

ارتقای ویژگی‌های کیفی مخلوط خمیر کاغذهای روزنامه و مجله بازیافتی با تیمار آنزیمی همی سلولاز

- ❖ ایمان اکبرپور*؛ دانشجوی دکتری صنایع خمیر و کاغذ، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، دانشکده مهندسی چوب و کاغذ، گروه صنایع خمیر و کاغذ، گرگان، ایران.
- ❖ علی قاسمیان؛ دانشیار، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، دانشکده مهندسی چوب و کاغذ، گروه صنایع خمیر و کاغذ، گرگان، ایران.
- ❖ حسین رسالتی؛ استاد، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، دانشکده مهندسی چوب و کاغذ، گروه صنایع چوب و کاغذ، ساری، ایران.
- ❖ احمدرضا سرانیان؛ دانشیار، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، دانشکده مهندسی چوب و کاغذ، گروه صنایع خمیر و کاغذ، گرگان، ایران
- ❖ احمد جهان‌تیبیاری؛ استاد، دانشگاه آزاد اسلامی کرج، دانشکده چوب و کاغذ، کرج، ایران.

چکیده

مرکب‌زدایی آنزیمی به‌عنوان روش سازگار با محیط زیست برای تکمیل یا جایگزینی مرکب‌زدایی متداول شیمیایی پیشنهاد شده است. در این پژوهش تأثیر آنزیم همی سلولاز استخراج‌شده از قارچ *Aspergillus niger* بر ویژگی‌های کیفی کاغذ حاصل از مخلوط ۷۰ درصد خمیر کاغذ روزنامه و ۳۰ درصد مجله باطله ارزیابی شد. آنزیم همی سلولاز در سطوح مختلف ۰/۱ (H₁)، ۰/۲ (H₂)، ۰/۵ (H₃) و ۱ درصد (H₄) براساس وزن خشک خمیر کاغذ و زمان‌های مختلف ۴۰ (T₁)، ۵۰ (T₂) و ۶۰ دقیقه (T₃) در شرایط ثابت درصد خشکی ۱۰ درصد، درجه حرارت ۶۰-۵۵°C در محدوده pH ۷-۶/۵ به‌کار گرفته شده و در ادامه خمیر کاغذها شست‌وشو و شناورسازی شدند. نتایج نشان داد که در غلظت آنزیم ۰/۲ درصد و مدت زمان ۶۰ دقیقه (تیمار H₂T₃) یا غلظت آنزیم ۰/۵ درصد و مدت زمان ۵۰ دقیقه (تیمار H₃T₂)، می‌توان کاغذهای به‌مراتب روشن‌تر، سفیدتر و هم‌زمان ماتی مناسب در مقایسه با خمیر کاغذ مرکب‌زدایی نشده (تیمار C₁) و خمیر کاغذ مرکب‌زدایی شده شیمیایی (تیمار C₂) تولید کرد. همچنین در تیمارهای H₂T₃ و H₃T₂ بیشترین میانگین شاخص مقاومت به کشش (۳۲/۲۷۱ و ۳۰/۰۱۷ نیوتن متر بر گرم)، طول پارگی (۳/۱۳۱ و ۲/۹۷۴ کیلومتر) و سفتی کاغذ (۳/۹۴ و ۴/۱۲ میلی نیوتن) و همچنین بیشترین شاخص مقاومت به ترکیبگی (۲/۷۳ و ۲/۴۷۵ کیلوپاسکال متر مربع بر گرم) به‌ترتیب در تیمارهای H₂T₃ و H₃T₂ و بیشترین شاخص مقاومت به پارگی (۷/۶۸۸ و ۷/۳۴۴ میلی نیوتن متر مربع بر گرم) در تیمارهای H₁T₁ و H₁T₂ مشاهده شد که این مقادیر به‌مراتب مطلوب‌تر از کاغذهای حاصل از تیمارهای C₁ و C₂ است. به‌طور کلی نتایج به‌دست آمده از این پژوهش بیانگر آن است که آنزیم همی سلولاز پتانسیل خوبی را در بهبود ویژگی‌های کیفی مخلوط کاغذ روزنامه و مجله بازیافتی (در مقایسه با سیستم متداول صنعتی) دارا می‌باشد.

واژگان کلیدی: کاغذ روزنامه بازیافتی، کاغذ مجله بازیافتی، همی سلولاز، ویژگی‌های نوری، ویژگی‌های مکانیکی.

مقدمه

استفاده از الیاف بازیافتی در چند دهه اخیر به‌طور گسترده افزایش یافته است و در این زمینه فرایند مرکب‌زدایی مرحله مهمی در بازیابی الیاف محسوب می‌شود [۱، ۲]. براساس پیش‌بینی‌ها، تا سال ۲۰۲۰، ضریب رشد حدود ۲ درصد درباره استفاده از گیاهان غیرچوبی و ضریب رشد ۳ درصد در مورد مصرف کاغذهای بازیافتی مطرح شده است که نشان می‌دهد در سال‌های آتی این صنعت باید بخش عمده مواد اولیه ساخت کاغذ را از بازیافت کاغذهای باطله تأمین کند [۳]. در مرکب‌زدایی متداول شیمیایی، مواد شیمیایی زیادی مصرف می‌شود، از این رو به دلیل خروج زیاد مواد آلاینده، به سیستم‌های با تصفیه پساب پرهزینه نیاز است [۴-۶]. در این زمینه برای برطرف کردن این مشکل، مرکب‌زدایی آنزیمی به دلیل کارایی زیاد و اثر زیست‌محیطی کم، توجه زیادی را به خود جلب کرده است [۷]. تیمارهای آنزیمی با حذف نرمه‌های الیاف و همچنین بهبود فیبرله شدن الیاف خمیرهای کاغذ، بازیافتی، موجب بهبود قابلیت آب‌گیری خمیر کاغذ، افزایش سرعت تولید ماشین کاغذ و بهبود ویژگی‌های مقاومتی کاغذ حاصل می‌شود [۸، ۹]. استفاده از آنزیم‌های سلولاز و همی سلولاز به جداسازی فیبریل‌های ریز^۱ تحت عنوان پدیده کنده شدن^۲ الیاف منجر می‌شود و جداسازی مرکب از سطح کاغذ را آسان می‌کند. تغییر آب‌گریزی^۳ ذرات مرکب به دلیل جداسازی فیبریل‌های ریز، میزان جداسازی آلاینده‌ها (جداسازی الیاف/

مرکب) را در مرحله شناورسازی/ شست‌وشو افزایش می‌دهد [۸، ۹].

ارزیابی استفاده از مخلوط آنزیم‌های سلولاز و همی سلولاز در مرکب‌زدایی و قابلیت رنگ‌بری کاغذ روزنامه باطله، بیانگر آن است که استفاده از این آنزیم‌ها موجب بهبود ویژگی‌های نوری و مکانیکی کاغذ می‌شود. ویژگی‌های نوری کاغذ پس از رنگ‌بری بهبود یافت، اما ویژگی‌های مکانیکی کاغذ کاهش یافت. استفاده از درصد آنزیم در مجموع بهترین نتیجه را نشان داده است. به‌طور کلی میزان مصرف ۰/۰۵ درصد برای خمیر کاغذ مرکب‌زدایی‌شده و رنگ‌بری‌نشده و مصرف ۰/۵ درصد برای خمیر کاغذ مرکب‌زدایی‌شده و رنگ‌بری‌شده قادر به تأمین مشخصات لازم به لحاظ ویژگی‌های کیفی برای کاغذ روزنامه مطابق با استاندارد *SNI 14-0091-1998* بوده است [۹]. همچنین نتایج بررسی مرکب‌زدایی مخلوط ۷۰ درصد کاغذ روزنامه باطله (ONP)^۴ و ۳۰ درصد کاغذ مجله باطله (OMG)^۵ با استفاده از ۳ نوع آنزیم سلولاز تجاری (آنزیم‌ها در ابتدای مرحله خمیر کاغذسازی مجدد به میزان ثابت ۳۰۰ U/kg، محدوده pH ۶-۹، زمان ماند ۳ ساعت همراه با افزودن ۰/۰۶ درصد فعال‌ساز سطحی در شرایط ثابت فرایندی افزوده شدند) در مقایسه با سیستم‌های مرکب‌زدایی قلبایی (سیستم متداول صنعتی)^۶ یا سولفیت خنثی^۷ (در محدوده pH خنثی) نشان داد اگرچه آنزیم‌های مورد استفاده قادر به جداسازی معنی‌دار مرکب از مخلوط ONP/OMG (کاهش غلظت مؤثر مرکب باقی‌مانده^۸) بودند، اثربخشی کمتری را در

4. Old newspaper

5. Old magazine

6. Conventional deinking system

7. Neutral sulfite

8. Effective residual ink concentration (ERIC)

1. Small fibrils

2. Peeling

3. Hydrophobicity

مورد خمیر کاغذ مقوای کارت رنگی، مرکب زدایی با سیستم LMS به کاغذهای با درجه روشن‌تر بیشتر (تا حدود ۳ درصد ایزو) و غلظت‌های کمتر مرکب چاپ انجامید [۱۱]. نتایج اثربخشی مرکب زدایی فیزیکی و آنزیمی به‌عنوان فرایندهای بازیابی سازگار با محیط زیست در مورد خمیر کاغذ بازیافتی ONP نشان داد که مرکب زدایی ONP با لاکاز نیازمند افزودن ماده واسطه نیست و درصد کاهش میزان ERIC در حالت ترکیبی زایلاناز- لاکاز (۶۵/۸ درصد) بیشتر از خمیر کاغذهای مرکب زدایی شده با زایلاناز (۴۷/۹ درصد) یا لاکاز (۶۲/۲ درصد) به‌طور مجزا بوده است. همچنین در حالت ترکیبی، افزایش درجه روشن‌تر (۲۱/۶ درصد)، طول پاره شدن (۱۶/۵ درصد)، فاکتور ترکیبگی (۴/۲ درصد)، فاکتور پارگی (۶/۹ درصد)، ویسکوزیته (۱۳ درصد) و کریستالینته سلولز (۱۰/۳ درصد) همراه با کاهش عدد کاپا (۲۲ درصد) و مصرف مواد شیمیایی (۵۰ درصد) مشاهده شد. علاوه بر تغییرات اشاره شده، سطح الیاف (بر اساس تصاویر الکترونی SEM) بسیار فیبریله می‌شود و بررسی‌های مربوط به طیف‌های FTIR بیانگر تغییرات در گروه‌های عاملی سطح الیاف است. استفاده از فرایند ترکیبی مرکب زدایی آنزیمی- فیزیکی در مرکب زدایی ONP، به بهبود درجه روشن‌تر (۲۸/۸ درصد) و کاهش مقدار ERIC (۷۳/۹ درصد) کاغذ منجر می‌شود [۱۲].

با توجه به اینکه استفاده از آنزیم‌ها برای اصلاح یا بازسازی ویژگی‌های الیاف روش مفیدی است و ویژگی‌های الیاف باز یافتی از طریق تیمار با آنزیم‌های سلولزی (مثل سلولاز و همی سلولاز) بهینه می‌شوند، از طرف دیگر با توجه به اینکه در مورد خمیر کاغذهای

مقایسه با مرکب زدایی شیمیایی یا سولفیت نشان دادند. هیچ کدام از آنزیم‌های مورد آزمایش قادر به مرکب زدایی مخلوط ONP/OMG کهنه شده (به‌طور مصنوعی) نبودند و با استفاده از روش شیمیایی و سولفیت، قابلیت مرکب زدایی ضعیفی حاصل شد. تیمار سلولاز به‌تنهایی برای مرکب زدایی کاغذ روزنامه کهنه شده کارآمد نیست، اما ترکیب آنزیم با شیمی سولفیت کارایی مرکب زدایی سولفیت را به‌طور معنی داری افزایش می‌دهد و راهبرد بالقوه‌ای را در pH خنثی به‌منظور دستیابی به مرکب زدایی مؤثر روزنامه کهنه شده ایجاد می‌کند [۱۰]. همچنین ارزیابی‌های انجام گرفته در زمینه کارایی مرکب زدایی آنزیمی الیاف بازیافتی (شامل الیاف روزنامه، مجله و مقوای کارت رنگی^۱) توسط آنزیم‌های هیدرولیزکننده کربوهیدرات^۲ شامل آنزیم‌های سلولاز (با فعالیت‌های اندوگلوکاناز و آگزوگلوکاناز) و همی سلولاز در مقایسه با آنزیم لاکاز بیانگر آن است که آنزیم‌های ذکر شده می‌توانند به‌طور مؤثر موجب مرکب زدایی این نوع خمیر کاغذها شوند. در مورد کاغذ روزنامه بازیافتی همراه با فرایند شناورسازی، درجه روشن‌تر کاغذ تا ۴-۳ درصد ایزو بهبود یافت و در مورد کاغذ مجله بازیافتی نیز با استفاده از آنزیم‌های هیدرولیزکننده کربوهیدرات، درجه روشن‌تر تا ۲/۵ درصد ایزو افزایش پیدا کرد. نتایج استفاده از سیستم لاکاز در حضور عوامل واسطه (LMS)^۳ نشان داد که استفاده از این سیستم به‌تنهایی یا در ترکیب با آنزیم‌های سلولاز و همی سلولاز در مرکب زدایی الیاف مجله و روزنامه مؤثر نیست و به تولید کاغذهایی با درجه روشن‌تر و شاخص جداسازی مرکب بدتر یا کمتر منجر می‌شود، اما در

1. Printed cardboard
2. Carbohydrate hydrolase
3. Laccase mediator system

(rpm=۲۶۵۰) و درصد خشکی ۳ درصد دفییره شدند. خمیرکاغذ حاصل روی الک با مش ۲۰۰ آب‌گیری شده و در ادامه با استفاده از مواد شیمیایی و همچنین آنزیم همی سلولاز به‌طور جداگانه تیمار شدند.

مرکب‌زدایی شیمیایی و آنزیمی مخلوط خمیرکاغذهای ONP و OMG با همی سلولاز

تیمار شیمیایی کاغذهای بازیافتی ONP و OMG با استفاده از مواد شیمیایی (جدول ۱) در شرایط ثابت درصد خشکی ۱۰ درصد، درجه حرارت ۵۵-۵۰ درجه سانتی‌گراد و مدت زمان ۲۰ دقیقه در کیسه‌های پلاستیکی در داخل حمام آب گرم انجام گرفت. در تیمار آنزیمی از آنزیم همی سلولاز به شکل پودری استفاده شد (تهیه شده از شرکت تجاری Sigma Aldrich (محصول Novozyme Corp) با کد تجاری HV۶۴۹). محدوده درجه حرارت نگهداری این آنزیم ۸ درجه سانتی‌گراد و فعالیت آن $\geq 5 \text{ u/mg}$ ذکر شده است. شایان ذکر است فعالیت ۱u آنزیم همی سلولاز به‌عنوان مقدار آنزیم لازم برای جداسازی یک میکرومول D-گالاکتوز از همی سلولز در مدت زمان یک ساعت، $\text{pH} = 5/5$ و دمای ۳۷ درجه سانتی‌گراد تعریف شده است. در پایان تیمارهای آنزیمی به‌منظور غیرفعال کردن آنزیم باقی‌مانده در خمیرکاغذ، از پراکسید هیدروژن به مقدار ۰/۰۵ درصد (براساس وزن خشک خمیرکاغذ) طی دوره زمانی ۱۰ دقیقه استفاده شد. شرایط کلی تیمارهای آنزیمی و همچنین تیمارهای شیمیایی در جدول ۱ آمده است.

بازیافتی بهینه‌سازی مصرف آنزیم (در این تحقیق آنزیم همی سلولاز) تحقیقی انجام نگرفته است، در این پژوهش، از آنزیم همی سلولاز در سطوح مختلف میزان مصرف و همچنین زمان‌های مختلف تیمار آنزیمی در مرکب‌زدایی مخلوط کاغذ روزنامه و مجله بازیافتی (به‌ترتیب با نسبت ۳۰/۷۰ درصد) استفاده شد و اثربخشی آن در مقایسه با خمیرکاغذهای مرکب‌زدایی نشده و مرکب‌زدایی شده شیمیایی ارزیابی شد. شایان ذکر است که کاغذ روزنامه باطله در اثر بازیافت با افت ویژگی‌های کیفی زیادی مواجه می‌شود و از کاغذ حاصل نمی‌توان دوباره در ساخت کاغذ روزنامه استفاده کرد. از این‌رو از کاغذ مجله به‌عنوان تقویت‌کننده کاغذ روزنامه به‌منظور کاهش افت ویژگی‌های کیفی کاغذ نهایی استفاده شده است.

مواد و روش‌ها

تهیه و آماده‌سازی کاغذ ONP و OMG

کاغذهای روزنامه (همشهری) و مجله باطله (خانواده سبز) از دفترهای مرکزی شرکت‌های فروش کاغذ باطله در شهر گرگان خریداری شد. این کاغذها پس از خریداری در کیسه‌های پلاستیکی مجزا، به دور از شرایط نامطلوب (نور آفتاب و دمای نامطلوب) قرار داده شدند. شایان یادآوری است که از زمان چاپ کاغذها (سن کاغذ چاپ)، یک هفته گذشته بود. درصد رطوبت کاغذهای باطله (پس از خرد شدن و تبدیل به ابعاد مناسب) مطابق با استاندارد T 412 om-02 آیین‌نامه تاپی^۱ اندازه‌گیری شد. کاغذهای باطله خردشده پس از خیساندن در آب به مدت ۲۴ ساعت، در داخل دستگاه پراکنده‌ساز به مدت ۱۵ دقیقه با تعداد دور ۳۹۷۵۰

جدول ۱. شرایط کلی تیمارهای آنزیمی با همی سلولاز

مدت زمان تیمار آنزیمی (دقیقه)	شرایط متغیر غلظت آنزیم مصرفی (درصد)		کد تیمار
	(به ازای وزن خشک خمیر کاغذ)		
	IU	درصد	
۴۰	۵	۰/۱	H ₁ T ₁
۵۰	۵	۰/۱	H ₁ T ₂
۶۰	۵	۰/۱	H ₁ T ₃
۴۰	۱۰	۰/۲	H ₂ T ₁
۵۰	۱۰	۰/۲	H ₂ T ₂
۶۰	۱۰	۰/۲	H ₂ T ₃
۴۰	۲۵	۰/۵	H ₃ T ₁
۵۰	۲۵	۰/۵	H ₃ T ₂
۶۰	۲۵	۰/۵	H ₃ T ₃
۴۰	۵۰	۱	H ₄ T ₁
۵۰	۵۰	۱	H ₄ T ₂
۶۰	۵۰	۱	H ₄ T ₃

اندازه‌گیری ویژگی‌های کیفی کاغذ دست‌ساز کاغذهای دست‌ساز استاندارد (۶۰ گرمی) با استفاده از دستگاه کاغذساز مدل PTI^۱ مطابق با آیین‌نامه sp-۰۲ T₂₀₅ ساخته شدند و ویژگی‌های نوری آن شامل درجه روشنایی و زردی (۰۲-om-۴۵۲ T₄₅₂)، سفیدی (۹۶ T₅₆₀ pm-۰۱) ماتی و ضریب جذب نور (۰۱-om-۲۵ T₂₅) و ویژگی‌های مکانیکی شامل شاخص مقاومت به کشش، طول پارگی و سفتی (۰۱-om-۹۴ T₄₉₄)، شاخص مقاومت به پارگی (۰۴-om-۱۴ T₁₄) و شاخص مقاومت به ترکیدگی (۰۲-om-۰۳ T₃) اندازه‌گیری شد.

تجزیه و تحلیل آماری

در این پژوهش از طرح کاملاً تصادفی برای مقایسه نتایج اندازه‌گیری ویژگی‌های کیفی کاغذ تولیدی در فازهای مرکب‌زدایی و رنگ‌بری خمیر کاغذ (به‌طور جداگانه) استفاده شد. تجزیه واریانس داده‌ها با استفاده

در ادامه خمیر کاغذهای پیش‌تیمار شده با مواد شیمیایی و آنزیم با استفاده از روش ترکیبی (فرایندهای شست‌وشو و شناورسازی) مرکب‌زدایی شدند. ابتدا شست‌وشوی خمیر کاغذ روی الک با مش ۲۰۰ به مدت حدود ۱۰ دقیقه تحت فشار آب یکنواخت در زیر شیر آب (در مسیر شیر آب دستگاه فیلتر برای تصفیه آب تعبیه شده است) و سپس فرایند شناورسازی در داخل سلول شناورسازی (ظرفیت دستگاه: ۲۰ لیتر، سرعت همزن: ۱۳۰۰ دور در دقیقه و سرعت جریان هوا: ۱۰ لیتر در دقیقه) در زمان ۲۰ دقیقه، درصد خشکی ۰/۸ درصد همراه با افزودن ۰/۳۳ درصد کلرید کلسیم و ۰/۲ درصد ماده فعال‌ساز پلی‌سوربات Tween 80 (براساس وزن خشک خمیر کاغذ) در محدوده pH ۸-۸/۵ انجام گرفت. خمیر کاغذهای شناورسازی شده پس از آب‌گیری روی الک با مش ۲۰۰ در کیسه‌های پلی‌اتیلنی قرار داده شدند و سپس از آنها کاغذ دست‌ساز استاندارد ساخته شد.

درجه روشنی (۱۰/۰۴ درصد)، افزایش سفیدی (۳۸/۰۹ درصد) و کاهش زردی (۱۳/۰۱ درصد) نسبت به نمونه خمیر کاغذ مرکب‌زدایی نشده مشاهده شد. این در حالی است که در مقایسه با خمیر کاغذ مرکب‌زدایی شده شیمیایی، این تیمار حدود ۱/۳۸ درصد درجه روشنی بیشتر، ۲۲/۵۱ درصد سفیدی بیشتر و ۸/۹۳ درصد زردی کمتری دارد. همچنین تیمار H_2T_3 ، در مقایسه با خمیر کاغذ مرکب‌زدایی نشده از درجه بیشتر (۸/۶۹ درصد)، سفیدی بیشتر (۳۱/۷۵ درصد) و زردی کمتر (۲۰/۱۱ درصد) برخوردار است و نسبت به خمیر کاغذ مرکب‌زدایی شده شیمیایی نیز درجه روشنی بیشتر (۰/۲ درصد)، سفیدی بیشتر (۱۴/۵۷ درصد) و زردی کمتر (۱۶/۳۶ درصد) داشتند. به طور کلی در سطوح مختلف زمانی، با افزایش میزان مصرف آنزیم همی سلولاز، بهبود درجه روشنی و سفیدی و همچنین کاهش زردی کاغذ معنی‌دار شد، اما با افزایش مدت زمان تیمار آنزیمی، افزایش غلظت آنزیم تا حدی تأثیر مثبت بر درجه روشنی و سفیدی کاغذ داشته و غلظت‌های بیشتر تأثیر منفی بر این ویژگی‌ها نداشته است، هرچند در بعضی سطوح به لحاظ آماری معنی‌دار نبود. از طرف دیگر، در غلظت‌های مختلف کمتر آنزیم مصرفی (۰/۱-۰/۲ درصد)، افزایش مدت زمان تیمار آنزیمی به بهبود درجه روشنی و کاهش زردی کاغذ منجر شد. در زمان‌های کوتاه‌تر تیمار آنزیمی (۴۰ دقیقه)، افزایش غلظت آنزیم (از ۰/۰۲۵ درصد به ۱ درصد) به‌طور صعودی به افزایش درجه روشنی و کاهش زردی کاغذ منجر شد، اما در زمان‌های طولانی‌تر (۶۰ دقیقه) افزایش میزان مصرف آنزیم به بیش از ۰/۲ درصد، به کاهش درجه روشنی و افزایش زردی کاغذ انجامید، هرچند این تغییرات به لحاظ آماری معنی‌دار نبود. بیشترین درجه

از نرم‌افزار آماری SAS 9.1 و مقایسه میانگین‌ها آنها به کمک آزمون دانکن در سطح اطمینان آماری ۹۹ درصد انجام گرفت.

نتایج و بحث

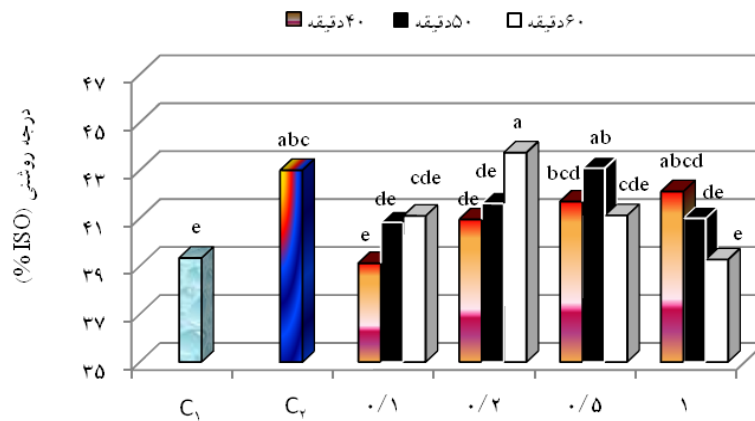
تأثیر پیش‌تیمار آنزیمی با همی سلولاز بر ویژگی‌های کاغذ

ویژگی‌های نوری

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که استفاده از آنزیم همی سلولاز در شرایط مختلف در مقایسه با خمیر کاغذ مرکب‌زدایی نشده و خمیر کاغذ مرکب‌زدایی شده به روش متداول شیمیایی، به تغییرات معنی‌دار (سطح اطمینان آماری ۹۹ درصد) مقادیر درجه روشنی، سفیدی و زردی (شکل‌های ۱ تا ۳) کاغذ منجر شد. با افزایش میزان مصرف آنزیم و زمان تیمار آنزیمی، شدت این تغییرات کمی بیشتر شده است. از طرفی در غلظت‌های کمتر از ۰/۲ درصد، افزایش مدت زمان تیمار آنزیمی تا ۵۰ دقیقه تأثیر معنی‌داری بر مقادیر درجه روشنی و زردی کاغذ نشان نداد، این در حالی است که در غلظت‌های بیشتر، این تغییرات مشهودتر بود. همان‌طور که در شکل‌های ۱ تا ۳ مشاهده می‌شود، مرکب‌زدایی شیمیایی به افزایش درجه روشنی (۸ درصد) و سفیدی (۲۰/۱ درصد) و کاهش زردی (۴/۴۸ درصد) کاغذ حاصل منجر شد. در مورد تیمارهای آنزیمی، نتایج حاکی از آن است که با استفاده از آنزیم همی سلولاز، افزایش درجه روشنی و سفیدی کاغذ و کاهش زردی کاغذ معادل مرکب‌زدایی شیمیایی و گاه بیشتر از نمونه شاهد (نمونه خمیر کاغذ مرکب‌زدایی شده به روش شیمیایی) است. برای مثال در تیمار H_2T_3 ، افزایش

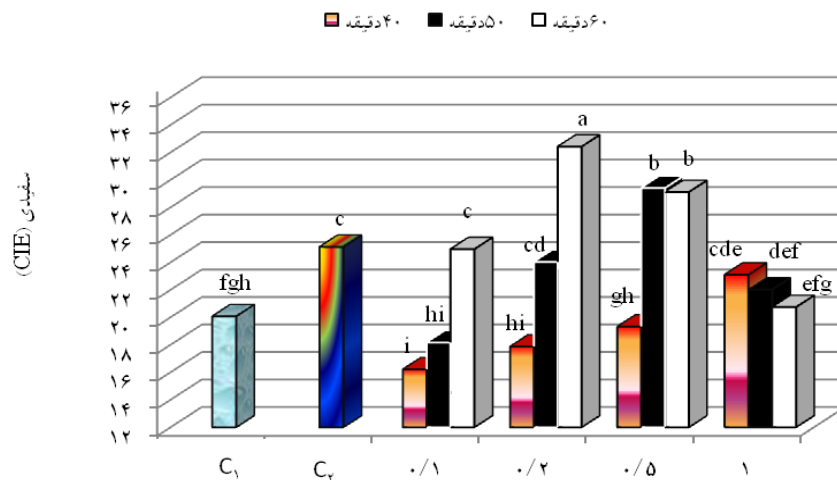
است (جدول ۲). در غلظت‌های متوسط (۰/۲-۰/۱ درصد)، افزایش مدت زمان تیمار آنزیمی تا ۶۰ دقیقه کاهش معنی‌دار ماتی را نشان داد، اما در غلظت‌های بیشتر، تأثیر تیمارهای آنزیمی معنی‌دار نبود. به‌طور کلی ماتی خمیر کاغذهای مرکب‌زدایی‌شدهٔ آنزیمی نسبت به خمیر کاغذهای C_1 و C_2 کمتر است که این با توجه به ضریب جذب نور کمتر در این خمیر کاغذها به‌دلیل وجود ذرات مرکب کمتر در کاغذ توجیه‌پذیر است.

روشنی و سفیدی و همچنین کمترین میزان زردی در بین تیمارهای آنزیمی انجام‌گرفته در دو تیمار H_2T_2 (به‌ترتیب ۴۳/۷۳ درصد ایزو، ۳۲/۴۱۹ درصد و ۱۰/۳۳۶ درصد ایزو) و H_2T_1 (به‌ترتیب ۴۳/۰۸ درصد ایزو، ۲۹/۴۰۷ درصد و ۹/۵۷ درصد ایزو) مشاهده شده است. نتایج مقایسهٔ ماتی و ضریب جذب نور کاغذهای ساخته‌شده نشان داد که در مقایسه با نمونهٔ C_1 ، تیمارهای آنزیمی و شیمیایی کاغذ باطله به کاهش ماتی در نتیجهٔ کاهش ضریب جذب نور کاغذ منجر شده



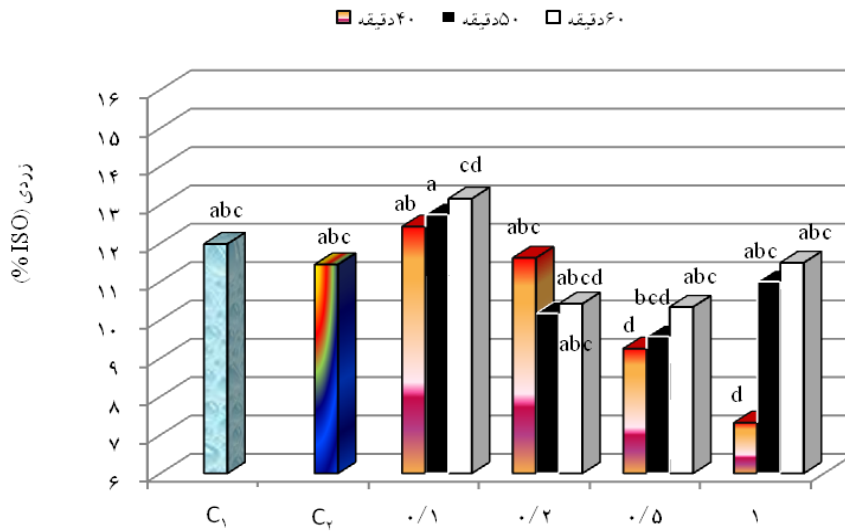
مصرف آنزیم همی سلولاز (درصد)

شکل ۱. تأثیر شرایط مختلف تیمار آنزیمی با همی سلولاز بر درجهٔ روشنایی



مصرف آنزیم همی سلولاز (درصد)

شکل ۲. تأثیر شرایط مختلف تیمار آنزیمی با همی سلولاز بر سفیدی کاغذ



مصرف آنزیم همی سلولاز (درصد)

شکل ۳. تأثیر شرایط مختلف تیمار آنزیمی با همی سلولاز بر زردی کاغذ

جدول ۲. مقایسه ماتنی و ضریب جذب نور کاغذ در شرایط مختلف تیمار آنزیمی با همی سلولاز

ضریب جذب نور (% ISO)	ماتی (% ISO)	ویژگی کاغذ کد تیمار
۱۸/۷۱ ^a	۹۹/۷۴ ^a	C ₁
۱۳/۶۹ ^{bc}	۹۸/۳۵ ^{ab}	C ₂
۱۵/۳۹ ^b	۹۷/۳۹ ^{bc}	H ₁ T ₁
۱۴/۱۶ ^{bc}	۹۶/۳۲ ^{cd}	H ₁ T ₂
۱۴/۹۱ ^b	۹۵/۸۳ ^{cd}	H ₁ T ₃
۱۴/۰۲ ^{bc}	۹۶/۱۱۷ ^{cd}	H ₂ T ₁
۱۱/۳۹ ^{cdef}	۹۵/۱۳۴ ^{de}	H ₂ T ₂
۱۰/۲۲ ^{ef}	۹۱/۴۶ ^h	H ₂ T ₃
۱۴/۷۲ ^b	۹۴/۵۱۱ ^{def}	H ₃ T ₁
۹/۷۵ ^f	۹۲/۱۴ ^{gh}	H ₃ T ₂
۱۰/۷۲ ^{def}	۸۹ ⁱ	H ₃ T ₃
۱۳ ^{bcde}	۹۳ ^{efgh}	H ₄ T ₁
۱۱/۳۱۸ ^{cdef}	۹۳/۶۷ ^{efg}	H ₄ T ₂
۱۲/۶۹ ^{bcdef}	۹۲/۳۹ ^{fgh}	H ₄ T ₃

الیاف افزایش می‌یابد، در نتیجه امکان جداسازی بیشتر مرکب چاپ چسبیده به الیاف فراهم می‌شود. از این رو نسبت به خمیر کاغذ مرکب‌زدایی نشده (تیمار C₁)، با توجه به جدا شدن مرکب چاپ، درجه روشن‌تری و سفیدی کاغذ بهبود یافت و کمی از ماتنی و ضریب

همان‌طور که می‌دانیم، در مرکب‌زدایی به روش متداول شیمیایی، مواد شیمیایی مختلفی مصرف می‌شوند که هر کدام تأثیر متفاوتی در کیفیت نهایی کاغذ حاصل دارند [۱، ۱۳]. در مرکب‌زدایی شیمیایی با توجه به بهبود واکنش الیاف (به دلیل وجود NaOH)، انعطاف‌پذیری

می‌کند و تأثیر مواد شیمیایی رنگ‌بری را افزایش می‌دهد، در نتیجه هزینه مصرف مواد شیمیایی رنگ‌بری و عوامل براق‌کننده نوری^۳ کاهش می‌یابد [۱۷].

آنزیم همی سلولاز با هیدرولیز سطحی همی سلولز و جداسازی و آزاد کردن میکروفیبریل‌های سطحی الیاف در نتیجه جداسازی مرکب چاپ از کاغذ، موجب بهبود درجه روشنایی می‌شود [۱۱]. همان‌طور که در شکل‌های ۲ تا ۵ مشاهده می‌شود، با استفاده از آنزیم همی سلولاز در سطوح مختلف و زمان‌های مختلف می‌توان به کاغذ با ویژگی‌های نوری مشابه یا حتی بهتر از خمیر کاغذهای مرکب‌زدایی‌نشده (تیمار C_۱) یا مرکب‌زدایی‌شده به روش متداول شیمیایی (تیمار C_۲) دست یافت. در غلظت آنزیم ۰/۲ درصد و مدت زمان ۶۰ دقیقه (تیمار H_۲T_۲) یا غلظت آنزیم ۰/۵ درصد و مدت زمان ۵۰ دقیقه (تیمار H_۲T_۲)، می‌توان کاغذهای به‌مراتب روشن‌تر، سفیدتر (با زردی کمتر) و هم‌زمان ماتی مناسب در مقایسه با تیمارهای C_۱ و C_۲ دست یافت. برای مثال با پیش‌تیمار آنزیمی H_۲T_۲ می‌توان کاغذ با درجه روشنایی و سفیدی بیشتر (به ترتیب ۱/۶۸ و ۲۲/۵۱ درصد) و زردی کمتر (۸/۹۳ درصد) در مقایسه با کاغذ حاصل از تیمار C_۲ تولید کرد. در زمان‌های کوتاه‌تر تیمار آنزیمی (۵۰-۴۰ دقیقه)، افزایش غلظت آنزیم تا سطح مصرف ۰/۵ درصد به کاهش ضریب جذب نور کاغذ (در نتیجه افزایش جزئی ماتی) کاغذ منجر شد که با توجه به افزایش درجه روشنایی و سفیدی کاغذ در اثر خروج مرکب چاپ و سایر آلاینده‌ها، توجیه‌پذیر است؛ اما در زمان‌های طولانی‌تر (۶۰ دقیقه)، افزایش غلظت آنزیم به بیش از ۰/۱ درصد موجب کاهش ضریب جذب نور کاغذ شد و با افزایش بیشتر آنزیم مصرفی، ضریب

جذب نور کاغذ کاسته شد. وجود NaOH در ترکیب مواد شیمیایی مرکب‌زدایی می‌تواند تأثیر مستقیم بر فیلم مرکب چاپ داشته باشد، در نتیجه با تفکیک شدن و شکستن مرکب چاپ، امکان خروج آنها طی فرایندهای شست‌وشو شناورسازی آسان‌تر می‌شود [۱۴].

مرکب‌زدایی با استفاده از آنزیم‌ها به آلودگی کمتر، صرفه‌جویی در مصرف انرژی و همچنین مشکلات دفن سطحی^۱ کمتر منجر می‌شود. آنزیم‌های قابل استفاده در مرکب‌زدایی شامل پکتیناز، همی سلولاز، سلولاز و آنزیم‌های تجزیه‌کننده لیگنین^۲ هستند. این آنزیم‌ها سطح الیاف یا اتصالات نزدیک به ذرات مرکب را تغییر می‌دهند و موجب خروج مرکب چاپ از سطح الیاف می‌شوند، در نتیجه مرکب و سایر آلاینده‌ها طی فرایندهای شست‌وشو یا شناورسازی خارج می‌شوند [۱۵]. در زمینه مرکب‌زدایی آنزیمی گزارش شده است که از آنزیم‌های سلولاز و همی سلولاز می‌توان به‌منظور اصلاح ویژگی‌های الیاف برای تغییر یا بهبود ویژگی‌های کاغذ استفاده کرد. تیمار الیاف با انواع مختلف سلولاز یا همی سلولاز بدون تأثیر بر ویژگی‌های مقاومتی کاغذ، موجب صرفه‌جویی انرژی در کوبیدن و پالایش خمیر کاغذ یا کاهش زمان لازم برای رسیدن به سطح مشخصی از کوبیدن یا پالایش می‌شود [۹]. در اثر تیمار آنزیمی با زیلاناز درجه روشنایی خمیر کاغذ بهبود می‌یابد. آنزیم‌های همی سلولاز مثل زیلاناز با جداسازی زیلان کروموفوریک (هگزانورانیک اسید) از سطح الیاف و نرمه‌ها به بهبود درجه روشنایی و کاهش زردی کاغذ منجر می‌شوند [۱۶]. زیلاناز مصرفی در رنگ‌بری، زیلانازهای رسوب‌داده‌شده روی سطح الیاف را جدا

1. Disposal
2. Lignolytic enzymes

جذب نور کاغذ به‌طور صعودی افزایش یافت؛ این نتیجه مؤید آن است که در شرایط مذکور، رسوب مجدد مرکب چاپ رخ داده و به همین دلیل درجه روشنایی و سفیدی کاغذ نیز کاهش یافته است. ذرات مرکب در مقایسه با الیاف و نرمه‌های خمیر کاغذ قابلیت جذب نور بیشتری دارند، از این رو وجود ذرات بیشتر مرکب چاپ در ساختار کاغذ به دلیل افزایش میزان جذب نور کاغذ، موجب افزایش ماتی کاغذ خواهد شد [۱، ۱۸]. در شرایط بسیار شدیدتر (غلظت‌های بیشتر و زمان‌های طولانی‌تر)، افت درجه روشنایی و سفیدی کاغذ بیشتر شد و ماتی کاغذهای ساخته‌شده نیز کمی افزایش یافت. با توجه به افزایش ضریب جذب نور کاغذ، می‌توان استنباط کرد که ذرات مرکب چاپ یا همی سلولزهای سطحی الیاف (مثلاً زایلان‌ها) دوباره روی سطح الیاف رسوب یافته‌اند.

استفاده از آنزیم‌های همی سلولاز مثل زایلاناز، سبب جداسازی همی سلولزهای سطحی (زایلان) الیاف می‌شود و در شرایط شدید ممکن است همی سلولزهای جداشده بر روی الیاف رسوب کنند که این ترکیبات را می‌توان در بخش رنگ‌بری دوباره با زایلاناز خارج کرد و هزینه مواد شیمیایی رنگ‌بری را کاهش داد [۱۷]. با توجه به تأثیر پدیده کنده شدن فیبریل‌های سطحی الیاف یا توسعه فیبریل شدن الیاف ضمن تأثیر آنزیم، با افزودن میزان مصرف آنزیم و حتی مدت زمان تیمار آنزیمی، کمی درجه روشنایی و سفیدی کاغذ (همزمان با کاهش زردی و ماتی) بهبود یافت، هرچند در بعضی از سطوح تیمارهای انجام‌گرفته، به لحاظ آماری اختلاف معنی‌داری وجود ندارد. به‌طور کلی با افزایش میزان مصرف آنزیم همی سلولاز و همچنین مدت زمان تیمار آنزیمی، شدت تغییرات مجموع ویژگی‌های نوری کاغذ کمی بیشتر

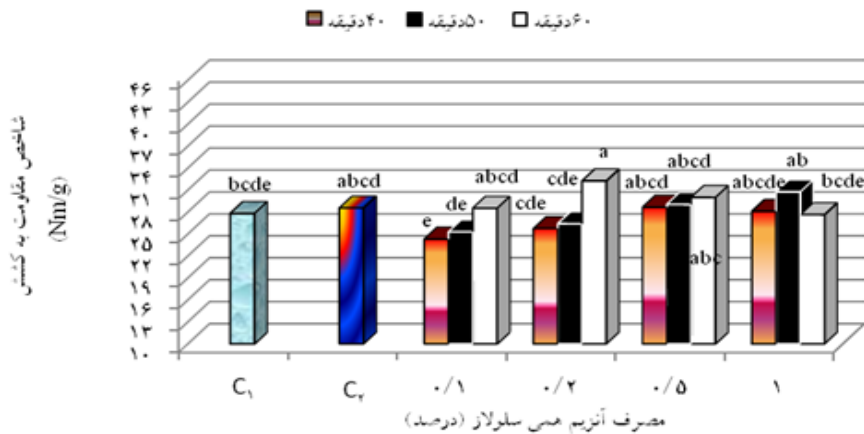
شده است که نشان می‌دهد شدت تأثیر آنزیم بر جدا شدن فیبریل‌ها و ظاهر شدن میکروفیبریل‌های سطحی الیاف در نتیجه خروج آسان‌تر مرکب چاپ از ترکیب کاغذ افزایش می‌یابد. از طرف دیگر، می‌توان انتظار داشت که با شدیدتر کردن شرایط تیمار آنزیمی، امکان خارج شدن گروه‌های کروموفوریک از خمیر کاغذ بیشتر شود، از این رو بهبود درجه روشنایی و سفیدی کاغذ توجیه‌پذیر باشد. در این زمینه نتایج تحقیقات سیمیمجانا^۱ و همکاران (۲۰۰۳) در مورد مرکب‌زدایی و قابلیت رنگ‌بری کاغذ روزنامه باطله با مخلوط آنزیم‌های سلولاز-همی سلولاز حاکی از آن است که استفاده از مخلوط آنزیم موجب افزایش ویژگی‌های نوری (پس از مرکب‌زدایی و رنگ‌بری) و مکانیکی کاغذ (تنها پس از مرکب‌زدایی) می‌شود. در مجموع مقدار مصرف ۰/۰۵ درصد برای خمیر کاغذ مرکب‌زدایی‌شده و رنگ‌بری‌نشده و مصرف ۰/۵ درصد برای خمیر کاغذ مرکب‌زدایی‌شده و رنگ‌بری‌شده برای تأمین نیازمندی‌های کاغذ روزنامه (مطابق با استاندارد *SNI 14-0091-1998*) توصیه شده است [۹].

ویژگی‌های مکانیکی

شاخص مقاومت به کشش، سفتی و ترکیب نتایج بررسی تأثیر سطوح مختلف مصرف همی سلولاز و زمان‌های مختلف تیمار آنزیمی بر ویژگی‌های کشش و سفتی کاغذ نشان داد که در مقایسه با C_1 و C_2 ، با استفاده از تیمارهای آنزیمی همی سلولاز می‌توان کاغذهای با شاخص مقاومت به کشش مشابه با تیمارهای C_1 و C_2 تولید کرد. در مورد مرکب‌زدایی شیمیایی با توجه به اینکه pH اولیه سیستم در محدوده

اطمینان ۹۹ درصد) منجر شد، اما در غلظت‌های بیشتر از ۰/۲ درصد، شاخص مقاومت به کشش کاغذ کاهش غیرمعنی‌داری یافتند. بیشترین میانگین شاخص مقاومت به کشش (۳۲/۲۷۱ و ۳۰/۰۱۷ نیوتن متر بر گرم)، طول پارگی (۳/۱۳۱ و ۲/۹۷۴ کیلومتر) و سفتی کاغذ (۳/۹۴ و ۴/۱۲ میلی نیوتن) به ترتیب در تیمارهای H_2T_2 و H_2T_3 مشاهده شده که این مقادیر به مراتب مطلوب‌تر از کاغذهای حاصل از تیمارهای C_1 و C_2 است (شکل ۴ و جدول ۳). نتایج تجزیه واریانس مقادیر شاخص مقاومت به ترکیدگی کاغذها بیانگر آن است که تیمارهای آنزیمی همی سلولاز و همچنین تیمار شیمیایی کاغذ با زیافتی به بهبود معنی‌دار شاخص مقاومت به ترکیدگی کاغذ در مقایسه با خمیر کاغذ مرکب‌زدایی نشده منجر شده است. آزمون دانکن این مقادیر را در چهار گروه مجزا قرار داده است (جدول ۳). مرکب‌زدایی شیمیایی موجب بهبود ۲/۹۴ درصد در شاخص مقاومت به ترکیدگی کاغذهای حاصل شد. به طور کلی با اعمال تیمارهای آنزیمی در سطوح مختلف غلظت و زمان‌های تیمار آنزیمی، می‌توان به کاغذهای با شاخص مقاومت به ترکیدگی به مراتب بیشتر از تیمارهای C_1 و C_2 دست یافت. در سطوح مصرفی ۰/۲-۰/۱ درصد، افزایش مدت زمان تیمار آنزیمی موجب افزایش شاخص مقاومت به ترکیدگی کاغذ شد، اما در غلظت‌های بیشتر از ۰/۲ درصد، طولانی‌تر کردن مدت زمان واکنش (۵۰ دقیقه) بهبود غیرمعنی‌دار شاخص مقاومت به ترکیدگی کاغذ را نشان داد، اما در زمان‌های بیشتر (۶۰ دقیقه)، شاخص مقاومت به ترکیدگی کاغذ کاهش یافت. به طور کلی در بین تیمارهای مختلف آنزیمی، بیشترین شاخص مقاومت به ترکیدگی مربوط به تیمارهای H_2T_2 و H_2T_3 (به ترتیب ۲/۷۳ و ۲/۴۷۵ $kP.m^2/g$) است (جدول ۳).

قلیایی است، با توجه به بهبود واکنشیدگی الیاف، قابلیت انعطاف‌پذیری الیاف افزایش می‌یابد، در نتیجه امکان جداسازی بیشتر مرکب چسبیده به الیاف فراهم می‌شود. بنابراین نسبت به خمیر کاغذ مرکب‌زدایی نشده، با توجه به جداسازی بیشتر الیاف از ترکیب کاغذ و بهبود اتصال بین الیاف می‌توان انتظار داشت که ویژگی‌های مکانیکی کاغذ کمی افزایش یابد [۴، ۱۴]. نتایج تجزیه واریانس نشان داد که با تیمارهای شیمیایی و آنزیمی، ویژگی‌های شاخص مقاومت به کشش (شکل ۴)، طول پارگی و همچنین سفتی کاغذ (جدول ۳) به طور معنی‌داری تغییر یافتند. در غلظت‌های ۰/۱ تا ۰/۵ درصد، افزایش مدت زمان تیمار آنزیمی تا ۶۰ دقیقه، به بهبود این مقادیر منجر شد، هرچند این مقادیر در بعضی شرایط به لحاظ آماری معنی‌دار نبوده است. این در حالی است که در غلظت‌های بیشتر (۱ درصد)، در صورت استفاده از مدت زمان طولانی‌تر (۶۰ دقیقه)، این مقادیر کاهش یافتند. افزایش میزان مصرف آنزیم از ۰/۱ به ۰/۵ درصد موجب افزایش جزئی شاخص مقاومت به کشش و طول پارگی کاغذ شد، اما در غلظت‌های بیش از ۰/۵ درصد، به کاهش غیرمعنی‌دار این مقادیر انجامید. این در حالی است که سفتی کاغذها با افزایش سطح مصرف آنزیم به ۰/۵ درصد و همچنین مدت زمان تیمار آنزیمی به طور معنی‌داری افزایش یافت. افزایش بیش از ۰/۱ درصد، بهبود معنی‌داری را در این مقادیر نشان نداد. به طور کلی افزایش مدت زمان تیمار تا ۶۰ دقیقه در غلظت‌های مختلف، تقریباً تأثیر معنی‌داری بر شاخص مقاومت به کشش و طول پارگی کاغذ نشان نداد و زمانی که مدت زمان تیمار آنزیمی به ۶۰ دقیقه افزایش یافت، افزایش میزان مصرف همی سلولاز تا ۰/۲ درصد به میانگین مقادیر شاخص مقاومت به کشش کاغذ (سطح



شکل ۴. تأثیر شرایط تیمار آنزیمی با همی سلولاز بر شاخص مقاومت به کشش کاغذ

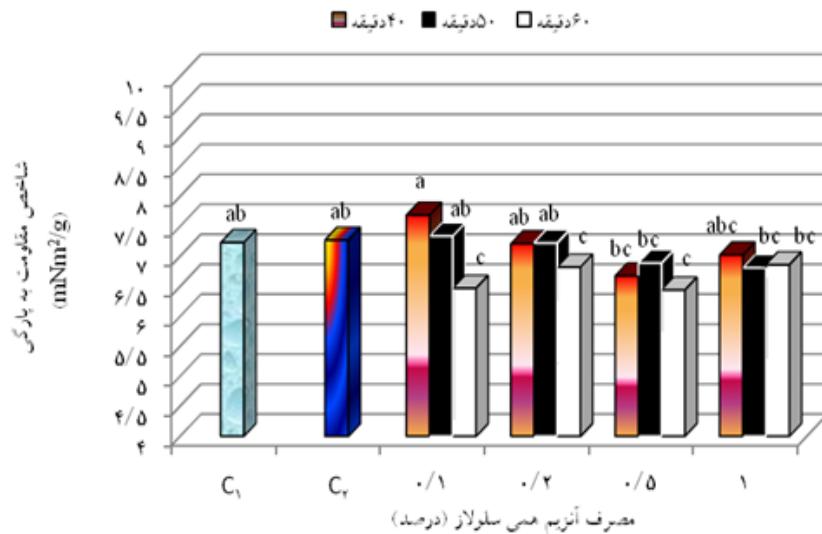
جدول ۳. مقایسه طول پارگی، سفتی و شاخص مقاومت به ترکیبگی کاغذ در شرایط مختلف تیمار آنزیمی با همی سلولاز

شاخص مقاومت به ترکیبگی (kP.m ² /g)	سفتی (mN)	طول پارگی (km)	ویژگی کاغذ کد تیمار
۱/۹ ^d	۳/۴۸ ^{bcd}	۲/۸۳۵ ^{abcde}	C ₁
۱/۹۵۶ ^{cd}	۳/۳۶۹ ^{cd}	۲/۹۱۳ ^{abcd}	C ₂
۲/۰۰۱ ^{cd}	۲/۱۳ ^f	۲/۳۹۵ ^e	H ₁ T ₁
۲/۱۳ ^{bcd}	۲/۵۳۶ ^{ef}	۲/۵۰۷ ^{de}	H ₁ T ₂
۲/۲۹۵ ^{bc}	۳/۸۵ ^{abc}	۲/۸۲۷ ^{abcde}	H ₁ T ₃
۲/۰۳۵ ^{cd}	۲/۳۷ ^f	۲/۵۵۲ ^{cde}	H ₂ T ₁
۲/۲۳۴ ^{bcd}	۲/۶۰۱ ^{ef}	۲/۶۱۱ ^{bcd}	H ₂ T ₂
۲/۷۳ ^a	۳/۹۴ ^{ab}	۳/۱۳۱ ^a	H ₂ T ₃
۲/۱۱۵ ^{bcd}	۲/۶۳۳ ^{ef}	۲/۷۱۹ ^{abcde}	H ₃ T ₁
۲/۳۰۹ ^{bc}	۳/۰۰۷ ^{de}	۲/۸۵۵ ^{abcd}	H ₃ T ₂
۲/۲۶۹ ^{bcd}	۴/۱۲ ^a	۲/۹۷۴ ^{abc}	H ₃ T ₃
۲/۱۵۲ ^{bcd}	۳/۰۲۹ ^{de}	۲/۷۵۷ ^{abcde}	H ₄ T ₁
۲/۴۷۵ ^{ab}	۳/۴۶ ^{bcd}	۳/۰۴۱ ^{ab}	H ₄ T ₂
۱/۹۳۴ ^{cd}	۳/۰۲۶ ^{de}	۲/۷۴۱ ^{abcde}	H ₄ T ₃

شاخص مقاومت به پارگی

نتایج ارزیابی تجزیه واریانس مقادیر شاخص مقاومت به پارگی کاغذ نشان داد که با استفاده از تیمارهای آنزیمی همی سلولاز می‌توان به کاغذهای با شاخص پارگی مشابه یا حتی بیشتر از نمونه تیمارهای C₁ و

C₂ دست یافت. با افزایش غلظت آنزیم و همچنین مدت زمان تیمار آنزیمی، شاخص مقاومت به پارگی کاهش یافت که این کاهش در زمان‌های طولانی‌تر و غلظت‌های بیشتر معنی‌دار بوده است (شکل ۵).



شکل ۵. تأثیر شرایط مختلف تیمار آنزیمی با همی سلولاز بر شاخص مقاومت به پارگی کاغذ

افزایش می‌دهد. براساس فرضیه‌های مطرح شده در بسیاری از گزارش‌های منتشر شده، آنزیم‌های اندو-زایلاناز فعالیت عمده‌ای را در بهبود کارایی مرکب‌زدایی طی توالی با سایر آنزیم‌ها مثل سلولاز ایفا می‌کنند، به طوری که در توالی‌های آنزیمی مثل همی سلولاز-سلولاز، میزان جداسازی مرکب چاپ از کاغذ با توجه به عمل هیدرولیز همی سلولزهای سطحی الیاف توسط همی سلولاز افزایش می‌یابد. در بعضی از گزارش‌های منتشر شده فرض شده که در توالی‌های آنزیمی همی سلولاز-سلولاز، آنزیم اندوگلوکاناز سهم عمده‌ای در مرکب‌زدایی دارد و با جداسازی میکروفیبریل‌های سطحی الیاف و بخش‌های آمورف سلولز (سلولز با نظم کمتر)^۳، موجب واکنش‌دهی دیواره الیاف و آزاد شدن الیاف کوتاه (ریز)^۴ می‌شود [۱۸]. بسیاری از محققان تأثیر آنزیم همی سلولاز را بسیار مهم دانسته‌اند، به طوری که استفاده از این آنزیم‌ها در توالی‌های مختلف آنزیمی، اثر هم‌افزایی^۵ در کارایی مرکب‌زدایی خواهد داشت.

نتایج بررسی مقایسه ویژگی‌های مقاومتی کاغذ شامل شاخص مقاومت به کشش، سفتی و کشش کاغذ نشان داد که با استفاده از تیمارهای آنزیمی همی سلولاز در شرایط مختلف می‌توان کاغذهای با ویژگی‌های مکانیکی مشابه یا حتی بهتر از خمیر کاغذهای C₁ و C₂ تولید کرد. اعمال پیش تیمار آنزیمی با توجه به خروج مرکب چاپ در نتیجه بهبود درجه روشنایی، موجب بهبود ویژگی‌های مقاومت به کشش، کشش و سفتی کاغذ شده است.

هیدرولیز سلولز و همی سلولزهای سطحی الیاف به جداسازی فیبریل‌های سطحی الیاف تحت عنوان پدیده کندن شدن الیاف^۱ منجر می‌شود و با رخ دادن این پدیده، جداسازی مرکب چاپ از سطح کاغذ آسان‌تر خواهد شد. همچنین در یکی از فرضیات مطرح شده اشاره شده است که تغییر آب‌گریزی^۲ ذرات مرکب در اثر جداسازی فیبریل‌های ریز، امکان جداسازی آنها را از الیاف خمیر کاغذ طی مراحل شست‌وشو و شناورسازی

3. Less-order cellulose
4. Loosening of short fiber
5. Synergistic

1. Peeling off fiber
2. Hydrophobicity

به تیمارهای H_4T_2 و H_2T_3 (به ترتیب $2/73 \text{ kP.m}^3/\text{g}$ و $2/475$) است. همچنین یکی از دستاوردهای مهم این پژوهش این است که با پیش تیمار آنزیمی همی سلولاز می توان کاغذهای با شاخص پارگی مشابه یا حتی بیشتر از نمونه تیمارهای C_1 و C_2 (علاوه بر شاخص های مقاومت به کشش و ترکیب بیشتر) تولید کرد. شایان ذکر است که با افزایش غلظت آنزیم و همچنین مدت زمان تیمار آنزیمی، شاخص مقاومت به پارگی کاهش یافته که این کاهش در زمان های طولانی تر و غلظت های بیشتر معنی دار بوده است.

در اثر تیمار آنزیمی با آنزیم همی سلولاز (زیلاناز)، انعطاف پذیری و قابلیت تغییر شکل^۱ الیاف خمیر کاغذ کرافت رنگبری شده [۱۷] و الیاف سوزنی برگ [۱۹] افزایش یافته در نتیجه دانسیته ورقه کاغذ^۲ تر^۳ افزایش، پروزیته کاغذ کاهش و مقاومت به فیلتر شدن خمیر کاغذ در ماشین کاغذ بهبود می یابد [۱۸، ۱۹]. با توجه به نتایج به دست آمده در این پژوهش، می توان بیان داشت که در اثر تیمار آنزیمی با همی سلولاز در مرکب زدایی کاغذ باطله، ذرات مرکب چاپ و سایر آلاینده ها از ترکیب خمیر کاغذ خارج می شوند (در نتیجه بهبود درجه روشنی، سفیدی و کاهش زردی کاغذ مشاهده شده است). ذرات مرکب چاپ می توانند در فواصل بین الیاف قرار گیرند و مانع اتصال بین الیاف در نتیجه کاهش مقاومت کاغذ شوند [۲۰]. لذا، با توجه به ذرات مرکب کمتر در خمیر کاغذ، می توان گفت که ضمن خروج مرکب چاپ، اتصال بین الیاف می تواند بهتر و راحت تر رخ دهد در نتیجه ویژگی های مکانیکی کاغذ بهبود می یابد. براساس نتایج بلومستد^۳ و همکاران

براساس نتایج این پژوهش، با استفاده از تیمارهای آنزیمی همی سلولاز می توان کاغذهای با شاخص مقاومت به کشش و پارگی مشابه با تیمارهای C_1 و C_2 و حتی در بعضی شرایط کاغذ مطلوب تری تولید کرد. در غلظت و زمان های مختلف تیمار آنزیمی، تأثیرات آنزیم متفاوت است، به طوری که در غلظت های $0/1$ تا $0/5$ درصد، افزایش مدت زمان تیمار آنزیمی تا 60 دقیقه، سبب بهبود غیرمعنی دار شاخص مقاومت به کشش کاغذ شده است. این در حالی است که در غلظت های بیشتر (1 درصد)، در صورت استفاده از مدت زمان طولانی تر (60 دقیقه)، شاخص مقاومت به کشش کاغذ کاهش یافت. از طرف دیگر، در زمان های واکنش 40 تا 50 دقیقه، افزایش میزان مصرف آنزیم از $0/1$ به $0/5$ درصد موجب افزایش جزئی شاخص مقاومت به کشش و طول پارگی کاغذ شد، اما در غلظت های بیش از $0/5$ درصد، به کاهش غیرمعنی دار این مقادیر منجر شد. این در حالی است که سفتی کاغذها با افزایش سطح مصرف آنزیم به $0/5$ درصد و همچنین مدت زمان تیمار آنزیمی به طور معنی داری افزایش یافت، اما افزایش بیش از $0/1$ درصد، بهبود معنی داری را در این مقادیر نشان نداد. افزایش میزان مصرف همی سلولاز به $0/2$ درصد به بهبود میانگین مقادیر شاخص مقاومت به کشش کاغذ منجر شد، اما در غلظت های بیشتر از $0/2$ درصد، شاخص مقاومت به کشش کاغذ کاهش غیرمعنی داری یافت. همچنین با اعمال تیمارهای آنزیمی در سطوح مختلف غلظت و زمان های تیمار آنزیمی، شاخص مقاومت به ترکیب کاغذ بهبود یافته و مقادیر میانگین به دست آمده به مراتب بیشتر از تیمارهای C_1 و C_2 مشاهده شده است. برای مثال در بین تیمارهای مختلف آنزیمی، بیشترین شاخص مقاومت به ترکیب مربوط

1. Collapsibility
2. Wet web
3. Blomstedt

در مورد تغییرات سطح الیاف طی تیمار آنزیمی، دات^۲ و همکاران (۲۰۱۲) با گرفتن تصاویر میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM)^۳ از سطح الیاف کاغذ باطله اداری تفکیک شده (SOP)^۴ که با ترکیب سلولاز و زایلاناز پیش تیمار شده است، دریافتند که ساختار توپوگرافی سطح الیاف به لحاظ زبری سطح، تغییرات چشمگیری یافته و دلیل عمده آن به ظاهر شدن میکروفیبریل‌های سطح الیاف نسبت داده شده است. همچنین تصاویر میکروسکوپ الکترونی SEM ساختار فیبریلی و وجود ترک^۵، شکاف (شیار)^۶ و برآمدگی^۷ را روی سطح الیاف تیمار شده با آنزیم سلولاز و همچنین همی سلولاز (زایلاناز) اثبات کرده و در غلظت‌های بسیار زیاد حتی آسیب^۸ شایان توجه به الیاف هم مشاهده شده است [۲۲]. از این رو می‌توان انتظار داشت که در شرایط بسیار شدید (غلظت‌های بیشتر و مدت زمان طولانی‌تر واکنش آنزیمی)، اغلب ویژگی‌های مقاومتی کاغذ با توجه به تأثیر بیشتر آنزیم همی سلولاز بر روی الیاف (در نتیجه آسیب احتمالی بیشتر الیاف طی سازوکار تخریبی)، کاهش می‌یابد. به عنوان نتیجه‌گیری نهایی می‌توان گفت که استفاده از آنزیم همی سلولاز پتانسیل شایان توجهی در مرکب‌زدایی مخلوط کاغذ روزنامه و مجله باطله دارد و با کنترل شرایط تیمار آنزیمی می‌توان کاغذهای با کیفیت به مراتب بهتر نسبت به مرکب‌زدایی متداول شیمیایی تولید کرد.

(۲۰۰۳)، تأثیر آنزیم زایلاناز بر ویژگی‌های مکانیکی کاغذ دست‌ساز، مقاومت الیاف و بازده خمیر کاغذ کرافت رنگ‌بری شده، کم گزارش شده و تأثیر عمده این آنزیم بر درجه روشنی کاغذ است. این در حالی است که در این پژوهش، با استفاده از آنزیم همی سلولاز تحت شرایط مختلف، ویژگی‌های مقاومتی و نوری کاغذ بهبود یافته و اختلافات بین ویژگی‌ها در بعضی از شرایط معنی‌دار بوده است [۱۷].

شاخص مقاومت به پارگی کاغذ به عنوان یکی از ویژگی‌های مکانیکی کاغذ با تیمارهای آنزیمی، اغلب به طور منفی تحت تأثیر قرار می‌گیرد [۲۰]. شواهد حاصل از این پژوهش نشان داد که در مقایسه با کاغذهای حاصل از خمیر کاغذ مرکب‌زدایی شده شیمیایی می‌توان به مراتب به شاخص مقاومت به پارگی بیشتری دست یافت. در غلظت‌های بیشتر آنزیم مصرفی و زمان‌های بسیار طولانی (۶۰ دقیقه)، شاخص مقاومت به پارگی کاغذ کاهش می‌یابد. جکسون^۱ و همکاران (۱۹۹۳) با بررسی تأثیر آنزیم‌های سلولاز و همی سلولاز بر الیاف خمیر کاغذ کرافت بیان داشتند که این آنزیم‌ها به جای الیاف، ترجیحاً به نرمه‌ها می‌چسبند و در صورت استفاده از مخلوط سلولاز + همی سلولاز، الیاف بلند خمیر کاغذ از تخریب بیشتر ناشی از سلولاز محافظت می‌شود [۲۱]. با این توضیحات می‌توان گفت که در غلظت‌های بیشتر و زمان‌های طولانی تیمار آنزیمی همی سلولاز (۶۰ دقیقه)، الیاف خمیر کاغذ بیشتر تحت تأثیر عمل آنزیم همی سلولاز قرار می‌گیرد و بخشی از آن به نرمه تبدیل می‌شود. از این رو شاخص مقاومت به پارگی کاغذ با کاهش متوسط طول الیاف کم می‌شود.

2. Dutt
3. Atomic force microscopy
4. Sorted office paper
5. Crack
6. Groove
7. Ridge
8. Damage

1. Jackson

نتیجه گیری

در این پژوهش، مرکب‌زدایی آنزیمی مخلوط کاغذ روزنامه و مجله باطله با استفاده از آنزیم همی سلولاز (در شرایط مختلف) در مقایسه با روش متداول صنعتی (مرکب‌زدایی قلیایی) ارزیابی شد. نتایج بررسی‌های به‌عمل‌آمده حاکی از آن است که با استفاده از سطوح مختلف مصرف آنزیم همی سلولاز و همچنین زمان‌های مختلف تیمار آنزیمی می‌توان کاغذهای با خواص کیفی (مجموع ویژگی‌های نوری و مقاومتی) مشابه یا حتی بهتر از نمونه خمیرکاغذ تیمار نشده با آنزیم (تیمار C_1) و همچنین خمیرکاغذ مرکب‌زدایی شده با مواد شیمیایی (تیمار C_2) تولید کرد، به طوری که شدت تأثیرات آنزیم در غلظت و زمان‌های مختلف تیمار آنزیمی متفاوت بوده است.

آنزیم همی سلولاز با هیدرولیز سطحی همی سلولز و جداسازی و آزاد کردن میکروفیبریل‌های سطحی الیاف، جداسازی مرکب چاپ از کاغذ، موجب بهبود درجه روشنایی و سفیدی در نتیجه بهبود ویژگی‌های مقاومتی کاغذ می‌شود. همچنین یکی از دستاوردهای مهم این پژوهش این است که با پیش تیمار آنزیمی همی سلولاز می‌توان کاغذهای با شاخص پارگی مشابه یا حتی بیشتر از نمونه تیمارهای C_1 و C_2 (علاوه بر شاخص‌های مقاومت به کشش و ترکیب‌پذیری بیشتر) تولید کرد. شایان ذکر است که با افزایش غلظت آنزیم و همچنین مدت زمان تیمار آنزیمی، شاخص مقاومت به پارگی کاهش یافته که این کاهش در زمان‌های طولانی‌تر و غلظت‌های بیشتر معنی‌دار بوده است.

References

- [1]. Akbarpour, I., and Resalati, H. (2014). The effect of cellulase on the physical properties and drainability of OCC pulp. *Iranian Journal of Forest & Wood Products*, 67(1): 133-145.
- [2]. Welt, T., and Dinus RJ. (1995). Enzymatic deinking-A review. *Progress in Paper Recycling*, 14(2):36-47.
- [3]. American Forest and Paper Association. (2010). Paper Recycling, US EPA.htm file.
- [4]. Akbarpour, I., Resalati, H., and Saraeian, A.R. (2010). Investigation on the deinkability of old newspaper. *Iranian Journal of Wood & Forest Science and Technology*, 17(2): 73-87.
- [5]. Lee , C.K ., Darah , I., and Ibrahim, C.O. (2007). Enzymatic deinking of laser printed office waste papers: some governing parameters on deinking efficiency. *Bioresource Technology*, 98, 1684-1689.
- [6]. Bajpai, P. (1999). Application of enzymes in the pulp and paper industry. *Biotechnology Progress*, 15(2):147-157.
- [7]. Akbarpour, I., and Resalati, H. (2011). The effect of different concentrations of cellulase enzyme on optical and physical properties of ONP deinked pulp. *Iranian Journal of Wood and Paper Industries*, 2(1):1-15.
- [8]. Bajpai, P.K. (2010). Solving the problems of recycled fiber processing with enzymes. *Bioresources*, 5(2): 1-15.
- [9]. Rismijana, J., Nasomei, L., and Pitriyani, T. (2003). Penggunaan Enzim Selulase-Hemiselulase pada Proses Deinking Kertas Koran Bekas. *Jurnal Matematika dan Sains*, 8(2): 67–71.
- [10]. Zhang, X., Renaud, S., and Paice M. (2008). Cellulase deinking of fresh and aged recycled newsprint/magazines (ONP/OMG). *Enzyme Microbiology and Technology Journal*, 43:103–108.
- [11]. Ibara, D., Monte, M.C., Blanco, A., Martinez, A.T., and Martinez, M.J. (2012). Enzymatic deinking of secondary fibres: cellulases/hemicellulases versus laccase mediator system. *Indian Microbiology and Biotechnology Journal*, 39, 1–9.
- [12]. Virk, A.P., Puri, M., Gupta, V., Capalash, N., and Sharma, P. (2013). Combined enzymatic and physical deinking methodology for efficient eco-friendly recycling of old newsprint. *PLOS ONE Journal*, 8(8): 1-8.
- [13]. Lee, C.K., Ibrahim, D., Ibrahim, Ch., and Rosli, W.D.W. (2011). Enzymatic and chemical deinking of mixed office wastepaper and old Newspaper: paper quality and effluent characteristics. *BioResources*, 6(4):3859-3875.
- [14]. Shrinath, A., Szewczak, J. T., and Bowen, I. (1991). A review of ink-removal techniques in current technology. *Tappi Journal*, 74(7), 85 -93.
- [15]. Singh, A., Yadav, R.D., Kaur, A., and Mahajan, R. (2012). An ecofriendly cost effective enzymatic methodology for deinking of school waste paper. *Bioresource Technology*, 120: 322–327.
- [16]. Bajpai, P. (2004). Biological bleaching of chemical pulps. *Critical Review Biotechnology*, 24(1):1-58.
- [17]. Blomstedt, M., Asikainen, J., Lahdeniemi, A., Ylonen, T., Paltakari, J., and Hakala, T.K. (2010). Effect of xylanase treatment on dewatering properties of birch kraft pulp. *BioResources*, 5(2):1164-1177. 1164.

- [18]. Gubitz, G.M., Mansfield, S.D., Bohm, D., and Saddler, J.N. (1998). Effect of endoglucanases and Hemicellulases in magnetic and flotation deinking of xerographic and laser printed papers. *Biotechnology Journal*, 65, 209–215.
- [19]. Mansfield, S., Wong, K. K. Y., and Dickson, A. R. (2000). Variation in the response of three different *Pinus radiata* kraft pulps to xylanase treatments. *Wood Fiber Science*, 32(1):105-115.
- [20]. Maximino, M.G., Taleb, M.C., and Adell, A.M. (2013). Influence of the enzyme addition point on recycled industrial pulp properties. *BioResources*, 8(1):1089-1099.
- [21]. Jackson, L.S., Heitmann, J.A., and Joyce, T.W. (1993). Enzymatic modifications of secondary fiber. *Tappi Journal*, 76 (3):147-154.
- [22]. Dutt, D., Tyagi, C.H., Singh, R.P., and Kumar, A. (2012). Effect of enzyme concoctions on fiber surface roughness and deinking efficiency of sorted office paper. *Cellulose Chemistry and Technology*, 46 (9-10):611-623.