Archive Of SID

جنگل و فرآورده‌های چوب، مجله منابع طبیعی ایران
دورهٔ ٦٩، شمارهٔ ٣، پاییز ١٣٩٥

تاریخ دریافت: ١٣٩٤/٠١/٢٦
تاریخ پذیرش: ١٣٩٤/٠٤/١٣

ص ٥٨٥-٦٠٢

ارتقای ویژگی‌های کیفی مخلوط خمیرکاغذهای روزنامه و مجلهٔ بازیافتی با تیمار آنزیمی همی‌سلولاز

❖ **ایمان اکبرپور***؛ دانشجوی دکتری صنایع خمیر و کاغذ، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، دانشکدهٔ مهندسی چوب و کاغذ، گروه صنایع خمیر و کاغذ، گرگان، ایران.
❖ **علی قاسمیان؛** دانشیار، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، دانشکدهٔ مهندسی چوب و کاغذ، گروه صنایع خمیر و کاغذ، گرگان، ایران.
❖ **حسین رسالتی؛** استاد، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، دانشکدهٔ مهندسی چوب و کاغذ، گروه صنایع چوب و کاغذ، ساری، ایران.
❖ **احمدرضا سرائیان؛** دانشیار، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، دانشکدهٔ مهندسی چوب و کاغذ، گروه صنایع خمیر و کاغذ، گرگان، ایران
❖ **احمد جهان لتیباری؛** استاد، دانشگاه آزاد اسلامی کرج، دانشکدهٔ 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 همی‌سلولاز استخراج‌شده از قارچ *Aspergillus niger* بر ویژگی‌های کیفی کاغذ حاصل از مخلوط ٧٠ درصد خمیرکاغذ روزنامه و ٣٠ درصد مجلهٔ باطله ارزیابی شد. آنزیم همی‌سلولاز در سطوح مختلف ٠/١ (H_1)، ٠/٢ (H_2)، ٠/٥ (H_3) و ١ درصد (H_4) براساس وزن خشک خمیرکاغذ و زمان‌های مختلف ٤٠ (T_1)، ٥٠ (T_2) و ٦٠ دقیقه (T_3) در شرایط ثابت درصد خشکی ١٠ درصد، درجهٔ حرارت ٦٠-٥٥ $^{\circ}C$ در محدودهٔ pH ٧-٦/٥ به‌کار گرفته شده و در ادامه خمیرکاغذها شست‌وشو و شناورسازی شدند. نتایج نشان داد که در غلظت آنزیم ٠/٢ درصد و مدت زمان ٦٠ دقیقه (تیمار H_2T_3) یا غلظت آنزیم ٠/٥درصد و مدت زمان ٥٠ دقیقه (تیمار H_3T_2)، می‌توان کاغذهای به‌مراتب روشن‌تر، سفیدتر و همزمان ماتی مناسب در مقایسه با خمیرکاغذ مرکب‌زدایی‌نشده (تیمار C_1) و خمیرکاغذ مرکب‌زدایی‌شدهٔ شیمیایی (تیمار C_2) تولید کرد. همچنین در تیمارهای H_2T_3 و H_3T_3 بیشترین میانگین شاخص مقاومت به کشش (٣٢/٢٧١ و ٣٠/٠١٧ نیوتن متر بر گرم)، طول پارگی (٣/١٣١ و ٢/٩٧٤ کیلومتر) و سفتی کاغذ (٣/٩٤و ٤/١٢ میلی‌نیوتن) و همچنین بیشترین شاخص مقاومت به ترکیدگی (٢/٧٣ و ٢/٤٧٥ کیلوپاسکال متر مربع بر گرم) به‌ترتیب در تیمارهای H_2T_3 و H_4T_2 و بیشترین شاخص مقاومت به پارگی (٧/٦٨٨ و ٧/٣٤ میلی‌نیوتن متر مربع بر گرم) در تیمارهای H_1T_1 و H_1T_2 مشاهده شد که این مقادیر به‌مراتب مطلوب‌تر از کاغذهای حاصل از تیمارهای C_1 و C_2 است. به‌طور کلی نتایج به‌دست آمده از این پژوهش بیانگر آن است که آنزیم همی‌سلولاز پتانسیل خوبی را در بهبود ویژگی‌های کیفی مخلوط کاغذ روزنامه و مجله بازیافتی (در مقایسه با سیستم متداول صنعتی) دارا می‌باشد.

واژگان کلیدی: کاغذ روزنامهٔ بازیافتی، کاغذ مجلهٔ بازیافتی، همی‌سلولاز، ویژگی‌های نوری، ویژگی‌های مکانیکی.

* نویسندهٔ مسئول، تلفن: ٠٩١١٣٥٣٤٨٠٩
Email: iman.akbarpour@gmail.com

www.SID.ir

Archive Of SID

مقدمه

استفاده از الیاف بازیافتی در چند دههٔ اخیر به‌طور گسترده افزایش یافته است و در این زمینه فرایند مرکب‌زدایی مرحلهٔ مهمی در بازیابی الیاف محسوب می‌شود [۱، ۲]. براساس پیش‌بینی‌ها، تا سال ۲۰۲۰، ضریب رشد حدود ۲ درصد دربارهٔ 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 عمدهٔ مواد اولیهٔ ساخت کاغذ را از بازیافت کاغذهای باطله تأمین کند [۳]. در مرکب‌زدایی متداول شیمیایی، مواد شیمیایی زیادی مصرف می‌شود، ازاین‌رو به‌دلیل خروج زیاد مواد آلاینده، به سیستم‌های با تصفیهٔ پساب پرهزینه نیاز است[٤- ٦]. در این زمینه برای برطرف کردن این مشکل، مرکب‌زدایی آنزیمی به‌دلیل کارایی زیاد و اثر زیست‌محیطی کم، توجه زیادی را به خود جلب کرده است [۷]. تیمارهای آنزیمی با حذف نرمه‌های الیاف و همچنین بهبود فیبریله شدن الیاف خمیرهای کاغذ بازیافتی، موجب بهبود قابلیت آب‌گیری خمیرکاغذ، افزایش سرعت تولید ماشین کاغذ و بهبود ویژگی‌های مقاومتی کاغذ حاصل می‌شود [۸، ۹]. استفاده از آنزیم‌های سلولاز و همی‌سلولاز به جداسازی فیریل‌های ریز[1] تحت عنوان پدیدهٔ کنده شدن[2] الیاف منجر می‌شود و جداسازی مرکب از سطح کاغذ را آسان می‌کند. تغییر آب‌گریزی[3] ذرات مرکب به‌دلیل جداسازی فیبریل‌های ریز، میزان جداسازی آلاینده‌ها (جداسازی الیاف/ مرکب) را در مرحلهٔ شناورسازی/ شست‌وشو افزایش می‌دهد [۸، ۹].

ارزیابی استفاده از مخلوط آنزیم‌های سلولاز و همی‌سلولاز در مرکب‌زدایی و قابلیت رنگ‌بری کاغذ روزنامهٔ 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 ۱درصد آنزیم در مجموع بهترین نتیجه را نشان داده است. به‌طور کلی میزان مصرف ۰/۰۵ درصد برای خمیرکاغذ مرکب‌زدایی‌شده و رنگ‌بری‌نشده و مصرف ۰/۵ درصد برای خمیرکاغذ مرکب‌زدایی‌شده و رنگ‌بری‌شده قادر به تأمین مشخصات لازم به‌لحاظ ویژگی‌های کیفی برای کاغذ روزنامه مطابق با استاندارد *SNI 14-0091-1998* بوده است [۹]. همچنین نتایج بررسی مرکب‌زدایی مخلوط ۷۰ درصد کاغذ روزنامهٔ باطله (ONP)[4] و ۳۰ درصد کاغذ مجلهٔ باطله (OMG)[5] با استفاده از ۳ نوع آنزیم سلولاز تجاری (آنزیم‌ها در ابتدای مرحلهٔ خمیر کاغذسازی مجدد به میزان ثابت ۳۰۰U/kg، محدودهٔ pH ۹-٦، زمان ماند ۳ ساعت همراه با افزودن ۰/۰٦ درصد فعال‌ساز سطحی در شرایط ثابت فرایندی افزوده شدند) در مقایسه با سیستم‌های مرکب‌زدایی قلیایی (سیستم متداول صنعتی)[6] یا سولفیت خنثی[7] (در محدودهٔ pH خنثی) نشان داد اگرچه آنزیم‌های مورد استفاده قادر به جداسازی معنی‌دار مرکب از مخلوط ONP/OMG (کاهش غلظت مؤثر مرکب باقی‌مانده[8]) بودند، اثربخشی کمتری را در

1. Small fibrils
2. Peeling
3. Hydrophobicity

4. Old newspaper
5. Old magazine
6. Conventional deinking system
7. Neutral sulfite
8. Effective residual ink concentration (ERIC)

www.SID.ir

Archive Of SID

مقایسه با مرکب‌زدایی شیمیایی یا سولفیت نشان دادند. هیچ‌کدام از آنزیم‌های مورد آزمایش قادر به مرکب‌زدایی مخلوط ONP/OMG کهنه‌شده (به‌طور مصنوعی) نبودند و با استفاده از روش شیمیایی و سولفیت، قابلیت مرکب‌زدایی ضعیفی حاصل شد. تیمار سلولاز به‌تنهایی برای مرکب‌زدایی کاغذ روزنامهٔ کهنه‌شده کارامد نیست، اما ترکیب آنزیم با شیمی سولفیت کارایی مرکب‌زدایی سولفیت را به‌طور معنی‌داری افزایش می‌دهد و راهبرد بالقوه‌ای را در pH خنثی به‌منظور دستیابی به مرکب‌زدایی مؤثر روزنامهٔ کهنه‌شده ایجاد می‌کند [۱۰]. همچنین ارزیابی‌های انجام‌گرفته در زمینهٔ کارایی مرکب‌زایی آنزیمی الیاف بازیافتی (شامل الیاف روزنامه، مجله و مقوای کارت رنگی[1]) توسط آنزیم‌های هیدرولیزکنندهٔ کربوهیدرات[2] شامل آنزیم‌های سلولاز (با فعالیت‌های اندوگلوکاناز و اگزوکلوکاناز) و همی‌سلولاز در مقایسه با آنزیم لاکاز بیانگر آن است که آنزیم‌های ذکرشده می‌توانند به‌طور مؤثر موجب مرکب‌زدایی این نوع خمیرکاغذها شوند. در مورد کاغذ روزنامهٔ بازیافتی همراه با فرایند شناورسازی، درجهٔ روشنی کاغذ تا ٤-۳ درصد ایزو بهبود یافت و در مورد کاغذ مجلهٔ بازیافتی نیز با استفاده از آنزیم‌های هیدرولیزکنندهٔ کربوهیدرات، درجهٔ روشنی تا ۲/۵ درصد ایزو افزایش پیدا کرد. نتایج استفاده از سیستم لاکاز در حضور عوامل واسطه (LMS)[3] نشان داد که استفاده از این سیستم به‌تنهایی یا در ترکیب با آنزیم‌های سلولاز و همی‌سلولاز در مرکب‌زدایی الیاف مجله و روزنامه مؤثر نیست و به تولید کاغذهایی با درجهٔ روشنی و شاخص جداسازی مرکب بدتر یا کمتر منجر می‌شود، اما در مورد خمیرکاغذ مقوای کارت رنگی، مرکب‌زدایی با سیستم LMS به کاغذهای با درجهٔ روشنی بیشتر (تا حدود ۳ درصد ایزو) و غلظت‌های کمتر مرکب چاپ انجامید [۱۱]. نتایج اثربخشی مرکب‌زدایی فیزیکی و آنزیمی به‌عنوان فرایندهای بازیابی سازگار با محیط زیست در مورد خمیرکاغذ بازیافتیONP نشان داد که مرکب‌زدایی ONP با لاکاز نیازمند افزودن مادهٔ واسطه نیست و درصد کاهش میزان ERIC در حالت ترکیبی زایلاناز- لاکاز (٦۵/۸ درصد) بیشتر از خمیرکاغذهای مرکب‌زدایی‌شده با زایلاناز (٤۷/۹ درصد) یا لاکاز (٦۲/۲ درصد) به‌طور مجزا بوده است. همچنین در حالت ترکیبی، افزایش درجهٔ روشنی (۲۱/٦ درصد)، طول پاره شدن (۱٦/۵ درصد)، فاکتور ترکیدگی (٤/۲ درصد)، فاکتور پارگی (٦/۹ درصد)، ویسکوزیته (۱۳ درصد) و کریستالیتهٔ سلولز (۱۰/۳ درصد) همراه با کاهش عدد کاپا (۲۲ درصد) و مصرف مواد شیمیایی (۵۰ درصد) مشاهده شد. علاوه‌بر تغییرات اشاره‌شده، سطح الیاف (براساس تصاویر الکترونی SEM) بسیار فیبریله می‌شود و بررسی‌های مربوط به طیف‌های FTIR بیانگر تغییرات در گروه‌های عاملی سطح الیاف است. استفاده از فرایند ترکیبی مرکب‌زدایی آنزیمی- فیزیکی در مرکب‌زداییONP، به بهبود درجهٔ روشنی (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[4] ویژگی‌های الیاف روش مفیدی است و ویژگی‌های الیاف بازیافتی از طریق تیمار با آنزیم‌های سلولزی (مثل سلولاز و همی‌سلولاز) بهینه می‌شوند، از طرف دیگر با توجه به اینکه در مورد خمیرکاغذهای

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

www.SID.ir

Archive Of SID

بازیافتی بهینه‌سازی مصرف آنزیم (در این تحقیق آنزیم همی‌سلولاز) تحقیقی انجام نگرفته است، در این پژوهش، از آنزیم همی‌سلولاز در سطوح مختلف میزان مصرف و همچنین زمان‌های مختلف تیمار آنزیمی در مرکب‌زدایی مخلوط کاغذ روزنامه و مجلهٔ بازیافتی (به‌ترتیب با نسبت ۳۰/۷۰ درصد) استفاده شد و اثربخشی آن در مقایسه با خمیرکاغذهای مرکب‌زدایی‌نشده و مرکب‌زدایی‌شده شیمیایی ارزیابی شد. شایان ذکر است که کاغذ روزنامهٔ باطله در اثر بازیافت با افت ویژگی‌های کیفی زیادی مواجه می‌شود و از کاغذ حاصل نمی‌توان دوباره در ساخت کاغذ روزنامه استفاده کرد. ازاین‌رو از کاغذ مجله به‌عنوان تقویت‌کنندهٔ 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 مجلهٔ باطله (خانوادهٔ 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 آیین‌نامهٔ تاپی[1] اندازه‌گیری شد. کاغذهای باطلهٔ خردشده پس از خیساندن در آب به مدت ۲۴ ساعت، در داخل دستگاه پراکنده‌ساز به مدت ۱۵ دقیقه با تعداد دور ۳۹۷۵۰ (rpm=۲۶۵۰) و درصد خشکی ۳ درصد دفیبره شدند. خمیرکاغذ حاصل روی الک با مش ۲۰۰ آب‌گیری شده و در ادامه با استفاده از مواد شیمیایی و همچنین آنزیم همی‌سلولاز به‌طور جداگانه تیمار شدند.

مرکب‌زدایی شیمیایی و آنزیمی مخلوط خمیرکاغذهای ONP و OMG با همی‌سلولاز

تیمار شیمیایی کاغذهای بازیافتی ONP و OMG با استفاده از مواد شیمیایی (جدول ۱) در شرایط ثابت درصد خشکی ۱۰ درصد، درجهٔ حرارت ۵۵–۵۰ درجهٔ سانتی‌گراد و مدت زمان ۲۰ دقیقه در کیسه‌های پلاستیکی در داخل حمام آب گرم انجام گرفت. در تیمار آنزیمی از آنزیم همی‌سلولاز به شکل پودری استفاده شد (تهیه‌شده از شرکت تجاری Sigma Aldrich (محصول Novozyme Corp. با کد تجاری HV۶۴۹). محدودهٔ درجهٔ حرارت نگهداری این آنزیم ۸ درجهٔ سانتی‌گراد و فعالیت آن ۵≤ u/mg ذکر شده است. شایان ذکر است فعالیت 1u آنزیم همی‌سلولاز به‌عنوان مقدار آنزیم لازم برای جداسازی یک میکرومول D–گالاکتوز از همی‌سلولز در مدت زمان یک ساعت، pH= ۵/۵ و دمای ۳۷ درجهٔ 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 دورهٔ زمانی ۱۰ دقیقه استفاده شد. شرایط کلی تیمارهای آنزیمی و همچنین تیمارهای شیمیایی در جدول ۱ آمده است.

1. TAPPI

www.SID.ir

Archive Of SID

جدول ۱. شرایط کلی تیمارهای آنزیمی با همی‌سلولاز

کد تیمار	شرایط متغیر: غلظت آنزیم مصرفی (درصد) (به‌ازای وزن خشک خمیرکاغذ) درصد	IU	مدت زمان تیمار آنزیمی (دقیقه)
H_1T_1	۰/۱	۵	۴۰
H_1T_2	۰/۱	۵	۵۰
H_1T_3	۰/۱	۵	۶۰
H_2T_1	۰/۲	۱۰	۴۰
H_2T_2	۰/۲	۱۰	۵۰
H_2T_3	۰/۲	۱۰	۶۰
H_3T_1	۰/۵	۲۵	۴۰
H_3T_2	۰/۵	۲۵	۵۰
H_3T_3	۰/۵	۲۵	۶۰
H_4T_1	۱	۵۰	۴۰
H_4T_2	۱	۵۰	۵۰
H_4T_3	۱	۵۰	۶۰

در ادامه خمیرکاغذهای پیش‌تیمارشده با مواد شیمیایی و آنزیم با استفاده از روش ترکیبی (فرایندهای شست‌وشو و شناورسازی) مرکب‌زدایی شدند. ابتدا شست‌وشوی خمیرکاغذ 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 تصفیهٔ 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 مادهٔ فعال‌ساز پلی‌سوربات Tween 80 (براساس وزن خشک خمیرکاغذ) در محدودهٔ pH ۸/۵–۸ انجام گرفت. خمیرکاغذهای شناورسازی‌شده پس از آب‌گیری روی الک با مش ۲۰۰ در کیسه‌های پلی‌اتیلنی قرار داده شدند و سپس از آنها کاغذ دست‌ساز استاندارد ساخته شد.

اندازه‌گیری ویژگی‌های کیفی کاغذ دست‌ساز

کاغذهای دست‌ساز استاندارد (۶۰ گرمی) با استفاده از دستگاه کاغذساز مدل PTI [1] مطابق با آیین‌نامهٔ sp-۰۲ T۲۰۵ ساخته شدند و ویژگی‌های نوری آن شامل درجهٔ روشنی و زردی (T۴۵۲ om-۰۲)، سفیدی (۹۶ T۵۶۰pm-)، ماتی و ضریب جذب نور (T۴۲۵ om-۰۱) و ویژگی‌های مکانیکی شامل شاخص مقاومت به کشش، طول پارگی و سفتی (T۴۹۴ om-۰۱)، شاخص مقاومت به پارگی (T۴۱۴ om-۰۴) و شاخص مقاومت به ترکیدگی (T۴۰۳ om-۰۲) اندازه‌گیری شد.

تجزیه‌وتحلیل آماری

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

1. Paper Testing Association

www.SID.ir

Archive Of SID

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

نتایج و بحث

تأثیر پیش‌تیمار آنزیمی با همی‌سلولاز بر ویژگی‌های کاغذ

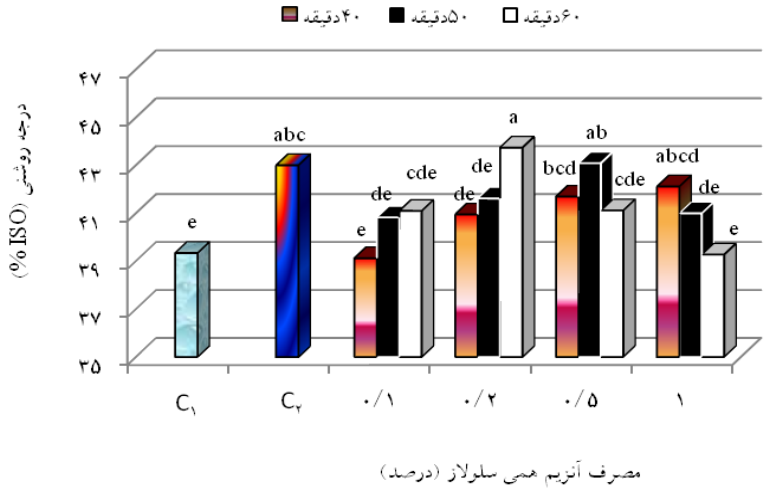
ویژگی‌های نوری

نتایج تجزیهٔ واریانس نشان داد که استفاده از آنزیم همی‌سلولاز در شرایط مختلف در مقایسه با خمیرکاغذ مرکب‌زدایی‌نشده و خمیرکاغذ مرکب‌زدایی‌شده به روش متداول شیمیایی، به تغییرات معنی‌دار (سطح اطمینان آماری ۹۹ درصد) مقادیر درجهٔ 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 درجهٔ 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 درجهٔ روشنی (۸ درصد) و سفیدی (۲۰/۱ درصد) و کاهش زردی (٤/٤٨ درصد) کاغذ حاصل منجر شد. در مورد تیمارهای آنزیمی، نتایج حاکی از آن است که با استفاده از آنزیم همی‌سلولاز، افزایش درجهٔ روشنی و سفیدی کاغذ و کاهش زردی کاغذ معادل مرکب‌زدایی شیمیایی و گاه بیشتر از نمونهٔ شاهد (نمونهٔ خمیرکاغذ مرکب‌زدایی‌شده به روش شیمیایی) است. برای مثال در تیمار H_2T_3 ، افزایش درجهٔ روشنی (۱۰/۰٤ درصد)، افزایش سفیدی (۳۸/۰۹ درصد) و کاهش زردی (۱۳/۰۱درصد) نسبت به نمونهٔ خمیرکاغذ مرکب‌زدایی‌نشده مشاهده شد. این در حالی است که در مقایسه با خمیرکاغذ مرکب‌زدایی‌شدهٔ شیمیایی، این تیمار حدود ۱/٦۸ درصد درجهٔ روشنی بیشتر، ۲۲/۵۱ درصد سفیدی بیشتر و ۸/۹۳ درصد زردی کمتری دارد. همچنین تیمار H_3T_2، در مقایسه با خمیرکاغذ مرکب‌زدایی‌نشده از درجهٔ بیشتر (۸/٦۹ درصد)، سفیدی بیشتر (۳۱/۷۵ درصد) و زردی کمتر (۲۰/۱۱ درصد) برخوردار است و نسبت به خمیرکاغذ مرکب‌زدایی‌شدهٔ شیمیایی نیز درجهٔ روشنی بیشتر (۰/۲ درصد)، سفیدی بیشتر (۱٤/۵۷ درصد) و زردی کمتر (۱٦/۳٦ درصد) داشتند. به‌طور کلی در سطوح مختلف زمانی، با افزایش میزان مصرف آنزیم همی‌سلولاز، بهبود درجهٔ 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 درجهٔ روشنی و سفیدی کاغذ داشته و غلظت‌های بیشتر تأثیر منفی بر این ویژگی‌ها نداشته است، هرچند در بعضی سطوح به‌لحاظ آماری معنی‌دار نبود. از طرف دیگر، در غلظت‌های مختلف کمتر آنزیم مصرفی (۰/۲-۰/۱ درصد)، افزایش مدت زمان تیمار آنزیمی به بهبود درجهٔ روشنی و کاهش زردی کاغذ منجر شد. در زمان‌های کوتاه‌تر تیمار آنزیمی (٤۰ دقیقه)، افزایش غلظت آنزیم (از ۰/۰۲۵ درصد به ۱ درصد) به‌طور صعودی به افزایش درجهٔ روشنی و کاهش زردی کاغذ منجر شد، اما در زمان‌های طولانی‌تر (٦۰ دقیقه) افزایش میزان مصرف آنزیم به بیش از ۰/۲ درصد، به کاهش درجهٔ روشنی و افزایش زردی کاغذ انجامید، هرچند این تغییرات به‌لحاظ آماری معنی‌دار نبود. بیشترین درجهٔ

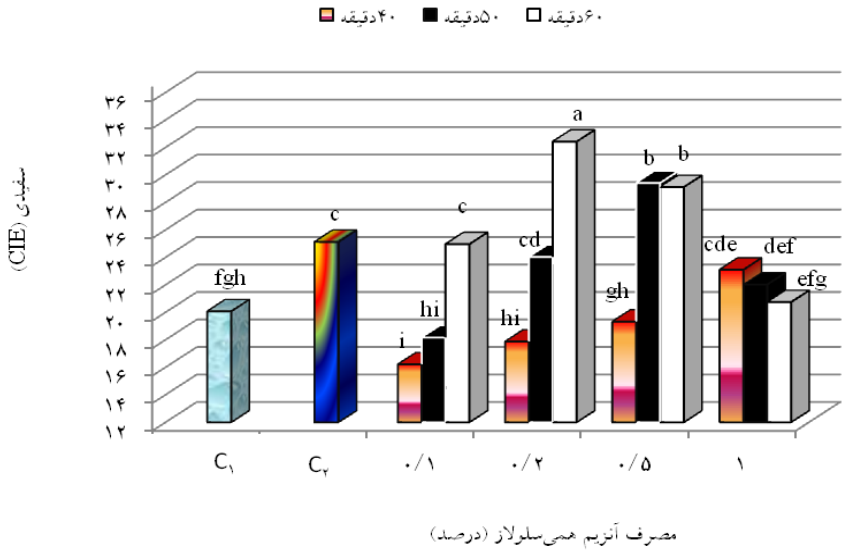
www.SID.ir

Archive Of SID

روشنی و سفیدی و همچنین کمترین میزان زردی در بین تیمارهای آنزیمی انجام‌گرفته در دو تیمار H_2T_3 (به‌ترتیب ۴۳/۷۳ درصد ایزو، ۳۲/۴۱۹ درصد و ۱۰/۳۳۶ درصد ایزو) و H_2T_2 (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 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 خمیرکاغذهای مرکب‌زدایی‌شدهٔ آنزیمی نسبت به خمیرکاغذهای C_1 و C_2 کمتر است که این با توجه به ضریب جذب نور کمتر در این خمیرکاغذها به‌دلیل وجود ذرات مرکب کمتر در کاغذ توجیه‌پذیر است.



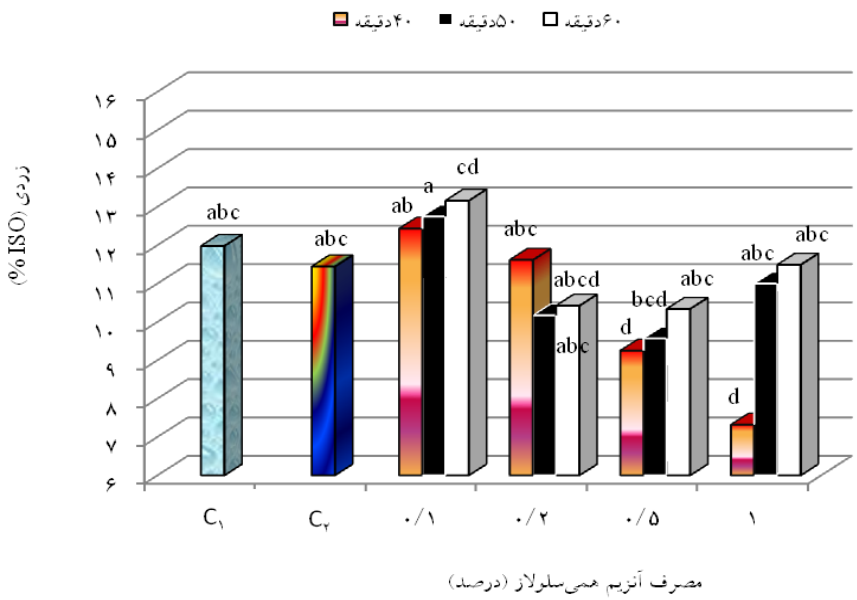
شکل ۱. تأثیر شرایط مختلف تیمار آنزیمی با همی‌سلولاز بر درجهٔ روشنی



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

www.SID.ir

Archive Of SID



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

جدول ۲. مقایسهٔ ماتی و ضریب جذب نور کاغذ در شرایط مختلف تیمار آنزیمی با همی‌سلولاز

ویژگی کاغذ کد تیمار	ماتی (% ISO)	ضریب جذب نور (% ISO)
C_1	۹۹/۷۴ a	۱۸/۷۱ a
C_2	۹۸/۳۵ ab	۱۳/۶۹ bc
H_1T_1	۹۷/۳۹ bc	۱۵/۳۹ b
H_1T_2	۹۶/۳۲۱ cd	۱۴/۱۶ bc
H_1T_3	۹۵/۸۳۲ cd	۱۴/۹۱ b
H_2T_1	۹۶/۱۱۷ cd	۱۴/۰۲ bc
H_2T_2	۹۵/۱۳۴ de	۱۱/۳۹ cdef
H_2T_3	۹۱/۴۶ h	۱۰/۲۲ ef
H_3T_1	۹۴/۵۱۱ def	۱۴/۷۲ b
H_3T_2	۹۲/۱۴ gh	۹/۷۵ f
H_3T_3	۸۹ i	۱۰/۷۲ def
H_4T_1	۹۳ efgh	۱۳ bcde
H_4T_2	۹۳/۶۷ efg	۱۱/۳۱۸ cdef
H_4T_3	۹۲/۳۹ fgh	۱۲/۶۹ bcdef

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 واکشیدگی الیاف (به‌دلیل وجود NaOH)، انعطاف‌پذیری الیاف افزایش می‌یابد، در نتیجه امکان جداسازی بیشتر مرکب چاپ چسبیده به الیاف فراهم می‌شود. ازاین‌رو نسبت به خمیرکاغذ مرکب‌زدایی‌نشده (تیمار C_1)، با توجه به جدا شدن مرکب چاپ، درجهٔ روشنی و سفیدی کاغذ بهبود یافت و کمی از ماتی و ضریب

www.SID.ir

Archive Of SID

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[1] کمتر منجر می‌شود. آنزیم‌های قابل استفاده در مرکب‌زدایی شامل پکتیناز، همی‌سولاز، سلولاز و آنزیم‌های تجزیه‌کنندهٔ لیگنین[2] 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 زمینهٔ مرکب‌زدایی آنزیمی گزارش شده است که از آنزیم‌های سلولاز و همی‌سلولاز می‌توان به‌منظور اصلاح ویژگی‌های الیاف برای تغییر یا بهبود ویژگی‌های کاغذ استفاده کرد. تیمار الیاف با انواع مختلف سلولاز یا همی‌سلولاز بدون تأثیر بر ویژگی‌های مقاومتی کاغذ، موجب صرفه‌جویی انرژی در کوبیدن و پالایش خمیرکاغذ یا کاهش زمان لازم برای رسیدن به سطح مشخصی از کوبیدن یا پالایش می‌شود [۹]. در اثر تیمار آنزیمی با زایلاناز درجهٔ روشنی خمیرکاغذ بهبود می‌یابد. آنزیم‌های همی‌سلولاز مثل زایلاناز با جداسازی زایلان کروموفوریک (هگزنورانیک اسید) از سطح الیاف و نرمه‌ها به بهبود درجهٔ روشنی و کاهش زردی کاغذ منجر می‌شوند [۱۶]. زایلاناز مصرفی در رنگ‌بری، زایلانازهای رسوب‌داده‌شده روی سطح الیاف را جدا می‌کند و تأثیر مواد شیمیایی رنگ‌بری را افزایش می‌دهد، در نتیجه هزینهٔ مصرف مواد شیمیایی رنگ‌بری و عوامل براق‌کنندهٔ نوری[3] کاهش می‌یابد [۱۷].

آنزیم همی‌سلولاز با هیدرولیز سطحی همی‌سلولز و جداسازی و آزاد کردن میکروفیبریل‌های سطحی الیاف در نتیجهٔ جداسازی مرکب چاپ از کاغذ، موجب بهبود درجهٔ روشنی می‌شود [۱۱]. همان‌طور که در شکل‌های ۲ تا ۵ مشاهده می‌شود، با استفاده از آنزیم همی‌سلولاز در سطوح مختلف و زمان‌های مختلف می‌توان به کاغذ با ویژگی‌های نوری مشابه یا حتی بهتر از خمیرکاغذهای مرکب‌زدایی‌نشده (تیمار C_1) یا مرکب‌زدایی‌شده به روش متداول شیمیایی (تیمارC_2) دست یافت. در غلظت آنزیم ۰/۲ درصد و مدت زمان ۶۰ دقیقه (تیمارH_2T_3) یا غلظت آنزیم ۰/۵ درصد و مدت زمان ۵۰ دقیقه (تیمارH_3T_2)، می‌توان کاغذهای به‌مراتب روشن‌تر، سفیدتر (با زردی کمتر) و همزمان ماتی مناسب در مقایسه با تیمارهای C_1 و C_2 دست یافت. برای مثال با پیش‌تیمار آنزیمی H_2T_3 می‌توان کاغذ با درجهٔ روشنی و سفیدی بیشتر (به‌ترتیب ۱/۶۸ و ۲۲/۵۱ درصد) و زردی کمتر (۸/۹۳ درصد) در مقایسه با کاغذ حاصل از تیمار C_2 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 نتیجهٔ افزایش جزئی ماتی) کاغذ منجر شد که با توجه به افزایش درجهٔ روشنی 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

1. Disposal
2. Lignolytic enzymes
3. Optical brightening agents

www.SID.ir

Archive Of SID

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 درجهٔ روشنی و سفیدی کاغذ نیز کاهش یافته است. ذرات مرکب در مقایسه با الیاف و نرمه‌های خمیرکاغذ قابلیت جذب نور بیشتری دارند، ازاین‌رو وجود ذرات بیشتر مرکب چاپ در ساختار کاغذ به‌دلیل افزایش میزان جذب نور کاغذ، موجب افزایش ماتی کاغذ خواهد شد [۱، ۱۸]. در شرایط بسیار شدیدتر (غلظت‌های بیشتر و زمان‌های طولانی‌تر)، افت درجهٔ روشنی 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 همی‌سلولزهای سطحی الیاف (مثلاً زایلان‌ها) دوباره روی سطح الیاف رسوب یافته‌اند.

استفاده از آنزیم‌های همی‌سلولاز مثل زایلاناز، سبب جداسازی همی‌سلولزهای سطحی (زایلان) الیاف می‌شود و در شرایط شدید ممکن است همی‌سلولزهای جداشده بر روی الیاف رسوب کنند که این ترکیبات را می‌توان در بخش رنگ‌بری دوباره با زایلاناز خارج کرد و هزینهٔ مواد شیمیایی رنگ‌بری را کاهش داد [۱۷]. با توجه به تأثیر پدیدهٔ کنده شدن فیبریل‌های سطحی الیاف یا توسعهٔ فیبریله شدن الیاف ضمن تأثیر آنزیم، با افزودن میزان مصرف آنزیم و حتی مدت زمان تیمار آنزیمی، کمی درجهٔ روشنی و سفیدی کاغذ (همزمان با کاهش زردی و ماتی) بهبود یافت، هرچند در بعضی از سطوح تیمارهای انجام‌گرفته، به‌لحاظ آماری اختلاف معنی‌داری وجود ندارد. به‌طور کلی با افزایش میزان مصرف آنزیم همی‌سلولاز 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 نتیجهٔ 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 خمیرکاغذ بیشتر شود، ازاین‌رو بهبود درجهٔ روشنی و سفیدی کاغذ توجیه‌پذیر باشد. در این زمینه نتایج تحقیقات سیمیجانا[1] و همکاران (۲۰۰۳) در مورد مرکب‌زدایی و قابلیت رنگ‌بری کاغذ روزنامهٔ باطله با مخلوط آنزیم‌های سلولاز- همی‌سلولاز 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 خمیرکاغذ مرکب‌زدایی‌شده و رنگ‌بری‌نشده و مصرف ۰/۵درصد برای خمیرکاغذ 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 ترکیدگی

نتایج بررسی تأثیر سطوح مختلف مصرف همی‌سلولاز 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 همی‌سلولاز 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 اولیهٔ سیستم در محدودهٔ

1. Rsimijana

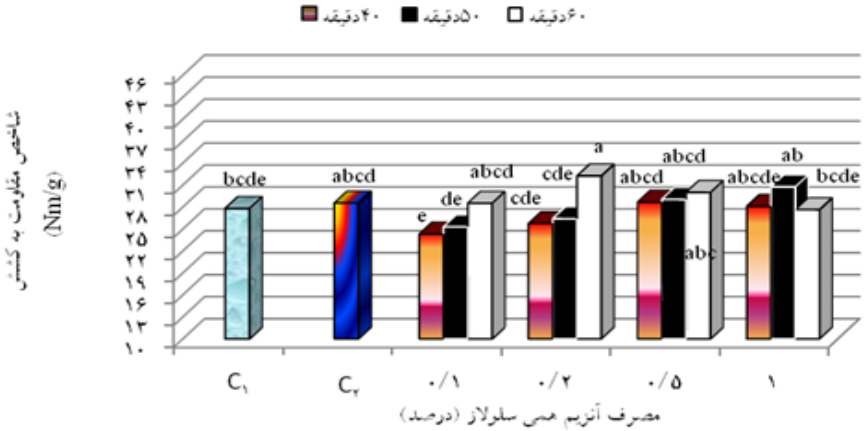
www.SID.ir

Archive Of SID

قلیایی است، با توجه به بهبود واکشیدگی الیاف، قابلیت انعطاف‌پذیری الیاف افزایش می‌یابد، در نتیجه امکان جداسازی بیشتر مرکب چسبیده به الیاف فراهم می‌شود. بنابراین نسبت به خمیرکاغذ مرکب‌زدایی‌نشده، با توجه به جداسازی بیشتر الیاف از ترکیب کاغذ و بهبود اتصال بین الیاف می‌توان انتظار داشت که ویژگی‌های مکانیکی کاغذ کمی افزایش یابد [٤، ١٤]. نتایج تجزیهٔ واریانس نشان داد که با تیمارهای شیمیایی و آنزیمی، ویژگی‌های شاخص مقاومت به کشش (شکل ٤)، طول پارگی و همچنین سفتی کاغذ (جدول۳) به‌طور معنی‌داری تغییر یافتند. در غلظت‌های ۰/۱ تا ۰/۵ درصد، افزایش مدت زمان تیمار آنزیمی تا٦٠ دقیقه، به بهبود این مقادیر منجر شد، هرچند این مقادیر در بعضی شرایط به‌لحاظ آماری معنی‌دار نبوده است. این در حالی است که در غلظت‌های بیشتر (۱ درصد)، در صورت استفاده از مدت زمان طولانی‌تر (٦٠ 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 به‌طور معنی‌داری افزایش یافت. افزایش بیش از ۰/۱ درصد، بهبود معنی‌داری را در این مقادیر نشان نداد. به‌طور کلی افزایش مدت زمان تیمار تا٦٠ 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 به٦٠ دقیقه افزایش یافت، افزایش میزان مصرف همی‌سلولاز تا ۰/۲درصد به میانگین مقادیر شاخص مقاومت به کشش کاغذ (سطح 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 ۲/۹۷٤ کیلومتر) و سفتی کاغذ (۳/۹٤و ٤/۱۲ میلی‌نیوتن) به‌ترتیب در تیمارهای H_2T_3 و H_3T_3 مشاهده شده که این مقادیر به‌مراتب مطلوب‌تر از کاغذهای حاصل از تیمارهای C_1 و C_2 است (شکل ٤ و جدول ۳). نتایج تجزیهٔ واریانس مقادیر شاخص مقاومت به ترکیدگی کاغذها بیانگر آن است که تیمارهای آنزیمی همی‌سلولاز و همچنین تیمار شیمیایی کاغذ بازیافتی به بهبود معنی‌دار شاخص مقاومت به ترکیدگی کاغذ در مقایسه با خمیرکاغذ مرکب‌زدایی‌نشده منجر شده است. آزمون دانکن این مقادیر را در چهار گروه مجزا قرار داده است (جدول۳). مرکب‌زدایی شیمیایی موجب بهبود ۲/۹٤ درصد در شاخص مقاومت به ترکیدگی کاغذهای حاصل شد. به‌طور کلی با اعمال تیمارهای آنزیمی در سطوح مختلف غلظت و زمان‌های تیمار آنزیمی، می‌توان به کاغذهای با شاخص مقاومت به ترکیدگی به‌مراتب 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 (٦٠ دقیقه)، شاخص مقاومت به ترکیدگی کاغذ کاهش یافت. به‌طور کلی در بین تیمارهای مختلف آنزیمی، بیشترین شاخص مقاومت به ترکیدگی مربوط به تیمارهای H_4T_2 و H_3T_3 به‌ترتیب ۲/۷۳ $kP.m^2/g$ و ۲/٤۷۵) است (جدول ۳).

www.SID.ir

Archive Of SID



شکل ٤. تأثیر شرایط مختلف تیمار آنزیمی با همی‌سلولاز بر شاخص مقاومت به کشش کاغذ

جدول ۳. مقایسهٔ طول پارگی، سفتی و شاخص مقاومت به ترکیدگی کاغذ در شرایط مختلف تیمار آنزیمی با همی‌سلولاز

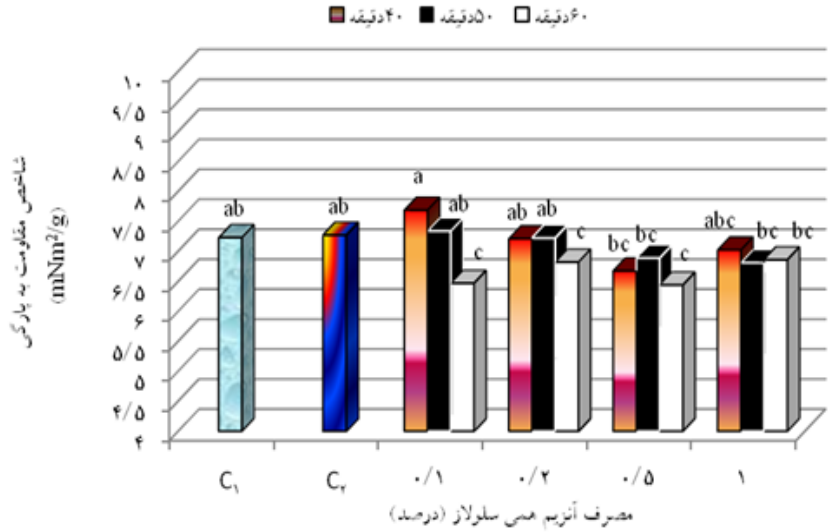
ویژگی کاغذ کد تیمار	طول پارگی (km)	سفتی (mN)	شاخص مقاومت به ترکیدگی (kP.m²/g)
C_1	۲/۸۳۵ abcde	۳/۴۸ bcd	۱/۹ d
C_2	۲/۹۱۳ abcd	۳/۳۶۹ cd	۱/۹۵۶ cd
H_1T_1	۲/۳۹۵ e	۲/۱۳ f	۲/۰۰۱ cd
H_1T_2	۲/۵۰۷ de	۲/۵۳۶ ef	۲/۱۳ bcd
H_1T_3	۲/۸۲۷ abcde	۳/۸۵ abc	۲/۲۹۵ bc
H_2T_1	۲/۵۵۲ cde	۲/۳۷ f	۲/۰۳۵ cd
H_2T_2	۲/۶۱۱ bcde	۲/۶۰۱ ef	۲/۲۳۴ bcd
H_2T_3	۳/۱۳۱ a	۳/۹۴ ab	۲/۷۳ a
H_3T_1	۲/۷۱۹ abcde	۲/۶۳۲ ef	۲/۱۱۵ bcd
H_3T_2	۲/۸۵۵ abcd	۳/۰۰۷ de	۲/۳۰۹ bc
H_3T_3	۲/۹۷۴ abc	۴/۱۲ a	۲/۲۶۹ bcd
H_4T_1	۲/۷۵۷ abcde	۳/۰۲۹ de	۲/۱۵۲ bcd
H_4T_2	۳/۰۴۱ ab	۳/۴۶ bcd	۲/۴۷۵ ab
H_4T_3	۲/۷۴۱ abcde	۳/۰۲۶ de	۱/۹۳۴ cd

شاخص مقاومت به پارگی

نتایج ارزیابی تجزیهٔ واریانس مقادیر شاخص مقاومت به پارگی کاغذ نشان داد که با استفاده از تیمارهای آنزیمی همی‌سلولاز می‌توان به کاغذهای با شاخص پارگی مشابه یا حتی بیشتر از نمونهٔ تیمارهای C_1 و C_2 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).

www.SID.ir

Archive Of SID



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

نتایج بررسی مقایسهٔ ویژگی‌های مقاومتی کاغذ شامل شاخص مقاومت به کشش، سفتی و کشش کاغذ نشان داد که با استفاده از تیمارهای آنزیمی همی‌سلولاز در شرایط مختلف می‌توان کاغذهای با ویژگی‌های مکانیکی مشابه یا حتی بهتر از خمیرکاغذهای C_1 و C_2 تولید کرد. اعمال پیش‌تیمار آنزیمی با توجه به خروج مرکب چاپ در نتیجهٔ بهبود درجهٔ روشنی، موجب بهبود ویژگی‌های مقاومت به کشش، کشش و سفتی کاغذ شده است.

هیدرولیز سلولز و همی‌سلولزهای سطحی الیاف به جداسازی فیبریل‌های سطحی الیاف تحت عنوان پدیدهٔ کنده شدن الیاف[1] منجر می‌شود و با رخ دادن این پدیده، جداسازی مرکب چاپ از سطح کاغذ آسان‌تر خواهد شد. همچنین در یکی از فرضیات مطرح‌شده اشاره شده است که تغییر آب‌گریزی[2] ذرات مرکب در اثر جداسازی فیبریل‌های ریز، امکان جداسازی آنها را از الیاف خمیرکاغذ طی مراحل شست‌وشو و شناورسازی افزایش می‌دهد. براساس فرضیه‌های مطرح‌شده در بسیاری از گزارش‌های منتشرشده، آنزیم‌های اندو-زایلاناز فعالیت عمده‌ای را در بهبود کارایی مرکب‌زدایی طی توالی با سایر آنزیم‌ها مثل سلولاز ایفا می‌کنند، به‌طوری که در توالی‌های آنزیمی مثل همی‌سلولاز-سلولاز، میزان جداسازی مرکب چاپ از کاغذ با توجه به عمل هیدرولیز همی‌سلولزهای سطحی الیاف توسط همی‌سلولاز افزایش می‌یابد. در بعضی از گزارش‌های منتشرشده فرض شده که در توالی‌های آنزیمی همی‌سلولاز- سلولاز، آنزیم اندوگلوکاناز سهم عمده‌ای در مرکب‌زدایی دارد و با جداسازی میکروفیبریل‌های سطحی الیاف و بخش‌های آمورف سلولز (سلولز با نظم کمتر)[3]، موجب واکشیدگی دیوارهٔ الیاف و آزاد شدن الیاف کوتاه (ریز)[4] می‌شود [۱۸]. بسیاری از محققان تأثیر آنزیم همی‌سلولاز را بسیار مهم دانسته‌اند، به‌طوری که استفاده از این آنزیم‌ها در توالی‌های مختلف آنزیمی، اثر هم‌افزایی[5] در کارایی مرکب‌زدایی خواهد داشت.

1. Peeling off fiber
2. Hydrophobicity
3. Less-order cellulose
4. Loosening of short fiber
5. Synergistic

www.SID.ir

Archive Of SID

براساس نتایج این پژوهش، با استفاده از تیمارهای آنزیمی همی‌سلولاز می‌توان کاغذهای با شاخص مقاومت به کشش و پارگی مشابه با تیمارهای C_1 و C_2 و حتی در بعضی شرایط کاغذ مطلوب‌تری تولید کرد. در غلظت و زمان‌های مختلف تیمار آنزیمی، تأثیرات آنزیم متفاوت است، به‌طوری که در غلظت‌های ۰/۱ تا ۰/۵ درصد، افزایش مدت زمان تیمار آنزیمی تا۶۰ دقیقه، سبب بهبود غیرمعنی‌دار شاخص مقاومت به کشش کاغذ شده است. این در حالی است که در غلظت‌های بیشتر (۱ درصد)، در صورت استفاده از مدت زمان طولانی‌تر (۶۰ دقیقه)، شاخص مقاومت به کشش کاغذ کاهش یافت. از طرف دیگر، در زمان‌های واکنش ۴۰ تا ۵۰ دقیقه، 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 منجر شد. این در حالی است که سفتی کاغذها با افزایش سطح مصرف آنزیم به ۰/۵ درصد و همچنین مدت زمان تیمار آنزیمی به‌طور معنی‌داری افزایش یافت، اما افزایش بیش از ۰/۱ درصد، بهبود معنی‌داری را در این مقادیر نشان نداد. افزایش میزان مصرف همی‌سلولاز به ۰/۲ درصد به بهبود میانگین مقادیر شاخص مقاومت به کشش کاغذ منجر شد، اما در غلظت‌های بیشتر از ۰/۲ درصد، شاخص مقاومت به کشش کاغذ کاهش غیرمعنی‌داری یافت. همچنین با اعمال تیمارهای آنزیمی در سطوح مختلف غلظت و زمان‌های تیمار آنزیمی، شاخص مقاومت به ترکیدگی کاغذ بهبود یافته و مقادیر میانگین به‌دست‌آمده به‌مراتب بیشتر از تیمارهای C_1 و C_2 مشاهده‌شده است. برای مثال در بین تیمارهای مختلف آنزیمی، بیشترین شاخص مقاومت به ترکیدگی مربوط به تیمارهای H_4T_2 و H_3T_3 (به‌ترتیب ۲/۷۳ $kP.m^2/g$ و ۲/۴۷۵) است. همچنین یکی از دستاوردهای مهم این پژوهش این است که با پیش‌تیمار آنزیمی همی‌سلولاز می‌توان کاغذهای با شاخص پارگی مشابه یا حتی بیشتر از نمونه تیمارهای C_1 و C_2 (علاوه‌بر شاخص‌های مقاومت به کشش و ترکیدگی 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.

در اثر تیمار آنزیمی با آنزیم همی‌سلولاز (زایلاناز)، انعطاف‌پذیریو قابلیت تغییر شکل[1] الیاف خمیرکاغذ کرافت رنگ‌بری شده[۱۷] و الیاف سوزنی‌برگ[۱۹] افزایش یافته در نتیجه دانسیته ورقه کاغذ تر[2] افزایش، پروزیته کاغذ کاهش و مقاومت به فیلتر شدن خمیرکاغذ در ماشین کاغذ بهبود می‌یابد [۱۸، ۱۹]. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده در این پژوهش، می‌توان بیان داشت که در اثر تیمار آنزیمی با همی‌سلولاز در مرکب‌زدایی کاغذ باطله، ذرات مرکب چاپ و سایر آلاینده‌ها از ترکیب خمیرکاغذ خارج می‌شوند (در نتیجه بهبود درجه روشنی، سفیدی و کاهش زردی کاغذ مشاهده شده است). ذرات مرکب چاپ می‌توانند 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 خمیرکاغذ، می‌توان گفت که ضمن خروج مرکب چاپ، اتصال بین الیاف می‌تواند بهتر و راحت‌تر رخ دهد در نتیجه ویژگی‌های مکانیکی کاغذ بهبود می‌یابد. براساس نتایج بلومستد[3] و همکاران

1. Collapsibility
2. Wet web
3. Blomstedt

www.SID.ir

Archive Of SID

(۲۰۰۳)، تأثیر آنزیم زایلاناز بر ویژگی‌های مکانیکی کاغذ دست‌ساز، مقاومت الیاف و بازده خمیرکاغذ 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 همی‌سلولاز 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 به‌عنوان یکی از ویژگی‌های مکانیکی کاغذ با تیمارهای آنزیمی، اغلب به‌طور منفی تحت تأثیر قرار می‌گیرد[۲۰]. شواهد حاصل از این پژوهش نشان داد که در مقایسه با کاغذهای حاصل از خمیرکاغذ مرکب‌زدایی‌شدهٔ شیمیایی می‌توان به‌مراتب 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. جَکسون[1] و همکاران (۱۹۹۳) با بررسی تأثیر آنزیم‌های سلولاز و همی‌سلولاز بر الیاف خمیرکاغذ کرافت بیان داشتند که این آنزیم‌ها به‌جای الیاف، ترجیحاً به نرمه‌ها می‌چسبند و در صورت استفاده از مخلوط سلولاز+ همی‌سلولاز، الیاف بلند خمیرکاغذ از تخریب بیشتر ناشی از سلولاز محافظت می‌شود[۲۱]. با این توضیحات می‌توان گفت که در غلظت‌های بیشتر و زمان‌های طولانی تیمار آنزیمی همی‌سلولاز (۶۰ دقیقه)، الیاف خمیرکاغذ بیشتر تحت تأثیر عمل آنزیم همی‌سلولاز قرار می‌گیرد و بخشی از آن به نرمه تبدیل می‌شود. ازاین‌رو شاخص مقاومت به پارگی کاغذ با کاهش متوسط طول الیاف کم می‌شود.

در مورد تغییرات سطح الیاف طی تیمار آنزیمی، دات[2] و همکاران (۲۰۱۲) با گرفتن تصاویر میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM)[3] از سطح الیاف کاغذ باطلهٔ اداری تفکیک‌شده (SOP)[4] که با ترکیب سلولاز و زایلاناز پیش‌تیمار شده است، دریافتند که ساختار توپوگرافی سطح الیاف به‌لحاظ زبری سطح، تغییرات چشمگیری یافته و دلیل عمدهٔ آن به ظاهر شدن میکروفیبریل‌های سطح الیاف نسبت داده شده است. همچنین تصاویر میکروسکوپ الکترونی SEM ساختار فیبریلی و وجود ترک[5]، شکاف (شیار)[6] و برآمدگی[7] را روی سطح الیاف تیمارشده با آنزیم سلولاز و همچنین همی‌سلولاز (زایلاناز) اثبات کرده و در غلظت‌های بسیار زیاد حتی آسیب[8] شایان توجه به الیاف هم مشاهده شده است[۲۲]. ازاین‌رو 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 همی‌سلولاز بر روی الیاف (در نتیجه آسیب احتمالی بیشتر الیاف طی سازوکار تخریبی)، کاهش می‌یابد. به‌عنوان نتیجه‌گیری نهایی می‌توان گفت که استفاده از آنزیم همی‌سلولاز پتانسیل شایان توجهی در مرکب‌زدایی مخلوط کاغذ روزنامه و مجلهٔ باطله دارد و با کنترل شرایط تیمار آنزیمی می‌توان کاغذهای با کیفیت به‌مراتب بهتر نسبت به مرکب‌زدایی متداول شیمیایی تولید کرد.

1. Jackson

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

www.SID.ir

Archive Of SID

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، مرکب‌زدایی آنزیمی مخلوط کاغذ روزنامه و مجلهٔ باطله با استفاده از آنزیم همی‌سلولاز (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 همی‌سلولاز و همچنین زمان‌های مختلف تیمار آنزیمی می‌توان کاغذهای با خواص کیفی (مجموع ویژگی‌های نوری و مقاومتی) مشابه یا حتی بهتر از نمونهٔ خمیرکاغذ تیمارنشده با آنزیم (تیمار C_1) و همچنین خمیرکاغذ مرکب‌زدایی‌شده با مواد شیمیایی (تیمار C_2) تولید کرد، به‌طوری که شدت تأثیرات آنزیم در غلظت و زمان‌های مختلف تیمار آنزیمی متفاوت بوده است. آنزیم همی‌سلولاز با هیدرولیز سطحی همی‌سلولز و جداسازی و آزاد کردن میکروفیبریل‌های سطحی الیاف، جداسازی مرکب چاپ از کاغذ، موجب بهبود درجهٔ روشنی و سفیدی در نتیجه بهبود ویژگی‌های مقاومتی کاغذ می‌شود. همچنین یکی از دستاوردهای مهم این پژوهش این است که با پیش‌تیمار آنزیمی همی‌سلولاز می‌توان کاغذهای با شاخص پارگی مشابه یا حتی بیشتر از نمونه تیمارهای C_1 و C_2 (علاوه‌بر شاخص‌های مقاومت به کشش و ترکیدگی 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.

www.SID.ir

Archive Of SID

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 Reverend 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.

www.SID.ir

Archive Of SID

[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.

www.SID.ir