

تأثیر آنزیم سلولاز بر ویژگی‌های کاغذ حاصل از خمیر کاغذ جوهرزدایی شده

زهرا عفراتی¹، محمد طلائی پور²، علیرضا خاکی فیروز³، بهزاد بازیار⁴

چکیده

در این تحقیق، خمیر جوهرزدایی شده از کارخانه لطیف و به‌طور کاملاً تصادفی تهیه شد. خمیر تهیه شده با آنزیم سلولاز تیمار شد. تأثیر تیمار آنزیمی بر درجه‌روانی خمیر جوهرزدایی شده و ویژگی‌های مقاومتی کاغذ دست‌ساز به‌خصوص مقاومت به کشش، مقاومت به ترکیدن، مقاومت به پارگی و مقاومت به تاخوردگی بررسی گردید. متغیرهای تیمار آنزیمی عبارت بودند از: مقدار آنزیم (0/1% و 0/3% بر اساس وزن خشک خمیر) و زمان تیمار آنزیمی (30، 60 و 120 دقیقه). در این تیمارها، دمای تیمار آنزیمی 30 درجه سانتی‌گراد تنظیم شد، pH=5 و درصد خشکی خمیر کاغذ، 3 درصد ثابت نگه‌داشته شد. نتایج حاصل از تحقیق نشان داد که تیمارهای آنزیمی سبب بهبود ویژگی‌های مقاومتی کاغذهای دست‌ساز ساخته شده از خمیر تیمار شده می‌شود. به‌علاوه، بیشترین مقاومت‌ها در نمونه خمیرهای تحت تأثیر تیمار آنزیمی با شرایط 0/3 درصد آنزیم و مدت 60 دقیقه مشاهده شد. کمترین مقدار درجه‌روانی (°RS) در نمونه خمیرهای تحت تأثیر تیمار آنزیمی با شرایط 0/3 درصد آنزیم و مدت 120 دقیقه بود.

واژه‌های کلیدی: آنزیم، سلولاز، الیاف بازیافتی، خواص مقاومتی کاغذ، درجه‌روانی

1- دانشجوی دوره کارشناسی ارشد گروه مهندسی علوم و صنایع چوب و کاغذ دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران
Z-efrati@ Yahoo. Com

2- استادیار و عضو هیات علمی گروه مهندسی علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران

3- مربی و عضو هیات علمی گروه مهندسی علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشگاه آزاد اسلامی واحد مهرشهر، کرج

4- استادیار و عضو هیات علمی گروه مهندسی علوم و صنایع چوب و کاغذ دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران

مقدمه و هدف

آنزیم‌ها کاتالیزور واکنش‌های بیوشیمیایی هستند به طوری که مقادیر جزئی آنزیم برای کاتالیزواکنش بیوشیمیایی در سطح وسیع کافی است، به نحوی که یک مولکول قادر است تا چندین میلیون مولکول را طی زمانی کوتاه به محصول مربوطه تبدیل کند. به عبارت دیگر اگر آنزیم‌ها وجود نداشت، واکنش‌ها بسیار آرام انجام می‌شد. آنزیم‌ها منحصر به فرد هستند، به این معنی - که هر یک از آنزیم‌ها، عملکرد خاص و منحصر به فردی را انجام می‌دهند [8]. تحقیقات بر روی آنزیم‌های سلولاز از سال 1950 انجام گرفته است. تمایل به استفاده از این آنزیم در طی سه دهه اخیر به شدت افزایش یافته است. در بسیاری از کاربردهای صنعتی اعم از صنایع غذایی، تولید غذای حیوانات، فرآیندهای تولید خمیر و کاغذ و نساجی از سلولاز و همی سلولاز استفاده می‌شود. همچنین بسیاری از فرآیندهای بیوتکنولوژی در صنعت خمیر و کاغذ، مورد استفاده قرار می‌گیرند. از سال 1970، استفاده از آنزیم به منظور خمیرسازی بیومکانیکی، بهبود ویژگی‌های الیاف، جوهرزدایی و بهبود آبگیری، مرسوم گردید [3]. در طی چند دهه اخیر مصرف کاغذ در سرتاسر دنیا افزایش یافته است. به دلیل اهمیت مصرف کاغذ در پی‌آمدهای محیطی و اقتصادی، بازیافت و مصرف الیاف ثانویه اهمیت زیادی پیدا کرد. یکی از اهداف بازیافت کاغذ، جوهرزدایی و زدایش سایر آلاینده‌ها (مانند ذرات چسبنده¹) ضمن حفظ خواص نوری و مقاومتی الیاف می‌-

باشد. از آنزیم‌ها می‌توان به منظور افزایش میزان آبگیری از خمیر کاغذ، تسهیل زدایش آلاینده‌ها و افزایش قدرت پیوند الیاف بازیافتی استفاده کرد [10]. مقاومت به آبگیری الیاف بازیافتی بر تشکیل ورقه کاغذ اثر نامطلوب داشته، سرعت تولید ماشین کاغذسازی را کاهش و انرژی لازم برای خشک کردن کاغذ را افزایش می‌دهد. استفاده از آنزیم‌ها، جداسازی الیاف از جوهر و سایر آلاینده‌ها، در مراحل شستشو و شناورسازی را تسهیل نموده و در نتیجه زدایش جوهر و سایر آلاینده‌ها را بهبود می‌بخشد [1]. آنزیم سلولاز بر اساس طریقه عملکردش به سه دسته تقسیم می‌شود: 1- اندوگلوکانازها²، 2- اگزوگلوکانازها³، 3- β -D-گلوکوسیداز. استفاده مناسب از آنزیم اندوگلوکاناز می‌تواند میزان آبگیری الیاف بازیافتی را در مقایسه با افزودن پلیمرها، بیشتر افزایش دهد. افزودن آنزیم بعد از پالایش، درجه روانی⁴ خمیر را افزایش می‌دهد و در نتیجه سرعت آبگیری و ماشین کاغذسازی افزایش می‌یابد. پالایش به کمک تیمار آنزیمی می‌تواند موجب شکل‌گیری بهتر کاغذ، افزایش خواص مقاومتی و در مجموع استفاده بیشتر از الیاف بازیافتی شود. لازم به ذکر است که طبق تحقیقات انجام شده، استفاده از تیمار آنزیمی با مقدار کم آنزیم توصیه می‌گردد، چرا که اندوگلوکاناز به بخش بی‌شکل سلولز حمله نموده و باعث کاهش سریع مقاومت الیاف می‌شود [1]. به کاربردن

²Endoglucanases

³Exoglucanases

⁴Freeness

¹Sticky contaminant

فیبریلاسیون الیاف سلولزی و اتصالات بین الیاف شده و موجب افزایش ویژگی‌های مقاومتی کاغذ می‌گردد. اگرچه مکانیسم هیدرولیز آنزیمی الیاف سلولزی به‌طور وسیعی مطالعه شده ولی هنوز به‌طور واضح شناخته نشده است [7].

هدف از این تحقیق بررسی تأثیر آنزیم سلولاز بر خواص مکانیکی کاغذ ساخته‌شده از خمیر جوهرزدایی‌شده و درجه‌روانی این خمیر بوده است. علاوه‌براین، تعیین بهینه‌ترین نوع تیمار آنزیمی، از اهداف دیگر تحقیق بود.

۱- مواد و روش‌ها

۱-۱- خمیر بازیافتی جوهرزدایی شده

نمونه‌برداری از خط بازیافت کارخانه لطیف پس از مراحل جوهرزدایی انجام گرفت. الیاف اولیه خمیر شامل 50 درصد الیاف کاغذهای اداری مثل کاغذهای بایگانی و کتاب و 50 درصد پوشال مثل ضایعات صحافی (بدون جوهر)، بود.

۱-۲- آنزیم

آنزیم مورد استفاده در این تحقیق آنزیم سلولاز ($\text{Endo1,4-}\beta\text{Cellulase}$) به‌دست آمده از قارچ تریکو درما ویرید⁷ بود. این آنزیم به‌صورت پودر سفید مایل به زرد توسط شرکت مرک⁸ آلمان تولید و ارایه شده است. طبق دستورالعمل شرکت سازنده، در جدول 1 شرایط- بهینه مصرف آنزیم سلولاز آورده شده است.

سلولاز و همی سلولاز به‌جای مواد شیمیایی، قابلیت آبگیری را بهبود بخشیده و درعین حال یک روش دوست‌دار محیط زیست می‌باشد. یکی از نتایج اظهارشده آن است که سلولاز باعث خروج ذرات نرمه از خمیر کاغذ می‌شود. همچنین مشخص شده است که سطح الیاف در اثر هیدرولیز آنزیمی لایه‌های سطحی، فیبریله می‌گردد [7]. جکسون¹ (1993) و ورما² و همکارانش (2009) بیان کردند که آنزیم سلولاز با هیدرولیز ذرات نرمه منجر به کاهش حجم ذرات- نرمه و میکروفیبریل شده و قابلیت آبگیری از خمیر کاغذ افزایش می‌یابد. همچنین بیان شده است که سطح الیاف در اثر هیدرولیز آنزیمی لایه‌های سطحی، فیبریله می‌شوند. علاوه‌براین فعالیت زیاد آنزیم سلولاز، منجر به هیدرولیز بیش از اندازه‌ای در الیاف سلولزی و منجر به کاهش ویژگی‌های مقاومتی فرآورده می‌گردد. همچنین دی‌انز³ و همکارانش (2004) به این نتیجه رسیدند که آنزیم سلولاز، آبگیری از الیاف سلولزی بازیافتی را 18 تا 20 درصد افزایش داده و سرعت آبگیری از این الیاف را افزایش می‌دهد. جوکینن⁴ و همکارانش (1991) بیان کردند که آنزیم سلولاز موجب افزایش فیبریلاسیون الیاف سلولزی می‌گردد همچنین جفریز⁵ و همکارانش (2001) و گاما⁶ و همکارانش (2006) نیز به این نتیجه رسیدند که آنزیم سلولاز موجب افزایش

¹Jackson

²Verma

³Dienes

⁴Jokinen

⁵Jeffries

⁶Gama

⁷-Trichoderma viride

⁸-Merck

جدول ۱- شرایط بهینه عملکرد آنزیم [14]

فعالیت آنزیم	mg/U1
فعالیت آنزیم pH دامنه	3/5-5
بهینه (حداکثر فعالیت) pH	4/8_5
دمای بهینه فعالیت آنزیم	30_50°C
بهینه ترین دمای فعالیت آنزیم (حداکثر فعالیت)	37°C
زمان بهینه فعالیت آنزیم	30-120min

۱-۳- سنجش آنزیم
 برای سنجش آنزیم سلولاز، 10 میلی لیتر از محلول رقیق آنزیم در آب مقطر با 100 میلی لیتر از محلول 3 درصد گلوکز به همراه محلول CMC و محلول 0/2 مولار بافر سترات در pH برابر 6/5 در داخل 5 لوله آزمایشی قرار داده شد و محلول ذکر شده منهای آنزیم و محلول CMC، در 5 لوله آزمایشی دیگر به عنوان لوله های استاندارد قرار گرفت. سپس محلول ها هم زده شده و به مدت 30 دقیقه در دمای 50 درجه سانتی گراد آمیخته شدند و بعد به مدت 10 دقیقه در دمای 100 درجه سانتی گراد قرار داده شدند. در مرحله بعد 1/5 میلی لیتر محلول DNS به همه لوله ها اضافه شده و هم زده شد و به مدت 15 دقیقه در دمای 100 درجه سانتی گراد قرار گرفت. سپس لوله ها به مدت 5 دقیقه در آب سرد گذاشته شده و بعد به هریک از لوله ها 8 میلی لیتر آب اضافه و هم زده شد و بعد از گذشت 20 دقیقه، با استفاده از دستگاه اسپکتروفوتومتر، جذب لوله های استاندارد و لوله های آزمون خوانده شد. سپس با استفاده از معادله 1 فعالیت آنزیمی به دست آورده شد.

۱-۴- بافر استات

برای تهیه محلول بافر استات، محلول 1 مولار از اسید استیک و استات سدیم تهیه شد سپس به ترتیب به نسبت 6ml به 4ml، این دو محلول با هم ترکیب شدند تا pH 4/8 تا 5 در محلول امولاریفر استات، حاصل و تنظیم شود.

۱-۵- تیمارهای آنزیمی

عملیات تیمار آنزیمی خمیر، برای تمامی نمونه کاغذها در درصد خشکی 3 درصد، pH=5 و در دمای 30 درجه سانتی گراد انجام گرفت. در ادامه آنزیم سلولاز به مقادیر 0/1 درصد و 0/3 درصد بر اساس وزن خشک خمیر (به ترتیب معادل 22U و 66U) به خمیر کاغذ اضافه شد. برای ثابت نگه داشتن pH از بافر استات 1 مولار با pH=5 استفاده شد. برای اعمال دمای 30 درجه سانتی-گراد از حمام بن ماری استفاده شد. به منظور تأثیر تیمارهای آنزیمی، خمیر کاغذها به مدت 30، 60 و 120 دقیقه در حمام بن ماری نگه داشته شدند. تیمارهای آنزیمی بر طبق جدول 2 طراحی شدند.

$$\text{Cellulase activity (IU)} = [1/k \times (A_x - A_0) \times F] \div (S \times 30 \times m)$$

$[1/k \times (A_x - A_0)]$: غلظت گلوکز (میکرومول بر میلی لیتر) تولید شده در هر لوله سنجش که با استفاده از معادله رگرسیون به دست آمده است.
 F: حجم نهایی هر یک از لوله ها که برابر 10/5 است.
 S: حجم محلول آنزیمی استفاده شده که برابر 0/1 میلی لیتر می باشد.

جدول 2- طرح انجام تیمارها

زمان (دقیقه)	مقدار مصرف آنزیم		دما (°C)	نام تیمار
	(%)	IU		
30	0/1	22U	30	A
60	0/1	22U	30	B
120	0/1	22U	30	C
30	0/3	66U	30	D
60	0/3	66U	30	E
120	0/3	66U	30	F

به مدت 5 دقیقه در دمای 80 تا 90 درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند تا فعالیت آنزیم مختل شود.

۱-۶- ارزیابی ویژگی‌های خمیر و کاغذهای دست‌ساز

اندازه‌گیری درجه‌روانی خمیرکاغذها براساس استاندارد 65-19-CSCAN در واحد (SR)¹ انجام گرفت. کاغذهای دست‌ساز از خمیرهای تیمارشده و شاهد با استفاده از دستگاه هندشیت-میکر² KCLHK ساخت کشور سوئد و براساس آئین‌نامه استاندارد شماره 67-26-SCANC با گرماژ 60gr/m² ساخته شد. سپس ویژگی‌های مکانیکی این کاغذها تعیین گردید: مقاومت به-ترکیدن (ISO-2758)، مقاومت به کشش (T414 om-)، مقاومت به پارگی، (ISO-12192)، و مقاومت به تاخوردگی (ISO-5626)، اندازه‌گیری شد.

برای انجام تیمارهای آنزیمی از بشرهای 1000 میلی‌لیتری به همراه درپوش آلومینیومی به عنوان محفظه تیمار استفاده شد. ابتدا نمونه خمیر به میزان محاسبه‌شده (محاسبات براساس درصدخشکی خمیرکاغذ و گرماژ موردنظر برای هر کاغذ (60gr/m²)) برای هر تیمار توزین و در داخل بشر مذکور قرار داده شد. از آنجایی که درصدخشکی اولیه خمیرکاغذ 3/47 درصد بود و باید درصدخشکی به 3 درصد می‌رسید، برطبق محاسبات، به میزان 40 میلی‌لیتر آب مقطر نیز به نمونه‌های خمیر اضافه شد و به میزان 40 میلی‌لیتر بافر استات به آن اضافه شد تا pH، 4/8 تا 5 تنظیم شود.

آنزیم سلولاز مورد نیاز برای هر تیمار (براساس درصدخشکی خمیرکاغذ و جدول 2، 0/022 و 0/066 گرم) به دقت توزین شده و در 20 میلی‌لیتر آب مقطر حل گردید و به نمونه‌های خمیر اضافه شد. پس از اطمینان از تثبیت دمای حمام آب گرم، بشر به درون حمام آب گرم منتقل شد. در طول زمان تیمار آنزیمی خمیرکاغذ داخل بشر متناوباً با همزن شیشه‌ای همزنی شد (هر 10 دقیقه یکبار). پس از اتمام زمان تیمار آنزیمی، بلافاصله بشر به روی هیتر برقی با دمای 120 درجه سانتی‌گراد قرار داده شد و

¹-Schopper-Riegler

²-Handsheat Maker

۷-۱- تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها

پس از انجام آزمون‌های مربوطه و استخراج نتایج، محاسبات آماری صورت گرفت. نتایج این تحقیق توسط تجزیه واریانس یک‌طرفه در قالب طرح کاملاً تصادفی بررسی گردید و سپس با استفاده از آزمون دانکن مقایسه بین میانگین‌ها صورت گرفت.

۲- نتایج

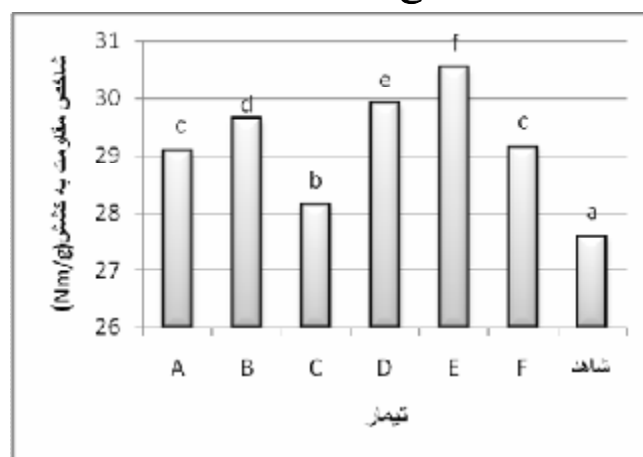
۲-۱- تأثیر تیمار آنزیمی بر ویژگی‌های خمیر جوهرزدایی شده و کاغذهای دست‌ساز

نتایج تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها نشان داد که بین میانگین ویژگی‌های درجه‌روانی و مقاومت به تاخوردگی در سطح 5% و بین میانگین ویژگی‌های مقاومت به کشش، مقاومت به پارگی و مقاومت به ترکیدن در سطح 1% تفاوت معنی‌داری وجود دارد.

جدول 3- تجزیه واریانس درجه‌روانی خمیر و ویژگی‌های مکانیکی کاغذهای دست‌ساز

مشخصه متغیر	درجه‌روانی خمیر		مقاومت به کشش		مقاومت به پارگی		مقاومت به تاخوردگی	
	F	سطح معنی‌داری (sign)	F	سطح معنی‌داری (sign)	F	سطح معنی‌داری (sign)	F	سطح معنی‌داری (sign)
تیمار	750/7	0/001	363/316	0/0001	478/774	0/0001	973/17	0/0001

بر طبق داده‌های به‌دست آمده از آزمایشات نتایج زیر بدست آمد:

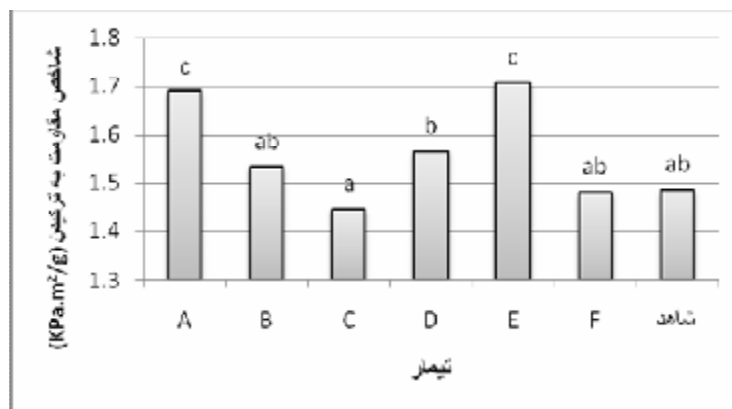


شکل 1- تأثیر تیمارهای آنزیمی بر مقاومت کششی کاغذهای دست‌ساز

به‌منظور بررسی مقاومت به کشش از شاخص مقاومت به کشش استفاده شد. همان‌طور که در شکل 1 مشاهده می‌شود، به‌طور کلی تیمارهای آنزیمی، مقاومت به کشش کاغذهای دست‌ساز را افزایش داده- است. تیمار آنزیمی باعث انعطاف‌پذیری الیاف سلولزی می‌گردد؛ همچنین افزایش پرزدار شدن و

بهتری را ایجاد کرده‌اند. به علاوه، تیمارهای B و E که به مدت 60 دقیقه تحت تأثیر تیمار آنزیمی قرار گرفته‌اند، نسبت به سایر تیمارها که به مدت زمان‌های 30 و 120 دقیقه تحت تأثیر تیمار آنزیمی قرار گرفته‌اند، مقاومت به کشش بیشتری نشان دادند. بنابراین در مدت زمان 60 دقیقه زمان کافی برای فیبریلایسیون الیاف وجود داشته است. بالاترین میزان مقاومت به کشش در مورد کاغذهای دست‌ساز ساخته شده از تیمار E است و به نظر می‌رسد که در شرایط این تیمار احتمال تشکیل پیوندهای مطلوب بیشتر بوده است.

فیبریلایسیون الیاف موجب افزایش و بهبود اتصالات می‌شود. تیمار آنزیمی با حذف بیشتر ذرات آبگریز، سبب افزایش سطح موجود برای ایجاد پیوندهای جدید بین الیاف بازیافتی می‌شود [5]. همچنین به کارگیری مقدار بیشتر آنزیم (0/3 درصد براساس وزن خشک الیاف) در تیمارهای D تا F با افزایش بیشتر فیبریلایسیون و بهبود اتصالات بین الیاف، مقاومت به کشش بالاتری نسبت به تیمارها با مقدار کمتر آنزیم (0/1 درصد بر اساس وزن خشک الیاف) را ایجاد می‌کند. در واقع با افزایش آنزیم، برخوردهای تصادفی با الیاف سلولزی افزایش یافته و اتصالات بیشتر و



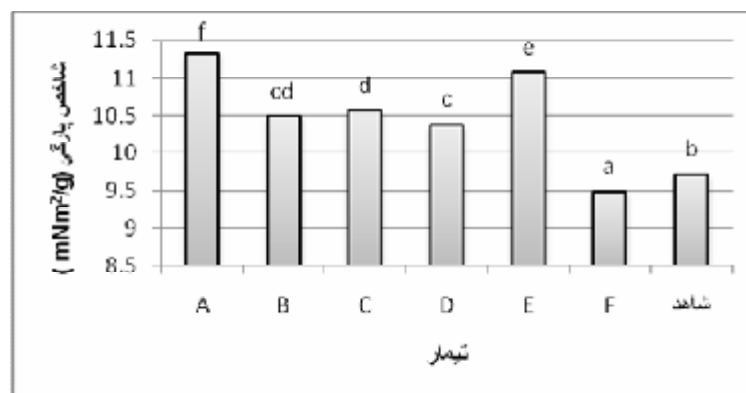
شکل 2- تأثیر تیمارهای آنزیمی بر مقاومت به ترکین کاغذهای دست‌ساز

پرزدار کردن الیاف سلولزی شده و باعث بهبود پیوندهای بین فیبری می‌گردد، بنابراین در اثر افزایش و بهبود اتصالات، مقاومت به ترکین کاغذهای دست‌ساز حاصل از نمونه خمیر تیمار شده افزایش می‌یابد [3]. همان‌طور که در شکل 2 مشاهده می‌شود بالاترین مقدار مقاومت به ترکین مربوط به تیمار E (دمای 30°C، مقدار آنزیم 0/3 درصد، مدت 60 دقیقه) می‌باشد که در این شرایط الیاف تحت تأثیر مقدار ماکزیمم آنزیم قرار گرفته و با افزایش

برای مطالعه روند تغییرات مقاومت به ترکین از شاخص مقاومت به ترکین استفاده شد. با توجه به شکل 2 مشاهده می‌شود که تیمار آنزیمی C (دمای 30°C، مقدار آنزیم 0/1 درصد، 120 دقیقه) سبب کاهش مقاومت به ترکین کاغذهای دست‌ساز نسبت به نمونه خمیر شاهد شده است. اما سایر تیمارهای آنزیمی مقاومت به ترکین کاغذهای دست‌ساز را نسبت به نمونه خمیر شاهد بهبود بخشیده و افزایش دادند. آنزیم سلولاز موجب

کاهش مقاومت به ترکیدن کاغذهای دست‌ساز حاصل از نمونه خمیر تیمار شده با تیمار C می‌توان به کم بودن احتمال تشکیل پیوندهای مطلوب در این شرایط تیماری اشاره کرد و به نظر می‌رسد در زمان 120 دقیقه، هیدرولیز بیشتر و تا حدودی تخریب در الیاف سلولزی ایجاد شده است.

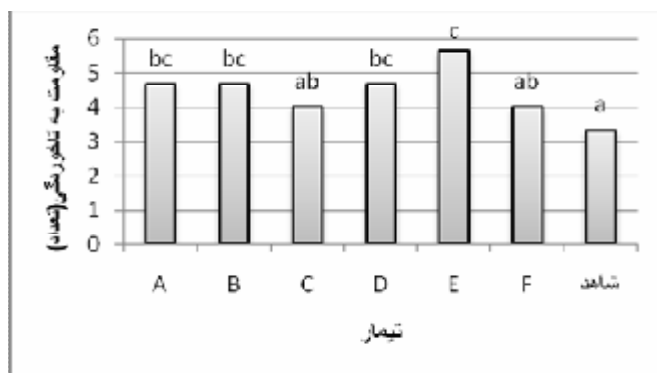
تراکم آنزیم، امکان برخورد های تصادفی آنزیم به الیاف سلولزی افزایش یافته و میکروفیبریل های بیشتری تشکیل می‌شوند؛ بنابراین اتصالات بیشتری شکل می‌گیرد. همچنین مدت زمان 60 دقیقه در افزایش این مقاومت موثر بوده و نسبت به دو زمان دیگر تیمار، زمان مناسب‌تری بوده است. از دلایل



شکل 3- تأثیر تیمارهای آنزیمی بر مقاومت به پارگی کاغذهای دست‌ساز

بیشترین مقدار مقاومت به پارگی مشاهده شد. از آنجایی که مقاومت به پارگی تابعی از اتصالات سطحی است در این تیمار انعطاف‌پذیری بیشتری در الیاف سلولزی ایجاد شده و اتصالات سطحی بهتری را ایجاد کرده است. همچنین تیمار F کمترین میزان مقاومت به پارگی را ایجاد کرده که حتی از مقاومت به پارگی کاغذهای شاهد هم کمتر می‌باشد به نظر می‌رسد با میزان بیشینه آنزیم و در بالاترین مدت زمان تیمار، نسبت الیاف کوتاه بالا رفته و باعث کاهش مقاومت به پارگی کاغذها نسبت به کاغذهای شاهد شده است.

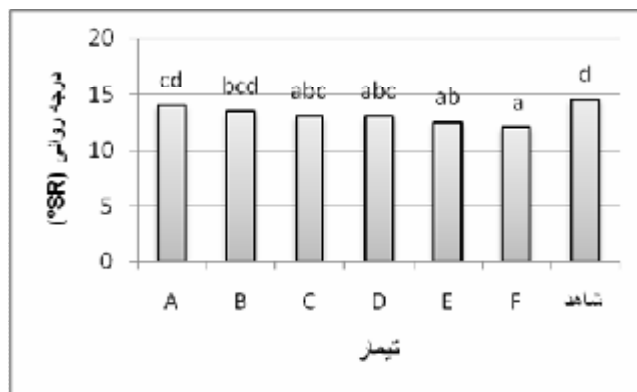
برای بررسی مقاومت به پارگی از شاخص مقاومت به پاره شدن استفاده شد. همان‌طور که در شکل 3 مشاهده می‌شود مقاومت به پارگی کاغذهای دست‌ساز حاصل از نمونه خمیرهای تیمار شده نسبت به کاغذهای دست‌ساز حاصل از نمونه خمیر شاهد افزایش نشان می‌دهد. از دلایل افزایش مقاومت به پارگی می‌توان به این نکته اشاره کرد که، تیمار آنزیمی انعطاف‌پذیری الیاف را افزایش داده و باعث ایجاد پیوندهای جدید بین فیبرهای شده و در نتیجه سبب بهبود مقاومت به پارگی الیاف سلولزی می‌شود [2]. همان‌طور که در نمودار مشاهده می‌شود در تیمار آنزیمی A،



شکل 4- تأثیر تیمارهای آنزیمی بر مقاومت به تاخوردگی کاغذهای دست‌ساز

مقدار مقاومت به تاخوردگی مربوط به کاغذهای دست‌ساز حاصل از خمیرهای تیمار شده با تیمار E می‌باشد. در این آزمون مشاهده گردید که مقدار ماکزیم آنزیم منجر به فیبریلایسیون بیشتر الیاف سلولزی شده و مدت زمان 60 دقیقه زمان کافی و مناسب برای فیبریلایسیون الیاف بوده است. در این آزمون نیز، در تیمارهای C و F که در مدت زمان 120 دقیقه تحت تیمار قرار گرفته‌اند، مقاومت به تاخوردگی کمتری مشاهده می‌گردد.

همان‌طور که در شکل 4 مشاهده می‌شود، کاغذهای دست‌ساز حاصل از خمیرهای تیمار شده با تیمارهای C، F مقاومت به تاخوردگی مشابهی با کاغذهای دست‌ساز ساخته شده از خمیر شاهد دارند. در کاغذهای حاصل از خمیرهای تیمار شده با تیمارهای آنزیمی افزایش در مقاومت به تاخوردگی نسبت به کاغذهای حاصل از خمیر شاهد مشاهده می‌گردد. آنزیم سلولاز با افزایش فیبریلایسیون فیبرها به بهبود پیوندهای بین فیبری کمک می‌کند [6]. بالاترین



شکل 5- تأثیر تیمار آنزیمی بر درجه روانی خمیر کاغذ

خمیرهای تیمار شده درجه روانی کمتری نسبت به خمیر شاهد داشتند. با کاهش و حذف بیشتر ذرات فاین و میکروفیبریل‌ها، درجه روانی

باتوجه به شکل 5 مشاهده می‌شود که در کل تیمار آنزیمی موجب افزایش قابلیت آبگیری و کاهش درجه روانی در مقیاس SR، شده است و

زمان مناسب برای فیبریلایسیون الیاف و در نتیجه تشکیل پیوندها و افزایش مقاومتها بوده است. بنابراین شرایط بهینه تیمار آنزیمی، استفاده از مقدار بیشتر سلولاز و در مدت زمان 60 دقیقه بود. کمترین مقدار درجهروانی خمیر کاغذها ($^{\circ}\text{SR}$) در نمونه خمیرهای تیمار شده با شرایط تیماری مقدار آنزیم 0/3 درصد و به مدت 120 دقیقه مشاهده شد. جکسون و همکارانش (1993) و ورما و همکارانش (2009) به این نتیجه رسیدند که آنزیم سلولاز موجب کاهش ذرات نرمه و افزایش آبگیری از خمیر کاغذ می‌گردد. در این تحقیق نیز در اثر تیمار آنزیمی با آنزیم سلولاز، درجهروانی خمیر کاغذها ($^{\circ}\text{RS}$) کاهش و آبگیری از خمیرهای تیمار شده (نسبت به خمیر شاهد) افزایش یافت.

4- سپاسگزاری

نویسندگان مقاله بر خود لازم می‌دانند از کارخانه محصولات کاغذی لطیف به‌خاطر در اختیار گذاشتن خمیر کاغذ بازیافتی جوهرزدایی شده، کمال تشکر و قدردانی را داشته باشند. همچنین از کارخانه چوب و کاغذ مازندران، سازمان استاندارد و دانشگاه آزاد واحد علوم و تحقیقات تهران، به‌خاطر بهره‌گیری از تجهیزات آزمایشگاهی، تقدیر و تشکر به‌عمل می‌آید.

($^{\circ}\text{SR}$) کاهش می‌یابد [3، 7 و 12]. در تیمارهای آنزیمی انجام شده، بیشترین درجهروانی مربوط به تیمار A، بود. در مورد این تیمار به‌نظر می‌رسد که با این شرایط تیمار آنزیمی، ذرات فاین و میکروفیبریل کمتری حذف شده، بنابراین درجه‌روانی بیشتری نسبت به سایر تیمارهای آنزیمی دارد. مقدار آنزیم 0/3 درصد درجهروانی ($^{\circ}\text{SR}$) کمتری را در خمیرهای تیمار شده ایجاد نموده است.

3- بحث و نتیجه‌گیری

هدف از این تحقیق بررسی تاثیر آنزیم سلولاز بر خواص مکانیکی کاغذ ساخته شده از خمیر جوهرزدایی شده و درجهروانی این خمیر بود. نتایج نشان داد که به‌طور کلی مقاومت‌های مکانیکی کاغذهای دست‌ساز تیمار شده نسبت به کاغذهای دست‌ساز بدون تیمار به‌طور موثری بهبود یافته است. جفریز و همکارانش (2001) و گاما و همکارانش (2006) نیز بیان کردند که تیمار آنزیمی با آنزیم سلولاز، شبکه اتصال الیاف را افزایش داده و در نتیجه مقاومت‌های مکانیکی کاغذ بهبود می‌یابد. حداکثر مقاومت‌ها با به‌کارگیری مقدار بیشتر آنزیم مشاهده شده است و به‌نظر می‌رسد که در درصد بالاتر آنزیم، میزان برخوردهای تصادفی آنزیم با الیاف و فیبریلایسیون الیاف، افزایش یافته و پیوندها و در نتیجه مقاومت بیشتری در کاغذهای دست‌ساز ایجاد شده است. همچنین مدت زمان 60 دقیقه

2- Chandra, R. P.; Ragauskas, A. J.(2001). Tappi Pulping Conference, Tappi Press, Atlanta.

3- Dienes, D.; Egyhazi, A.; Sardi, Z.; Reczey, K. (2004). Treatment of recycled fiber with trichodermacellulases, industrial crops and products. Journal., 20, p:11-21.

4- Dumitriu, S.; (1998). Polycaccharides Structural Diversity and Fuctionalversality. Printed in the united states of America.

5-Gama, M.; Pala, H.; Mota, M. (2006) Factors influencing MOW deinking: laboratory scale studies. Enzymemicrobtecnol. 38: 81-87.

6-Hatman, R. R. 1979. Mechanical treatment of pulp fiber for property development, Dotraldisstrtation, Lawaranceuniversity, Appleton, Wisconsin. page.8.

7- Jacson, L. S., 1993. Enzymatic modifications of secondary fiber. Tappi J. 76(3), 147-154.

8-Jain, H., Ma. (2002). Enzyme applications in the pulp and paper industry. Enzymatic Deinking Tecnology, 5305 oakbrookparkway, Norcross, GA 30093-2250.

9-Jokinan, O.; Kttunen, J.; Lepo, J.; Neimi, T.; and Leine, J. E. (1991). "Method of producing fluff pulp with improved defibration properties," US Pat. 5,068,009.

10- Jeffries, T. W.; Kirk, T. K. (2001). Roles for microbial enzymes in pulp and paper processing, Institute for microbial and biochemical thechnology, U.S. Department of agriculture, One giffordpinchotdrive, Madison, WI 53705.

منابع

- 1- حمصی، امیرهومن. 1384. کاربرد فن‌آوری زیست‌آنزیمی در صنایع خمیر و کاغذ. ویژه‌نامه مجله علمی پژوهشی. سال یازدهم. شماره (1).

11-Park, S. B.; Lee. J. M.; Eom. T. J. (2003). The control of sticky contaminant with enzymes in the recycling of wastepaper. *Ind. Eng. Chem.*, Vol. 10, No. 1, 72-77.

12- Verma, p., Bhardwaj, N.K., Chakraborti, S.K. (2010). "Enzymatic Upgradation of Secondary Fibers," Thapar Centre for industrial research and development, Paper Mill Campus, P.O. IPPTAJ. Vol.22, No. 4.

13- Wong, K. K. Y.; James, C. S. and Campion, S. H. (2000). "Xylanase pre- and post- treatments of bleached pulps decrease absorption coefficient," *J. Pulp Pap. Sci.*, 26, 377-383.

14- www.merck-chemicals.com