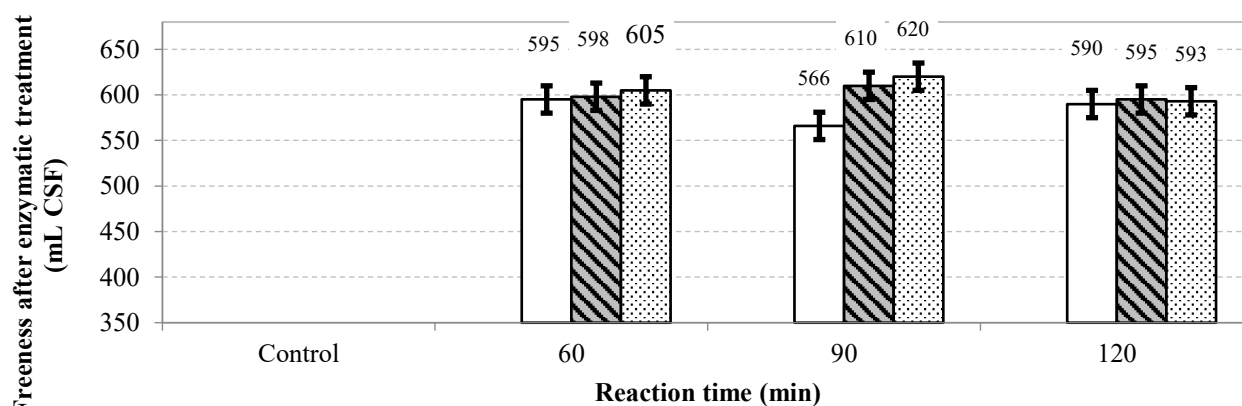
شکل ۴ کاهش شاخص مقاومت به پاره شدن را در همه شرایط آنزیمی نسبت به شاهد ۶/۳۴ $\text{mN}\cdot\text{m}^2/\text{g}$ نشان می‌دهد. بیشترین مقدار میان تیمارهای آنزیمی حدود ۵/۲۹ $\text{mN}\cdot\text{m}^2/\text{g}$ و کمترین مقدار ۲/۴۴ $\text{mN}\cdot\text{m}^2/\text{g}$ بود. از این رو، افزایش بعضی شاخص‌های مبتنی بر پیوند بین الیافی با حفظ مقاومت

به شاهد ۴۱/۴۹۲ افزایش یافت و بیشترین مقدار آن، برابر ۶۰/۱۴، در ۱۲۰-۳۰۰ ER ثبت شد؛ میانگین این شاخص در RE برابر $44/16 \pm 4/62$ بود. درجه روانی پس از تیمار آنزیمی در ER و RE به ترتیب $596/89 \pm 15/16$ و $468/27 \pm 33/95$ میلی لیتر استاندارد کانادایی و درجه روانی پس از پالایش در این دو توالی به ترتیب $489/11 \pm 48/39$ و 520 ± 0 میلی لیتر استاندارد کانادایی بود.

توالی ER با میانگین $2/50 \pm 0/24$ $\text{kPa} \cdot \text{m}^2/\text{g}$ بیشتر از شاهد با مقدار ۱/۷۴ بود و بیشترین مقدار آن، معادل ۲/۹۰، در تیمار ۱۲۰-۳۰۰ ER مشاهده شد. درحالی که میانگین این شاخص در توالی RE برابر $1/70 \pm 0/28$ بود. شاخص مقاومت به پاره شدن شاهد $6/34$ $\text{mN} \cdot \text{m}^2/\text{g}$ بود و میانگین آن در توالی های ER و RE به ترتیب به $3/94 \pm 1/13$ و $3/0 \pm 97/60$ کاهش یافت. در مقابل، شاخص مقاومت به کشش در توالی ER با میانگین $51/44 \pm 5/83$ $\text{N} \cdot \text{m}/\text{g}$ نسبت

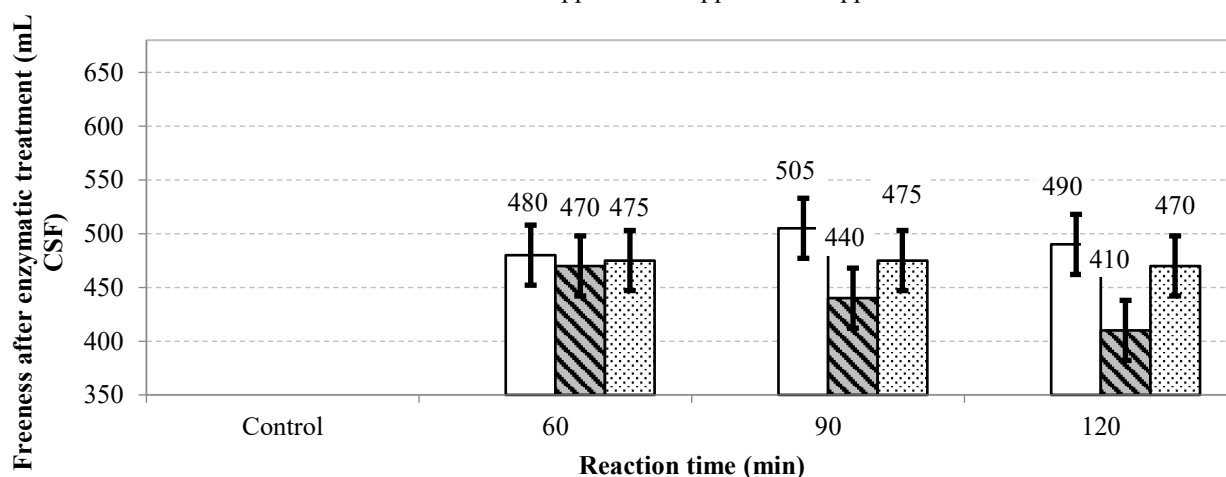
(a) ER: Enzyme → Refining

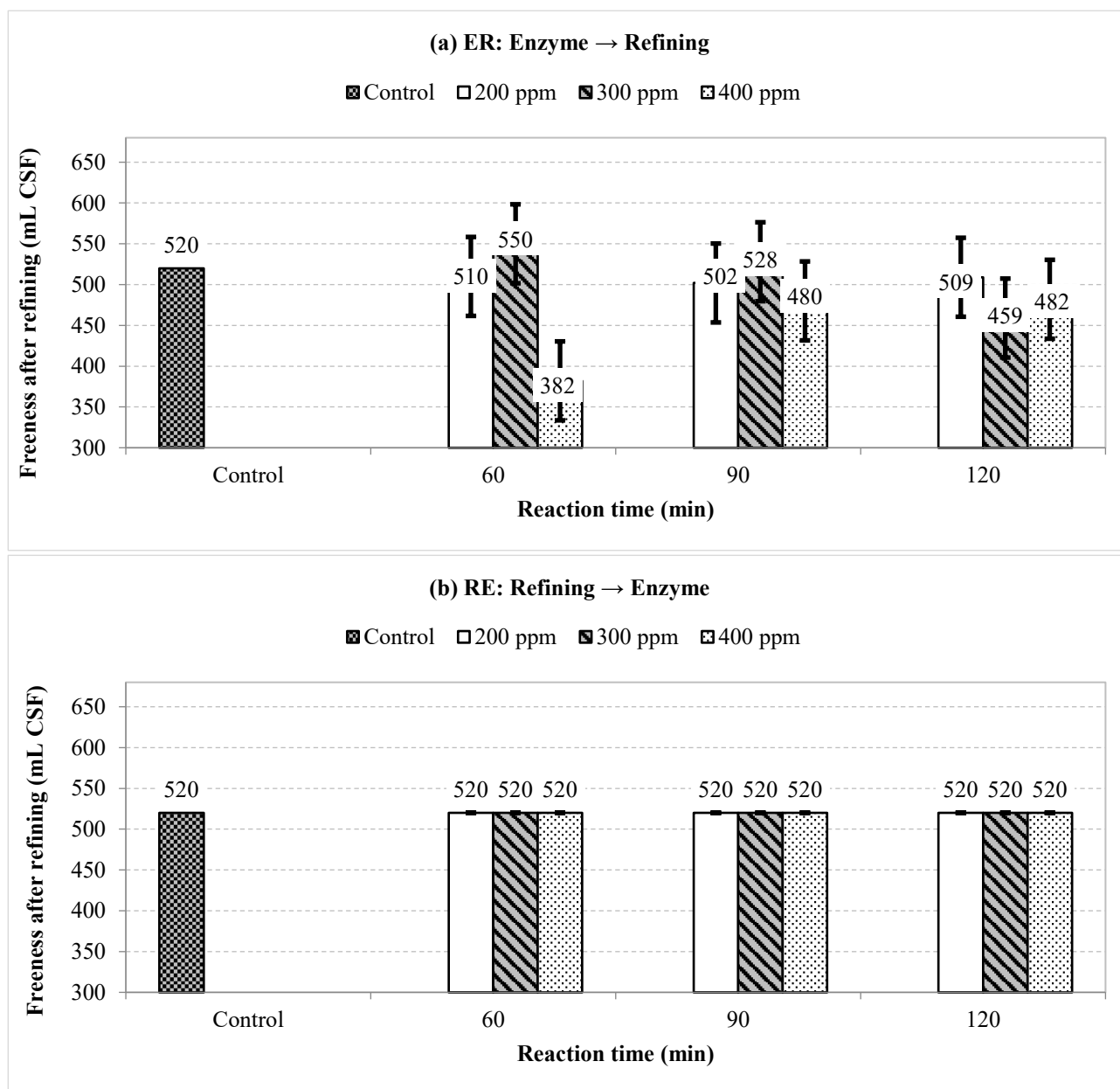
■ Control □ 200 ppm ▨ 300 ppm ▩ 400 ppm



(b) RE: Refining → Enzyme

■ Control □ 200 ppm ▨ 300 ppm ▩ 400 ppm





شکل ۵- اثر غلظت سلولاز و زمان واکنش بر درجه روانی پس از تیمار آنزیمی (بالا) و پس از پالایش (پایین)

Figure 5- Effect of cellulase dosage and reaction time on freeness after enzymatic treatment (top) and after refining (bottom)

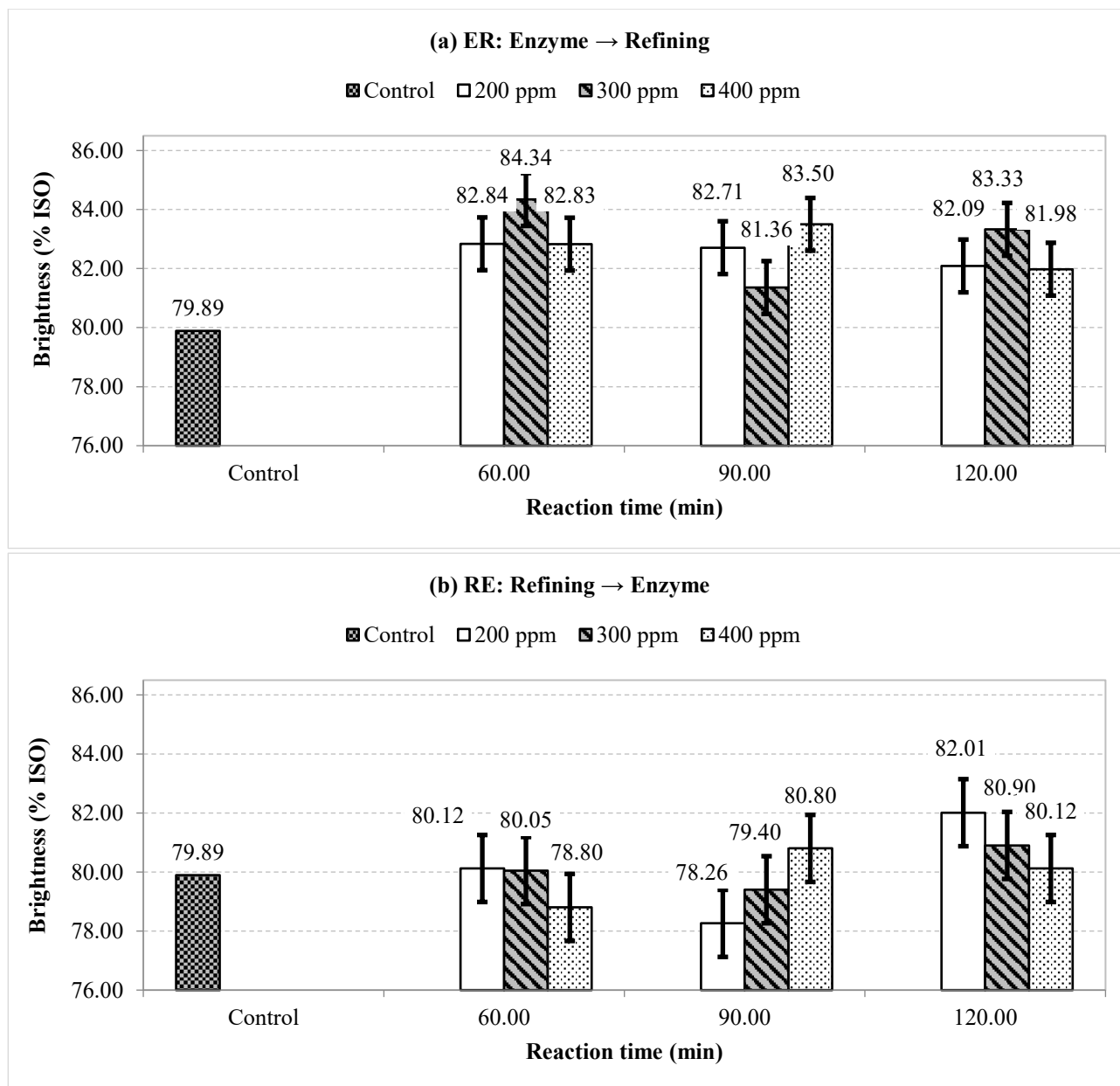
Error bars show sequence SD across nine dose-time condition means (ER: 48.39; RE: 0.00)

دادند؛ در مقابل، مقادیر RE پس از پالایش در حدود ۵۲۰ میلی لیتر استاندارد کانادایی ثابت بودند، زیرا پالایش پیش از افزودن آنزیم انجام شده بود. این الگو اثر مستقیم ترتیب عملیات را بر پاسخ درجه روانی نشان می دهد. همچنین، میانگین روشنی در ER و RE به ترتیب ۰/۸۹

در شکل ۵، درجه روانی پس از مرحله آنزیمی در ER در محدوده ۵۶۶ تا ۶۲۰ میلی لیتر استاندارد کانادایی باقی ماند، اما در RE به محدوده ۴۱۰ تا ۵۰۵ میلی لیتر استاندارد کانادایی کاهش یافت. پس از پالایش، نمونه های ER پراکندگی بیشتری، از ۳۸۲ تا ۵۵۳ میلی لیتر استاندارد کانادایی، نشان

زردی، برابر $10/68$ ، در $200-60$ RE مشاهده شد. مقادیر انحراف معیار گزارش شده بیانگر پراکندگی میان نه میانگین شرایط دوز-زمان در هر توالی می باشد.

$82/78 \pm 1/14$ و $80/05 \pm 1/14$ درصد در مقایسه با $79/89$ درصد در شاهد به دست آمد. میانگین زردی در ER برابر $7/1 \pm 0/32$ و در RE برابر $8/96 \pm 1/08$ بود و بیشترین



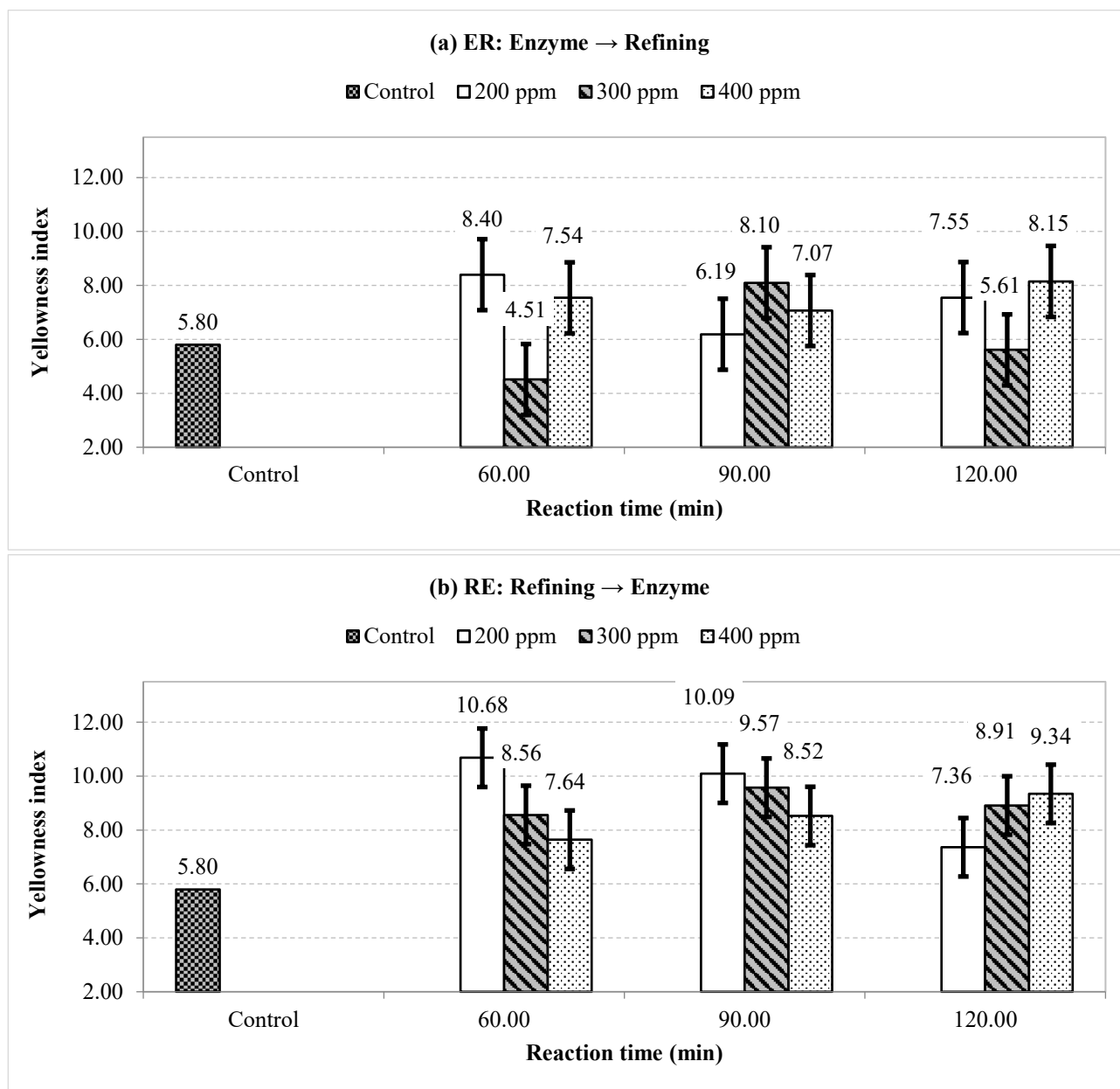
شکل ۶- اثر غلظت سلولاز و زمان واکنش بر درجه روشنی

Figure 6. Effect of cellulase dosage and reaction time on brightness
Error bars show sequence SD across nine dose-time condition means (ER: 0.89; RE: 1.14)

$84/34$ درصد، در $300-60$ ER ثبت شد. در RE تغییرات محدودتر و نامنظم تر بود و چند تیمار پایین تر از شاهد قرار

بر اساس شکل ۶، تمام شرایط ER روشنی بیشتری از شاهد ($79/89$ درصد) ایجاد کردند و بیشترین مقدار، برابر

گرفتند؛ در نتیجه، توالی ER از نظر بهبود پایداری تر روشنی، عملکرد مطلوب‌تری نشان داد.



شکل ۷- اثر غلظت سلولاز و زمان واکنش بر شاخص زردی

Figure 7. Effect of cellulase dosage and reaction time on yellowness index
Error bars show sequence SD across nine dose-time condition means (ER: 1.32; RE: 1.08)

افزایش نامطلوب‌تر زردی همراه شد، هرچند شدت تغییر به غلظت و زمان واکنش وابسته بود.

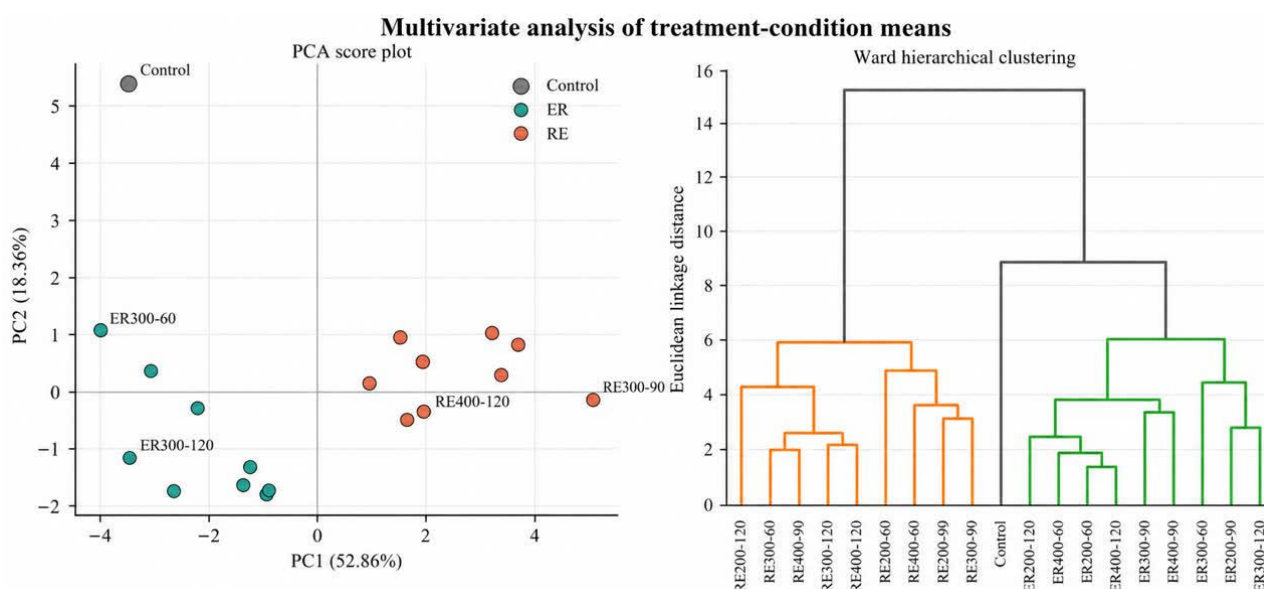
تحلیل چندمتغیره بر پایه میانگین شرطها

برای بررسی هم‌زمان پاسخ‌های مکانیکی، درجه روانی

شکل ۷ نشان می‌دهد که زردی در توالی RE عموماً بیشتر از ER و شاهد بود و بیشترین مقدار ۱۰/۶۸ در ۲۰۰-۶۰ RE مشاهده شد. میانگین زردی ER و RE به ترتیب ۷/۰۱ و ۸/۹۶ بود؛ بنابراین، انجام تیمار آنزیمی پس از پالایش با

تفکیک انتخاب شده، سه گروه اصلی شامل شاهد، شرایط ER و شرایط RE ایجاد کرد. این نتیجه با تفاوت الگوی پاسخ های دو توالی سازگار بود و از مقایسه یک متغیر منفرد فراتر رفت. بررسی توصیفی دوز و زمان نشان داد پاسخ ها یکنواخت و تک جهتی نبودند. $ER_{300-120}$ بیشترین کشش و ترکیب را داشت، اما افزایش غلظت به 400 ppm در زمان ۱۲۰ دقیقه کشش را به $52/91 \text{ N}\cdot\text{m/g}$ کاهش داد؛ بنابراین، ER_{300-} بهترین ترکیب مشاهده شده در دامنه آزمایش بود، نه یک نقطه بهینه پیش بینی شده خارج از شرایط اندازه گیری شده.

مرحله اول، شاخص های نوری و ساختاری، PCA و HCA بر ۱۴ متغیر پاسخ کامل و غیر ثابت اجرا شد. در PCA، مؤلفه های PC_1 و PC_2 به ترتیب $52/86$ و $18/36$ درصد و در مجموع $71/22$ درصد از تغییرات استاندارد شده را توضیح دادند. امتیازهای PCA جدایی مشخصی میان شاهد و بیشتر شرایط ER و RE نشان دادند؛ ER عمدتاً در سمت منفی PC_1 و RE در سمت مثبت آن قرار گرفت. این الگو یک جدایی اکتشافی چندمتغیره است و به تنهایی رابطه علت و معلولی را اثبات نمی کند. خوشه بندی Ward بر پایه فاصله اقلیدسی نیز، در آستانه



شکل ۸- نمودار امتیازهای PCA و دندروگرام Ward بر پایه ۱۴ پاسخ کامل و غیر ثابت
Figure 8. PCA score plot and Ward dendrogram based on 14 complete, nonconstant responses

تا $60/14 \text{ N}\cdot\text{m/g}$ قرار داشت و در ۸ شرط از ۹ شرط بالاتر از شاهد بود. این الگو با این فرض سازگار است که پیش تیمار کنترل شده می تواند تورم و فیبریلایون ناشی از پالایش را تسهیل کند؛ با این حال، این داده تغییرات تورم یا سطح ویژه را مستقیماً اندازه گیری نکرده است. (Ko et al., 2010; Park et al., 2025).

در توالی RE، شاخص مقاومت به کشش در گستره $38/59$ تا $51/58 \text{ N}\cdot\text{m/g}$ بود و سه شرط RE_{200-60} ،

در شکل ۸، دو مؤلفه نخست PCA در مجموع $71/22$ درصد از تغییرات استاندارد شده را توضیح دادند و جدایی مشخصی میان بیشتر شرایط ER و RE ایجاد کردند. دندروگرام Ward نیز شاهد و تیمارهای دو توالی را در گروه های متمایز قرار داد؛ این هم خوانی نشان می دهد که ترتیب انجام تیمار آنزیمی و پالایش، الگوی چندمتغیره پاسخ ها را به طور منسجم تغییر داده است. شاخص مقاومت به کشش شرایط ER در گستره $38/73$

بحث

بررسی ۱۹ ترکیب آزمایشی شامل ۱۸ ترکیب توالی-غلظت-زمان و یک شاهد، نتایج زیر را نشان داد.

۱. توالی ER در مقایسه با RE میانگین بیشتری برای شاخص مقاومت به ترکیدن، شاخص مقاومت به کشش و روشنی داشت. در ۱۲۰-۳۰۰ ER، مقاومت به ترکیدن و مقاومت به کشش نسبت به شاهد به ترتیب ۶۶/۷ و ۴۳/۵ درصد افزایش یافت.

۲. عملکرد RE یکنواخت نبود؛ میانگین مقاومت به کشش آن اندکی بیشتر از شاهد بود، ولی سه شرط کمتر از شاهد قرار گرفتند و میانگین زردی در این توالی افزایش یافت.

۳. شاخص مقاومت به پاره شدن در همه شرایط آزمایشی کمتر از شاهد بود. این محدودیت باید هنگام انتخاب دوز و زمان در کنار مزایای مقاومت به کشش و مقاومت به ترکیدن در نظر گرفته شود؛ تعیین علت دقیق به اندازه‌گیری طول الیاف و نرمه نیاز دارد.

۴. ۱۲۰-۳۰۰ ER بهترین پاسخ ترکیبی مشاهده‌شده در دامنه آزمایش برای مقاومت به کشش و مقاومت به ترکیدن بود. کاهش درجه روانی در تعداد دور ثابت، بهبود پاسخ پالایش را پیشنهاد می‌کند، اما کمی‌سازی صرفه‌جویی انرژی نیازمند سنجش مستقیم انرژی یا منحنی پالایش است.

برآیند یافته‌ها نشان داد توالی افزودن آنزیم، جهت و شدت پاسخ را تغییر می‌دهد. در ER، بهبود غالب در شاخص‌های مبتنی بر پیوند بین الیاف و روشنی مشاهده شد، درحالی‌که RE با میانگین بالاتر زردی همراه بود. کاهش مقاومت به پاره شدن در هر دو توالی نشان می‌دهد که افزایش پیوندپذیری الزاماً به حفظ مقاومت وابسته به طول و یکپارچگی الیاف منجر نمی‌شود. این الگو با گزارش‌های مربوط به پنجره عملیاتی محدود سلولاز سازگار است و نوع خمیرکاغذ، ترکیب آنزیم، دوز و زمان باید برای جلوگیری از هیدرولیز بیش از اندازه کنترل شوند (Bajpai, 1999; Haske-
(Cornelius et al., 2020; Park et al., 2025).

۱۲۰-۲۰۰ RE و ۹۰-۳۰۰ RE مقداری کمتر از شاهد داشتند. تماس آنزیم با الیاف از پیش پالایش‌شده می‌تواند دسترسی به ریزفبریل‌ها را افزایش دهد و در برخی شرایط پیوندپذیری را تضعیف کند، ولی این تبیین باید به‌عنوان سازوکار محتمل و نه مشاهده مستقیم در نظر گرفته شود (Hossein et al., 2015).

تغییرات درجه روانی و پاسخ پالایش

در ER، درجه روانی پس از تیمار آنزیمی و پیش از پالایش در گستره ۵۶۶ تا ۶۲۰ میلی‌لیتر استاندارد کانادایی قرار گرفت. پس از ۱۵۰۰ دور پالایش، مقادیر نهایی ۳۸۲ تا ۵۵۳ میلی‌لیتر استاندارد کانادایی ثبت شد؛ کمترین مقدار مربوط به ۶۰-۴۰۰ ER بود. از آنجاکه همه نمونه‌ها با تعداد دور ثابت پالایش شدند، کاهش بیشتر درجه روانی در برخی شرایط ER نشان‌دهنده تغییر پاسخ خمیر به پالایش است. البته تعیین درصد صرفه‌جویی انرژی نیازمند اندازه‌گیری مستقیم انرژی ویژه یا منحنی درجه روانی-انرژی در چند سطح پالایش است (Poletto et al., 2014).

ویژگی‌های نوری

روشنی شاهد ۷۹/۸۹ درصد بود. همه شرایط ER روشنی بیشتری از شاهد داشتند و بیشترین مقدار، ۸۴/۳۴ درصد، در ۶۰-۳۰۰ ER ثبت شد. این افزایش ممکن است با حذف اجزای سطحی و تغییر پراکندگی نور مرتبط باشد؛ اما ماهیت شیمیایی عامل بدون سنجش مستقیم کروموفورها قابل تعیین نیست.

میانگین روشنی RE برابر ۸۰/۰۵ درصد و اندکی بیشتر از شاهد بود، هرچند در سه شرط ۹۰-۳۰۰ RE، ۹۰-۲۰۰ RE و ۶۰-۴۰۰ RE کمتر از شاهد ثبت شد. میانگین زردی در RE به ۸/۹۶ در برابر ۵/۸۰ شاهد رسید و بیشینه ۱۰/۶۸ در ۶۰-۲۰۰ RE مشاهده شد؛ مقدار b-star نیز تا ۵/۷۰ افزایش یافت. این الگو تغییر نامطلوب رنگ در بخشی از شرایط RE را نشان می‌دهد، اما نسبت‌دادن آن به اکسایش لیگنین یا تشکیل رادیکال بدون تحلیل شیمیایی مستقیم قطعی نیست.

References

- Bajpai, P., 1999. Application of Enzymes in the Pulp and Paper Industry. *Biotechnology Progress*, 15(2): 147-157. DOI: 10.1021/bp990013k
- Choi, Y.H., Shin, W.G. and Shin, S.J., 2025. Impact of Cellulases Treatment on Pulp Refining Process in Papermaking Process. *Journal of Korea TAPPI*, 57(1): 32-40. DOI: 10.7584/JKTAPPI.2025.2.57.1.32
- Efrati, Z., Talaeipour, M., Khakifirouz, A. and Bazayr, B., 2013. Impact of Cellulase Enzyme Treatment on Strength, Morphology and Crystallinity of Deinked Pulp. *Cellulose Chemistry and Technology*, 47(7-8): 547-551.
- FAO., 2025. Forest Product Statistics: Global Production and Trade in Forest Products in 2024. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome. <https://www.fao.org/forestry/statistics/data/en>
- Gharehkhani, S., Sadeghinezhad, E., Kazi, S.N., Yarmand, H., Badarudin, A., Safaei, M.R. and Zubir, M.N.M., 2015. Basic Effects of Pulp Refining on Fiber Properties - A Review. *Carbohydrate Polymers*, 115: 785-803. DOI: 10.1016/j.carbpol.2014.08.047
- Haske-Cornelius, O., Hartmann, A., Brunner, F., Pellis, A., Bauer, W., Nyanhongo, G.S. and Guebitz, G.M., 2020. Effects of Enzymes on the Refining of Different Pulps. *Journal of Biotechnology*, 320: 1-10. DOI: 10.1016/j.jbiotec.2020.06.006
- Hosseini, M.A., Talaeipour, M., Hemmasi, A.H., Bazayr, B. and Mahdavi, S., 2015. Effects of Sequencing Enzyme Application and Refining on DIP Properties Produced from Mixed Office Waste Paper. *BioResources*, 10(3): 4768-4783. DOI: 10.15376/biores.10.3.4768-4783
- Ko, C.H., Tsai, C.H., Lin, P.H., Chang, K.C., Tu, J., Wang, Y.N. and Yang, C.Y., 2010. Characterization and Pulp Refining Activity of a *Paenibacillus campinasensis* Cellulase Expressed in *Escherichia coli*. *Bioresource Technology*, 101(20): 7882-7888. DOI: 10.1016/j.biortech.2010.05.043
- Kumar, A., Ram, C. and Tazeb, A., 2021. Enzyme-Assisted Pulp Refining: An Energy Saving Approach: 155-174. In: Kumar, A., Pathak, P. and Dutt, D., (Eds.). *Green Pulp and Paper Industry: Biotechnology for Ecofriendly Processing*. De Gruyter, Berlin and Boston, 243p. DOI: 10.1515/9783110592412-007
- Li, Y., Wang, C., Wang, T., Liu, Y., Jia, S., Gao, Y. and Liu, S., 2020. Effects of Different Fertilizer Treatments on Rhizosphere Soil Microbiome Composition and Functions. *Land*, 9(9): 329. DOI: 10.3390/land9090329
- Park, S.G., Tak, J.H., Lee, J.Y., Shin, K.S. and Park, S.I., 2025. Evaluation of Cellulase Effect on the Refining Process of Softwood Bleached Kraft Pulp. *BioResources*, 20(1): 1059-1068. DOI: 10.15376/biores.20.1.1059-1068
- Poletto, M., Ornaghi Júnior, H.L. and Zattera, A.J., 2014. Native Cellulose: Structure, Characterization and Thermal Properties. *Materials*, 7(9): 6105-6119. DOI: 10.3390/ma7096105
- Przybysz Buzala, K., Przybysz, P., Kalinowska, H. and Derkowska, M., 2016. Effect of Cellulases and Xylanases on Refining Process and Kraft Pulp Properties. *PLoS ONE*, 11(8): e0161575. DOI: 10.1371/journal.pone.0161575