Archive of SID

نشریه علمی تحقیقات علوم چوب و کاغذ ایران
جلد ۳۵ شماره ۲، صفحه ۲۰۴-۱۹۵، (۱۳۹۹)

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22092/IJWPR.2020.341834.1600
شناسه دیجیتال (DOR): 98.1000/1735-0913.1399.35.195.71.2.1578.1610

# تأثیر توالی تیمار آنزیم سلولاز و پالایش بر ویژگی‌های خمیرکاغذ مخلوط کاغذباطله اداری

**محمدعلی حسین[۱]، محمد طلایی‌پور[۲*]، امیر هومن حمصی[۳]، بهزاد بازیار[۴] و سعید مهدوی فیض‌آبادی[۵]**

۱- دکتری، گروه تخصصی صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی و محیط‌زیست، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران

۲*- نویسنده مسئول، دانشیار، گروه تخصصی صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی و محیط‌زیست، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران، پست الکترونیک: m.talaeipoor@srbiau.ac.ir

۳- استاد، گروه تخصصی صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی و محیط‌زیست، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران

۴- دانشیار، گروه تخصصی صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی و محیط‌زیست، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران

۵- دانشیار، بخش تحقیقات علوم چوب و فراورده‌های آن، مؤسسه تحقیقات جنگلها و مراتع کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران

تاریخ دریافت: بهمن ۱۳۹۸ تاریخ پذیرش: اردیبهشت ۱۳۹۹

## چکیده

در این تحقیق، توالی تیمار آنزیم و بعد پالایش و اثرهای آن بر ویژگی‌های خمیرکاغذ باطله اداری مورد بررسی قرار گرفته است. پالایش خمیرکاغذ در دو سطح ۷۰۰ و ۱۵۰۰ دور توسط پالایشگر آزمایشگاهی PFI و تیمار آن با آنزیم سلولاز در درصد خشکی ۱۳ درصد و طی مدت زمان ۶۰ دقیقه انجام شد. اعمال تیمار آنزیمی باعث کاهش مقاومت‌های کاغذ و همچنین درجه‌روانی خمیرکاغذ گردید و اعمال پالایش بدون تیمار آنزیمی، باعث افزایش مقاومت‌ها شد. تیمار آنزیمی پیش از پالایش خمیرکاغذ، درجه‌روانی خمیرکاغذ را کاملاً تحت تأثیر قرار داد، به‌طوری‌که قبل از اعمال آنزیم، برای پالایش با ۷۰۰ و ۱۵۰۰ دور درجه‌روانی کانادایی خمیرکاغذ ۴۶۹ و ۳۹۰ میلی‌لیتر (CSF) اندازه‌گیری شد. درحالی‌که با پیش‌تیمار آنزیمی، این اعداد به‌ترتیب به ۳۹۷ و ۵۴۴ میلی‌لیتر (CSF) تغییر کردند. پس از پیش‌تیمار آنزیمی، افزایش درجه روانی با تعداد دور بیشتر پالایشگر، نشان‌دهنده تأثیر تیمار آنزیمی پیش از پالایش بوده است. به‌طورکلی، پالایش باعث افزایش مقاومت‌ها و بهبود ویژگی‌های کیفی خمیرکاغذ شده است، اما پالایش خمیرکاغذ پس از تیمار آنزیمی با توجه به اثرهای این پیش‌تیمار بر روی الیاف، باعث کاهش ویژگی‌های کیفی کاغذ و خمیرکاغذ در دورهای پالایش ثابت گردید. توالی تیمار آنزیمی و بعد پالایش، شاخص اریک را به‌عنوان یکی از اصلی‌ترین ویژگی‌های کیفی خمیرکاغذ باطله اداری افزایش داده است.

**واژه‌های کلیدی:** سلولاز، پالایش، خمیرکاغذ، کاغذ باطله اداری، مقاومت، شاخص اریک.

## مقدمه

رشد روزافزون جمعیت و پیشرفت فناوری، همگام با رشد مصرف و افزایش تقاضا برای کاغذ از یکسو و تخریب شدید جنگل‌های دنیا و مشکلات زیست‌محیطی از سوی دیگر، لزوم بررسی و به‌کارگیری روش‌های جدید و بهبود فرایندهای متداول را در صنعت خمیر و کاغذ آشکار می‌کند. پالایش فرایندی است که برای تغییر ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی خمیرکاغذ، از هر دو نوع نیروی مکانیکی و هیدرولیکی استفاده می‌کند. در طی فرایند پالایش الیاف تحت تأثیر چندین عامل قرار می‌گیرند که مهمترین نتیجه آن فیبریله‌شدن، تشکیل نرمه و کاهش میانگین طول الیاف است. فیبریله‌شدن خارجی شامل جداسازی فیبریل‌ها بر روی سطح الیاف بوده، درنتیجه سطح ویژه را افزایش می‌دهد.

www.SID.ir

Archive of SID


فیبریله‌شدن داخلی باعث جداسازی داخلی لایه‌های دیواره سلولی شده، بنابراین انعطاف‌پذیری الیاف را بهبود می‌بخشد (Torres *et al.*, 2006; Ny and Messmwer, 2007; Bhardwaj *et al.*, 2007; Talaiepoor, 2008). باوجوداین، در کنار اثرهای مثبت، ممکن است اثرهای نامناسبی نیز به‌وسیله پالایش ایجاد شود که از آن جمله، شکسته شدن و کوتاه شدن الیاف در اثر نیروی برشی است. همچنین در اثر پالایش، نرمه‌ها در الیاف خمیرکاغذ زیاد شده که منجر به کاهش میزان آبگیری از خمیرکاغذ و درنتیجه کاهش درجه روانی خمیرکاغذ می‌گردد. امروزه آنزیم‌ها در علم کاغذسازی گستره زیادی دارند و در قسمت‌های مختلفی استفاده می‌شوند. Quinde (۱۹۹۴) و چندین سال بعد، Bajpai (۲۰۱۰) بیان کردند که آنزیم‌ها در صنعت کاغذ برای پوست‌کنی چوب، کنترل قیر، خمیرسازی زیستی، رنگ‌بری زیستی، پالایش، جوهرزدایی، کنترل مواد چسبناک و تصفیه آب به‌کار می‌روند؛ اما در این میان تغییر در شرایط الیاف بازیافتی اصلی‌ترین موضوع مورد بررسی بوده است که محققان زیادی را درگیر خود کرده است (Ibarra *et al.*, 2012 Znidaršiè-Plazl *et al.*, 2009; Dourado *et al.*, 1999; Mayeli and Talaeipoor, 2010; Pala *et al.*, 2001; Dienes, 2006; Lee *et al.*, 2011; Dienes *et al.*, 2004). استفاده از آنزیم همگام با فرایند پالایش یکی از مهمترین کاربردهایی است که برای آنزیم در نظر گرفته شده است. از دیرباز محققان زیادی در این زمینه فعالیت داشته‌اند و امروزه نیز تحقیقات تکمیلی در این مورد انجام شده است. استفاده از آنزیم باعث ارتقاء آبگیری از خمیرکاغذ می‌شود و محققان زیادی مانند Loosvelt (۲۰۰۹)، Bajpai (۲۰۱۰)، Zhang و همکاران (۲۰۱۳)، Cui و همکاران (۲۰۱۵)، Torres و همکاران (۲۰۱۲)، Garcial و همکاران (۲۰۰۲)، Maximino و همکاران (۲۰۱۰)، Kim و همکاران (۲۰۰۶)، Eriksson (۱۹۹۸) و Gil و همکاران (۲۰۰۹) همگی تقریباً با ادبیات مشترکی در سال‌های مختلف به این نتیجه رسیده‌اند که تیمار آنزیمی درجه‌روانی خمیرکاغذ را کاهش می‌دهد و زمانی که خمیرکاغذهای تیمار شده با آنزیم با خمیرکاغذهای کنترل مقایسه می‌شوند زمان رسیدن به یک درجه‌روانی مشخص کاهش پیدا می‌کند. بیشتر محققان ازجمله Bajpai (۲۰۱۰) دلیل افزایش مقدار آبگیری را هیدرولیز نرمه‌ها می‌دانند و بر این عقیده هستند که در تیمار آنزیمی با هیدرولیز نرمه‌ها که سطح ویژه زیادی داشته و علاوه بر کاهش آبگیری، اثر منفی بر مقاومت‌ها دارند (Bajpai, 2010)، مقدار آبگیری و همچنین مقاومت‌ها افزایش پیدا می‌کند؛ اما از سویی با حضور آنزیم هم کوتاه شدن طول الیاف و هم فیبریلی شدن (Znidaršiè-Plazl *et al.*, 2009; Zhang *et al.*, 2013; Cuiet *et al.*, 2015) انجام می‌شود. در تحقیقاتی که انجام شده، زمانی که تیمار آنزیمی پیش از پالایش انجام شده، نتایج این‌طور نشان داده‌اند که بیشتر مقاومت‌های کاغذ افت پیدا کرده است. ازاین‌رو نویسندگان این مقاله بر آن شدند که به بررسی اثر توالی آنزیم و پالایش بر روی خمیرکاغذ متداول باطله اداری و بررسی ویژگی‌های خمیرکاغذ و کاغذ حاصل از آن بپردازند تا بدین‌وسیله اثربخشی پیش‌تیمار آنزیمی بر فرایند پالایش مورد بررسی قرار بگیرد. در صورت اثربخش بودن تیمار آنزیمی بر پالایش، یکی از مهمترین دستاوردهای این تحقیق می‌تواند کاهش انرژی پالایش و رسیدن به ویژگی‌های مشخصی از خمیرکاغذ و کاغذ در دورهای کمتر یا انرژی‌های کمتر پالایشگر باشد. با توجه به اهمیت انرژی در صنعت فرض بر این است که با استفاده از پیش‌تیمار آنزیمی می‌توان امکان کاهش انرژی پالایش را برای خمیرکاغذ حاصل از کاغذ باطله اداری فراهم کرد.

## مواد و روش‌ها

### انتخاب و تهیه ماده اولیه

کاغذ باطله اداری از شرکت کاغذسازی لطیف تهیه شد که شامل دو نوع اداری کاغذ (تهیه شده از فرایندهای شیمیایی) و کتاب درسی (کاغذهای تهیه شده از فرایندهای مکانیکی) بودند. در این تحقیق، کاغذ باطله اداری و کتاب با کاغذ مکانیکی به نسبت وزنی ۷۰ به ۳۰ مورد استفاده قرار گرفتند. عملیات خمیرسازی با پالپر آزمایشگاهی ساخت شرکت قومس با شرایط ثابت زیر انجام شد.

زمان خمیرسازی: ۳۰ دقیقه، درصد خشکی خمیرکاغذ: ۱۰ و دمای آب: ۴۰ درجه سانتی‌گراد.

www.SID.ir

Archive of SID


**تیمار آنزیمی**

تیمار آنزیمی در این تحقیق توسط آنزیم سلولاز تهیه شده از شرکت AB Enzymes و از نوع BIOTOUCH® C35 انجام شد. این آنزیم از باکتری تریکودرما ریسی تهیه شده و فعالیت اصلی آن حاصل از اندو-۱-۴-ß-D-گلوکاناز است. تیمار آنزیمی با شرایط زیر انجام شد: مقدار آنزیم به‌صورت ثابت و ۳۰U، دما ۶۰ درجه سانتی‌گراد، زمان ۶۰ دقیقه و درصد خشکی خمیرکاغذ ۱۳ درصد. pH خمیرکاغذ برای تیمار آنزیمی بر اساس دستورالعمل کاربرد آنزیم، ۵ تا ۶٫۵ بود که با استفاده از اسیدسولفوریک ۰٫۲۵ درصد برای تمام خمیرکاغذها به حدود ۵٫۸ رسید.

**پالایش**

در این تحقیق، پالایش خمیرکاغذ طبق استاندارد T 248 sp-00 با شرایط زیر انجام شد: فاصله تیغه پالایشگر مقدار ثابت ۰٫۲ میلی‌متر، وزن خمیرکاغذ ۳۰ گرم بر مبنای وزن خشک، درصد خشکی خمیرکاغذ ۱۰ درصد و تعداد دور پالایشگر در دو سطح ۷۰۰ و ۱۵۰۰. پالایش در مرکز تحقیقات البرز و توسط پالایشگر PFI انجام گردید.

**آزمون‌های خمیرکاغذ و کاغذ دست‌ساز**

پس از اعمال تیمارهای ذکرشده، خمیرهای کاغذ طبق استاندارد T208om-95، به کاغذهای دست‌ساز آزمایشگاهی ساخت شرکت قومس تبدیل شد و برای انجام آزمون بر اساس استاندارد T 205 sp-02 مشروط‌سازی و آماده شدند. آزمون‌های مختلف در هر مرحله بر اساس استاندارد Tappi و به‌شرح زیر انجام شد: درجه‌روانی خمیرکاغذ: T227 om-99، مقاومت به پاره‌شدن: T414om-04، مقاومت به کشش: T494 om-01، مقاومت به ترکیدگی: T403om-02، آزمون ماتی: T425om-06 و آزمون روشنی: T452om-08. آزمون ERIC بر اساس استاندارد ایزو به شماره ISO 22754:2008 انجام گردید.

**تجزیه‌وتحلیل آماری**

بررسی آماری تیمارهای پالایش و آنزیم با نرم‌افزار SPSS و بر اساس تحلیل واریانس یک‌طرفه (طرح کاملاً تصادفی) (ANOVA) انجام شد.

## نتایج

**پالایش**

در این قسمت به بررسی اثر پالایش بدون اشاره به اثرهای تیمار آنزیمی پرداخته شده است و نتایج نشان داد که اثر پالایش بر تمام پارامترهای کیفی خمیرکاغذ و کاغذ معنادار بوده است. ویژگی‌های خمیرکاغذ پالایش شده و کاغذهای دست‌ساز در دو دور ۷۰۰ و ۱۵۰۰ در جدول ۱ نشان داده شده است.

**جدول ۱- ویژگی‌های خمیرکاغذ و کاغذ پالایش شده در دو دور ۷۰۰ و ۱۵۰۰**

| دور پالایشگر (Rev) | درجه روشنی (درصد) | ماتی (درصد) | شاخص مقاومت به پاره‌شدن ($mN.m^2/g$) | شاخص مقاومت به کشش ($N.m/g$) | شاخص مقاومت به ترکیدگی ($kPa.m^2/g$) | ERIC (ppm) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| نمونه شاهد (بدون پالایش) | ۸۵/۰۹ | ۸۳/۸ | ۱۳/۲۴ | ۳۳/۹۳ | ۲/۰۸ | ۱۴۴۶ |
| تعداد دور پالایش ۷۰۰ | ۸۵/۱۲[a] | ۸۱/۸۵[a] | ۱۲/۷۹[a] | ۴۷/۵[a] | ۳/۲۲[a] | ۱۶۳۴[a] |
| تعداد دور پالایش ۱۵۰۰ | ۸۶/۰۸[a] | ۸۰/۶۹[a] | ۱۵/۲۵[b] | ۵۱/۵۷[b] | ۴/۲۵[b] | ۱۹۵۲[b] |

www.SID.ir

Archive of SID


**تیمار آنزیمی**

در جدول ۲ اثر تیمار آنزیمی بر ویژگی‌های خمیرکاغذ و کاغذ دست‌ساز نشان داده شده است.

**توالی آنزیم و پالایش**

جدول زیر برای بررسی تغییرات ایجاد شده در خمیرکاغذ در توالی آنزیم و پالایش ارائه شده است.

**جدول ۲- ویژگی‌های خمیرکاغذ و کاغذ پس از تیمار آنزیمی**

| | درجه روشنی (درصد) | ماتی (درصد) | شاخص مقاومت به پاره‌شدن ($mN.m^2/g$) | شاخص مقاومت به کشش ($N.m/g$) | شاخص مقاومت به ترکیدگی ($kPa.m^2/g$) | ERIC (ppm) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| نمونه شاهد | ۸۵/۰۹[a] | ۸۳/۸[a] | ۱۳/۲۴[a] | ۳۳/۹۳[a] | ۲/۰۸[a] | ۱۴۴۶[a] |
| تیمار آنزیمی | ۸۱[b] | ۸۳/۸[a] | ۷/۸[b] | ۳۲/۵[b] | ۱/۶[b] | ۱۵۹۹/۷[b] |
| درصد تغییرات | -۴/۸۱ | ۰/۰۰ | -۴۱/۰۹ | -۴/۲۱ | -۲۳/۰۸ | ۱۰/۶۳ |

**جدول ۳- ویژگی‌های خمیرکاغذ و کاغذ در توالی آنزیم و پالایش**

| | درجه روشنی (درصد) | ماتی (درصد) | شاخص مقاومت به پاره‌شدن ($mN.m^2/g$) | شاخص مقاومت به کشش ($N.m/g$) | شاخص مقاومت به ترکیدگی ($kPa.m^2/g$) | ERIC (ppm) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| نمونه شاهد | ۸۵/۰۹ | ۸۳/۸ | ۱۳/۲۴ | ۳۳/۹۳ | ۲/۰۸ | ۱۴۴۶ |
| تیمار آنزیمی | ۸۱ | ۸۳/۸ | ۷/۸ | ۳۲/۵ | ۱/۶ | ۱۵۹۹/۷ |
| ۷۰۰ دور پالایش | ۸۰/۴۰[a] | ۷۴/۱۰[a] | ۷/۲۰[a] | ۳۰/۵۰[a] | ۱/۰۰[a] | ۲۰۵۶/۹۰[a] |
| ۱۵۰۰ دور پالایش | ۷۷/۷[b] | ۷۱[b] | ۶/۳[b] | ۳۰/۲[a] | ۱/۱[b] | ۲۴۶۲/۷[b] |

**بحث**

پالایش پنج اثر اصلی بر الیاف دارد که هریک از این اثرها به‌نوبه خود ویژگی خاصی از خمیرکاغذ و کاغذ را تحت تأثیر خود قرار می‌دهند. کنده شدن دیواره اولیه، فیبریله‌شدن داخلی، فیبریله‌شدن خارجی، برش الیاف و تولید نرمه‌ها (Loosvelt, 2009; Bajpai, 2010; Zhang *et al.*, 2013; Cui *et al.*, 2015; Wong *et al.*, 2000). اعمال تیمار پالایش در هر دو دور ۷۰۰ و ۱۵۰۰ باعث کاهش درجه‌روانی خمیرکاغذ شده است و اختلاف آنها در سطح ۹۵٪ معنادار برآورد شده است (شکل ۱). این کاهش درجه‌روانی به دلیل فیبریله‌شدن داخلی و خارجی و ایجاد نرمه در خمیرکاغذ پس از پالایش می‌باشد. در جدول ۱، مشخص شده است که با پالایش، مقدار مقاومت به پاره‌شدن برای تعداد ۷۰۰ دور کاهش و برای تعداد ۱۵۰۰ دور افزایش داشته است. Wavell (۱۹۹۵) در بررسی خود بیان می‌کند که مقدار مقاومت به پاره‌شدن در ۱۵۰۰ دور پالایش به حداکثر مقاومت خود می‌رسد و پس‌ازآن تا ۸۰۰۰ دور به‌شدت کاهش پیدا می‌کند. این محقق دلیل این امر را افزایش ایجاد پیوند تا پالایش با

www.SID.ir

Archive of SID


دور مشخصی از پالایش می‌داند و بیان می‌دارد که پس‌ازآن کاهش طول الیاف اثری بیش از برقراری پیوند داشته و باعث کاهش این مقاومت می‌گردد؛ اما در مورد مقاومت‌هایی مانند کشش و ترکیدگی (Gao *et al.*, 2009; Wavell, 1995; Heydari *et al.*, 2013) بیان می‌کنند که پیوند بین الیاف اصلی‌ترین فاکتور در افزایش مقدار عددی این مقاومت‌هاست. ازاین‌رو می‌توان نتیجه گرفت که با اعمال تیمار پالایش، پیوند بین الیاف افزایش یافته و مقاومت به کشش به‌ترتیب برای ۷۰۰ و ۱۵۰۰ دور پالایش، ۴۰ درصد و ۵۲ درصد و همچنین برای مقاومت به ترکیدگی، ۵۵ درصد و ۱۰۴ درصد افزایش را نشان می‌دهند.

اثر پالایش بر ویژگی‌های نوری کاغذ نیز توسط محققان زیادی مورد بررسی قرار گرفته است. در واقع عقیده بر این است که در فرایند پالایش، روشنی تاحدودی افزایش پیدا می‌کند که دلیل آن را می‌توان حذف خاکستر و پرکننده از مجموعه الیاف دانست (Talaeipoor, 2008). یکی از ویژگی‌های مؤثر بر کاربرد انواع کاغذ، ماتی است. Xia (۲۰۱۱) بیان می‌کند که افزایش پالایش باعث کاهش مقدار ماتی و افزایش دانسیته کاغذ می‌گردد. ایشان دلیل بروز این ویژگی را ایجاد نرمه‌های بیشتر و "پیوندهای داخلی بیشتر و نزدیک‌تر" می‌داند و بیان می‌کند که با نشست بیشتر الیاف روی یکدیگر، الیاف به یکدیگر نزدیک‌تر خواهند شد (اشاره به پدیده نشست الیاف)، درنتیجه نور کمتری از ورقه کاغذ بازگشت داده می‌شود و نور تأبیده شده به کاغذ بیشتر از کاغذ عبور خواهد کرد. نتایج به‌دست آمده در این تحقیق با نتایج اعلام شده توسط این محقق مطابقت دارد.

ERIC ازجمله مشخصه‌هایی است که شاخص مهمی در برآورد سیستم‌هایی است که از کاغذ باطله به‌عنوان ماده اولیه استفاده می‌کنند. همان‌طور که مشخص است مقدار ERIC با افزایش پالایش روند صعودی پیدا کرده است. در مورد درجه روشنی خمیرکاغذ گفته شد که این مشخصه پس از پالایش به اندازه محدودی افزایش پیدا می‌کند که می‌تواند نتیجه حذف فیلر و خاکستر از خمیرکاغذ باشد، اما در فرایند پالایش علاوه بر حذف این موارد، خرد شدن ذرات جوهر نیز جزئی از این فرایند است؛ بنابراین کاهش اندازه ذرات جوهر بر شاخص ERIC اثرگذار بوده و نتیجه آن افزایش غلظت جوهر باقی‌مانده در کاغذ دست‌ساز می‌باشد (Lee, 2011).

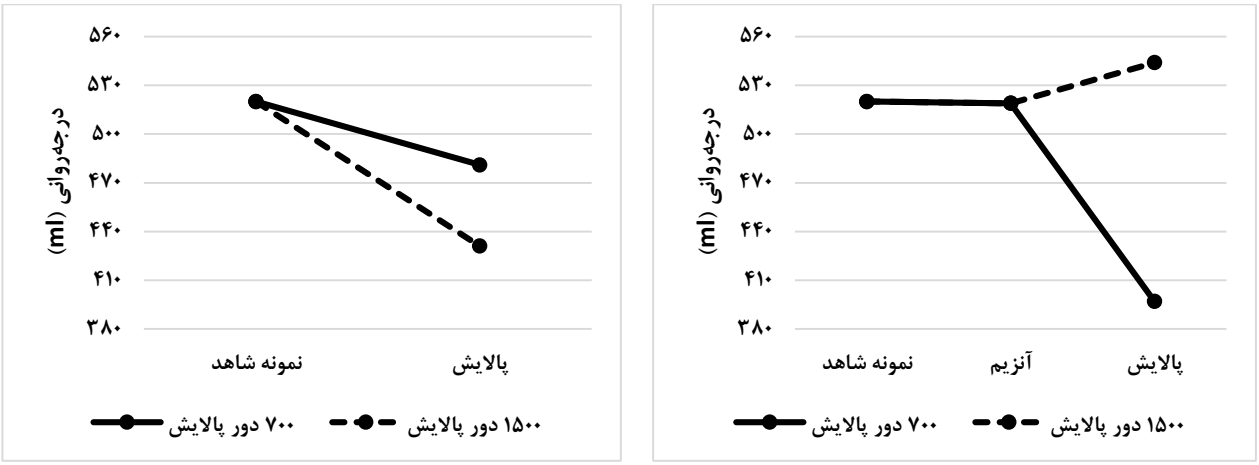
در مورد مقاومت به پاره‌شدن کاهش حدود ۴۰ درصد را می‌توان به اثرگذاری آنزیم بر الیاف مرتبط دانست. میانگین طول الیاف طی تیمار آنزیمی کاهش پیدا می‌کند (Zhang *et al.*, 2013; Znidarsie-Plazl *et al.*, 2009) که می‌تواند عامل اصلی کاهش مقاومت به پاره‌شدن باشد. در مورد مقاومت به کشش و مقاومت به ترکیدگی، محققان (Zhang, 2013; Gil *et al.*, 2009; Bajpai, 2010) بر این عقیده‌اند که مقدار این مقاومت‌ها نیز به میزان استفاده از آنزیم بستگی دارد. این مقدار استفاده در مقالات مختلف متفاوت است. مصرف کمتر آنزیم سلولاز باعث افزایش مقاومت به کشش و ترکیدگی می‌گردد اما با افزایش میزان مصرف، این مقاومت‌ها کاهش پیدا می‌کنند. این بیانات درواقع نشان‌دهنده این است که آنزیم سلولاز قادر به این است که فیبریله‌شدن خارجی انجام دهد، اما محققان بیان می‌کنند که در مقادیر بیشتر آنزیم، اثر هیدرولیز آنزیمی در خمیرکاغذ بیشتر نمود پیدا کرده و با تخریب بیشتر دیواره سلولی مقدار مقاومت به کشش و ترکیدگی کم می‌شود (Bajpai, 2010; Buzala, 2016). ویژگی‌های نوری کاغذ نیز در مرحله تیمار آنزیمی تحت تأثیر قرار می‌گیرند. هیدرولیز الیاف سلولزی که از آن جمله می‌توان به هیدرولیز نواحی اشاره کرد که جوهر به آن نواحی اتصال دارد نیز می‌تواند هم باعث انفصال ذرات جوهر از روی الیاف (Kim *et al.*, 1991; Lee *et al.*, 2011) و هم باعث کوچک‌تر شدن این ذرات شود. این جوهرها در سوسپانسیون الیاف پراکنده می‌شوند. نتیجه پراکندگی جوهر در کاغذ، کاهش در درجه روشنی کاغذ می‌باشد. ازآنجایی‌که شاخص ERIC به میزان غلظت جوهر در کاغذ بستگی دارد، این پراکندگی ذرات جوهر باعث افزایش سطح ویژه جوهر و درنتیجه افزایش این شاخص می‌شود.

مقدار درجه‌روانی پس از تیمار آنزیمی از حدود ۵۲۰ به ۵۱۹ کاهش پیدا کرده است (شکل ۱) که کاهش قابل‌توجهی نیست اما شاید بتوان این‌طور بیان کرد که اعمال تیمار آنزیمی با اثر هیدرولیز سطح الیاف باعث لایه‌لایه شدن دیواره الیاف و

www.SID.ir

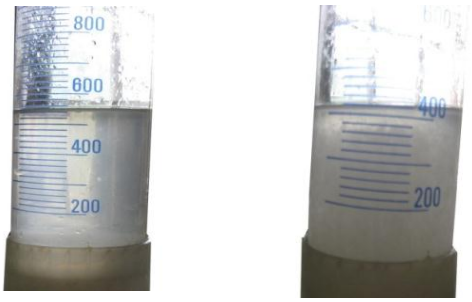
Archive of SID


فیبریله‌شدن الیاف شده و قدرت نگهداری آب را در الیاف افزایش داده و یا به‌عبارتی درجه‌روانی خمیرکاغذ را کاهش داده است.




شکل ۱- اثر پالایش بر درجه‌روانی خمیرکاغذ (چپ)، اثر تیمار آنزیمی و پالایش بر درجه‌روانی خمیرکاغذ (راست)

با اعمال پالایش بعد از تیمار آنزیمی، نتایج متفاوتی برای پالایش با دورهای ۷۰۰ و ۱۵۰۰ به‌دست آمد، به‌طوری‌که مقدار درجه‌روانی برای ۷۰۰ دور پالایش از ۵۱۸ به مقدار ۳۹۷ میلی‌لیتر (CSF) کاهش پیدا کرده است. این‌طور به نظر می‌رسد که استفاده از تیمار آنزیمی پیش از پالایش باعث تخریب دیواره سلولی شده و الیاف مستعد شکست بیشتر و آمادگی لازم برای تخریب شدن است و شیب تند کاهش درجه‌روانی نیز مؤید این گفته می‌باشد. به‌عبارت بهتر در پالایش با دور ۷۰۰ بدون تیمار آنزیمی، کاهش ۷٫۵ درصد درجه‌روانی اتفاق افتاده، اما پس از تیمار آنزیمی کاهش ۲۳/۵ درصد درجه‌روانی مشاهده می‌شود. نکته جالب توجه این است که در ۱۵۰۰ دور پالایش با وجود اینکه انتظار می‌رفت طبق روال معمول درجه‌روانی کاهش بیشتری پیدا کند، این شاخص افزایش پیدا کرده است. برای توضیح این پدیده می‌توان به شکل ۲ مراجعه کرد. در اندازه‌گیری درجه‌روانی برای خمیرکاغذی که با ۱۵۰۰ دور پالایش شده بود، مقدار زیادی نرمه در آب خارج شده از زیر توری دستگاه مشاهده می‌شود. عبور این مقدار نرمه از توری دستگاه اندازه‌گیری درجه‌روانی، نشان‌دهنده خرد شدن الیاف و تولید بیش‌ازحد نرمه‌ها می‌باشد.

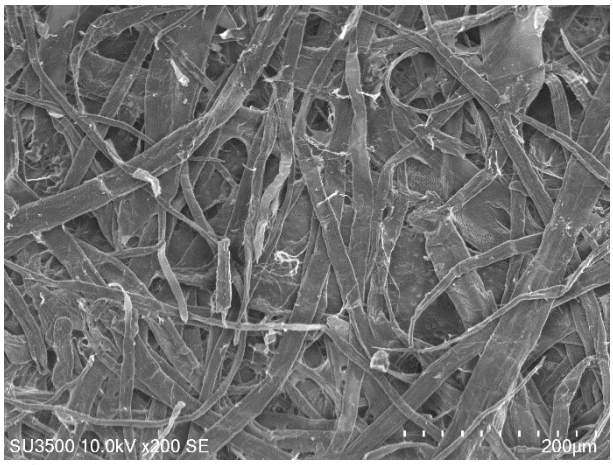



شکل ۲- سمت راست: در آب نرمه زیادی وجود دارد که مربوط است به خمیرکاغذ پالایش شده با دور پالایش ۱۵۰۰ و با پیش‌تیمار آنزیمی. سمت چپ: در آب نرمه کمی وجود دارد که مربوط است که به خمیرکاغذ پالایش شده با دور ۱۵۰۰ و بدون پیش‌تیمار آنزیمی.

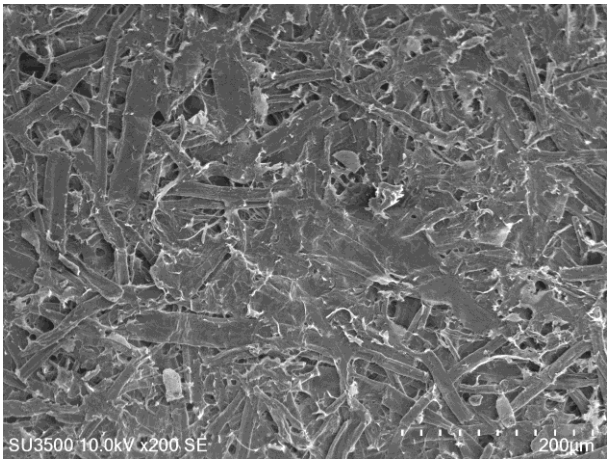
www.SID.ir

Archive of SID

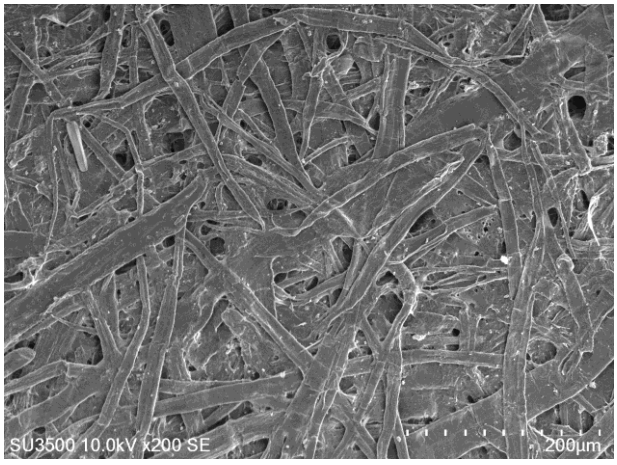

هنگامی‌که تیمار آنزیمی با پالایش همراه می‌شود، تمامی پدیده‌ها ازجمله کوتاه شدن طول الیاف، هیدرولیز سطح الیاف، تجزیه نرمه‌ها و نواری شدن الیاف (Bajpai, 2010) تشدید شده و اثر معکوس آن در نتایج مقاومتی و نوری کاغذ حاصل دیده می‌شود. برای مشاهده تخریب انجام شده در ساختار کاغذ می‌توان به شکل ۴ که در تصویر میکروسکوپ روبشی توالی تیمارهای آنزیمی و پالایش نشان داده شده است، مراجعه کرد.




**شکل ۳- تصویر SEM با بزرگنمایی ۲۰۰ از الیاف کاغذ باطله بدون تیمار آنزیمی و پالایش**




**شکل ۴- تصویر SEM با بزرگنمایی ۲۰۰ از الیاف کاغذ باطله پس از تیمار آنزیمی و پالایش**




**شکل ۵- تصویر SEM با بزرگنمایی ۲۰۰ از الیاف کاغذ باطله پس از تیمار آنزیمی**

همان‌طور که در بخش پالایش به آن پرداخته شد، پالایش همیشه باعث افزایش مقاومت به کشش و ترکیدگی می‌شود و اشاره شد که دورهای پالایش ۷۰۰ و ۱۵۰۰ به‌ترتیب باعث افزایش ۴۰ درصد و ۵۲ درصد در افزایش مقاومت به کشش و همچنین ۵۰ درصد و حدود ۱۰۰ درصد در افزایش مقاومت به ترکیدگی شده‌اند؛ اما هنگامی‌که پالایش پس از تیمار آنزیمی انجام می‌شود به دلیل تشدید اثربخشی، می‌تواند اثرهای معکوسی داشته باشد که شکل ۴ کاملاً نشان‌دهنده آن می‌باشد. در تعداد دور پالایش ۷۰۰ و ۱۵۰۰ بدون پیش‌تیمار آنزیمی، مقاومت به کشش ۴۷/۵ و ۵۱/۵۷ (N.m/g)

www.SID.ir

Archive of SID


اندازه‌گیری شده است. درصورتی‌که این اعداد در فرایند پالایش با پیش‌تیمار آنزیمی به ۳۰,۵ و ۳۰,۲ تقلیل پیداکرده‌اند؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که پیش‌تیمار آنزیمی شرایط را برای پالایش مهیا می‌کند و الیاف ضربه‌پذیری مناسب‌تری در فرایند پالایش پیدا می‌کنند و می‌توان گفت که با اعمال پیش‌تیمار آنزیمی در این توالی، نیازی به دورهای ۷۰۰ و ۱۵۰۰ برای رسیدن به اعداد ۴۷,۵ و ۵۱,۵۷ نیست و قطعاً با تعداد کمتری از دور پالایش به این اعداد خواهیم رسید و این روند نه‌تنها برای مقاومت به کشش بلکه تقریباً برای تمام پارامترهای کیفی قابل استناد است.

در مرحله تیمار آنزیمی، هیدرولیز الیاف سلولز در نواحی اتصال الیاف به جوهر باعث انفصال ذرات جوهر از روی الیاف شده (Kim *et al.*, 1991; Lee *et al.*, 2011) و نتیجه آن کاهش در درجه روشنی می‌باشد. در همراهی پالایش با تیمار آنزیمی در دو دور ۷۰۰ و ۱۵۰۰ رفتار متفاوتی ایجاد شده است. در ۷۰۰ دور پالایش مقدار درجه روشنی تغییر قابل‌توجهی نداشته است اما در پالایش ۱۵۰۰ دور، درجه روشنی کاهش پیدا کرده است و نتایج تحلیل آماری نیز معناداری را نشان می‌دهد. بنابراین به نظر می‌رسد با استفاده از تیمار پالایش پس از تیمار آنزیمی انفصال ذرات جوهر از روی الیاف بیشتر انجام شده و نتیجه آن کاهش درجه روشنی به‌ویژه در پالایش با دور ۱۵۰۰ می‌باشد. ازاین‌رو تحقیقات زیادی در این زمینه انجام شده و می‌توان گفت که قریب به‌اتفاق این تحقیقات با نتایج این تحقیق مشابه هستند (Lee, 2011).

اثر پیش‌تیمار آنزیمی در شاخص ERIC از نظر آماری در سطح ۹۵٪ معنادار بوده است. به‌نحوی‌که دور پالایش ۷۰۰ و ۱۵۰۰ با پیش‌تیمار آنزیمی به‌ترتیب باعث افزایش ۴۲ درصد و ۷۰ درصد در این شاخص شدند، درحالی‌که همین دورهای پالایش بدون پیش‌تیمار آنزیمی تنها ۱۳ درصد و ۳۵ درصدERIC را افزایش دادند. افزایش شاخص ERIC را می‌توان به خرد شدن و پراکنده شدن ذرات جوهر در خمیرکاغذ ارتباط داد. ازاین‌رو افزایش این شاخص می‌تواند در فرایند جوهرزدایی اثرهای مثبتی داشته باشد و بازدهی فرایند شناورسازی را با توجه به کوچک‌تر کردن ابعاد ذرات جوهر تحت تأثیر قرار دهد.

## نتیجه‌گیری

این تحقیق نشان داد که فارغ از توالی انجام شده، تیمار آنزیمی باعث کاهش مقاومت‌ها و خواص نوری کاغذ و درجه روانی خمیرکاغذ شد اما شاخص اریک افزایش پیدا کرد.

اینکه پالایش قبل از تیمار آنزیمی یا بعدازآن انجام شود، نتایج بسیار متفاوتی را ایجاد می‌نماید. اعمال تیمار پالایش بدون پیش‌تیمار آنزیمی، باعث افزایش مقاومت‌ها، بهبود ویژگی‌های نوری و افزایش شاخص ERIC در کاغذ و کاهش درجه روانی خمیرکاغذ شد؛ اما پالایش با پیش‌تیمار آنزیمی بعکس باعث کاهش مقاومت‌ها گردید. درجه روانی خمیرکاغذ روندی غیرمعمول را نشان داد و شاخص اریک با شیب تندتری افزایش پیدا کرد.

اینکه با تغییر محل پالایش (قبل از تیمار آنزیمی و یا بعدازآن) نتایجی تا این حد متفاوت ایجاد می‌شود می‌تواند به دلیل معنادار بودن اثر تیمار آنزیمی بر الیاف سلولزی باشد. به‌این‌ترتیب و با اتکا به نتایج به‌دست‌آمده، نویسندگان این تحقیق بر این عقیده‌اند که می‌توان با اعمال تیمار آنزیمی پیش از پالایش، در تعداد دورهای بسیار کمتری از ۷۰۰ و ۱۵۰۰ به همان نتایج مطلوب دست پیدا کرد، ازاین‌رو لازم به نظر می‌رسد که در تحقیقات آینده برای رسیدن به ویژگی مشخصی از خمیرکاغذ، نسبت به تغییر دورهای پالایشگر اقدام کرد تا بهترین شرایط پالایش با پیش‌تیمار آنزیمی به‌دست بیاید.

## منابع مورد استفاده

-Bhardwaj, N.K., Hoang, V. and Nguyen, K.L., 2007. Effect of Refining on Pulp Surface Charge Accessible to Polydadmac and FTIR Characteristic Bands of High Yield Kraft Fibers, Bioresource Technology 98:962–966.

-Bajpai, P. K. (2010). "Solving the Problems of Recycled Fiber Processing with Enzymes," Bioresources 5(2), 1311-1325.

-Buzała, P., Kalinowska, H. and Derkowska, M., 2016. "Effect of Cellulases and Xylanases on Refining Process and Kraft Pulp Properties,"PLOS ONE,

www.SID.ir

Archive of SID


Properties of Old Newspaper Deinked Pulp," BioResources 5(4), 2520-2534.
-Maximino, M.G., Taleb, M.C., Adell, A.M. and Formento, J.C., 2011. "Application of Hydrolitic Enzymes and Refining on Recycled Fibers," Cellulose Chem. Technol. 45 (5-6), 397-403.
-Ny, C.L. and Messmer, M., 2007. "Potential of Refining and Dispersing to Develop Recycled Fibre Properties," Pulp and Paper Canada 38, 108:2.
-Pala, H., Lemos, M.A., Mota, M. and Gama, F.M., 2001. "Enzymatic upgrade of old paperboard containers," Enzyme and Microbial Technology 29 (2001) 274–279.
-Pala, H., Mota, M. and Gama, F.M., 2001. "Refining and Enzymatic Treatment of Secondary Fibers for Paperboard Production: Cyber flex Measurements of Fiber Flexibility," COST E20 – Wood Fiber Cell Wall Structure.
-Quinde, A., 1994. "Enzymes in the Pulp and Paper Industry: A Review," A Quinde Pulping Consulting Inc.
-Talaeipoor, M., 2008. "Chemical Deinked Pulp Refining on Optical and Mechanical Properties of Paper," Iranian Wood and Paper Research Journal Vol. 24, No. 1, 148-157.
-Talaeipoor, M. and Imani, R., 2008. "Effect of Debonding Agent and Refining on the Properties of Deinked Pulp," Tappi Journal 12-14.
-Torres, C. E., Negro, C., Fuente, E. and Blanco, A., 2012. "Enzymatic Approaches in Paper Industry for Pulp Refining and Biofilm Control," Appl Microbiol Biotechnol. 96: 327–344.
-Wavell, F.C., 1995. "Explaining Hand-Sheet Tensile and Tear In Terms of Fiber-Quality Numbers," Tappi Journal, 78 (1), 101-106.
-Wong, K.Y., Richardson, J.D. and Mansfield, S.D., 2000. "Enzymatic Treatment of Mechanical Pulp Fibers for Improving Papermaking Properties," Biotechnol. Prog. 16: 1025-1029.
-Xia, X. and Gong, H., 2011. "Effects of Refining on the Fiber Properties of Poplar APMP." J. Chem. Chem. Eng. 5, 20-24.
-Znidarsie-Plazl, P., Rutar, V. and Ravnjak, D., 2009. "The Effect of Enzymatic Treatments of Pulps on Fiber and Paper Properties," Chem. Biochem. Eng. 23 (4) 497–506.
-Zhang, Z. J., Chen, Y. Z., Hu, H. R. and Sang, Y.Z., 2013. "The Beatability –aiding Effect of Aspergillus niger Crude Cellulase on Bleache Simao Pine Kraft Pulp and its Mechanism of Action," Bioresources 8(4), 5861-5870.
DOI:10.1371.
-Cui, L., Meddeb-Mouelhia, F., Laframboise, F. and Beauregard, M., 2015. "Effect of Commercial Cellulases and Refining on Kraft Pulp Properties: Correlations Between Treatment Impacts and Enzymatic Activity Components," Carbohydrate Polymers 115: 193–199.
-Dourado, F., Mota M., Pala, H. and Gama, F.M., 1999 "Effect of cellulose adsorption on the surface and interfacial properties of cellulose," Cellulose 6: 265–282
-Dienes, D., 2006. "Effect of cellulase enzymes on secondary fiber properties," Ph.D. thesis, Budapest University of Technology and Economics Department of Agricultural Chemical Technology.
-Eriksson, K. E. L., 1998. "Biotechnology in the Pulp and Paper Industry:An Overview," American Chemical Society, Chapter 1.
-Gao, Y., Huang, F., Rajbhandari, V., Li, K. and Zhou, Y., 2009. "Effect of Separate Refining and Co-refining of BCTMP/KP on Paper Properties," PULP & PAPER CANADA, 28-33.
-Garcia1, O. Torres, A.L., Colom, J.F., Pastor, F.I. J., Díaz, P. and Vidal, T., 2002. "Effect of Cellulase-Assisted Refining on the Properties of Dried andNever-Dried Eucalyptus Pulp," Cellulose. 9: 115–125, 2002.
-Gil, N., Gil, C., Amaral, M. E., Costa, A.P. and Duarte, A.P., 2009. "Use of Enzymes to Improve the Refining of a Bleached Eucalyptus GlobulusKraft Pulp," Biochemical Engineering Journal 46: 89–95.
-Heydari, S., Ghasemian, A. and Afra, E., 2013. "Effects of Refining and Cationic Polyacrylamide on Strength Properties of Paper Made from Old Corrugated Container (OCC)," World of Sciences Journal, 2013-Apri l-Special Issue, 1-8.
-Ibarra, D., Monte, M. C., Blanco, A., Martinez, A.T. and Martinez, M.J., 2012. "Enzymatic deinking of secondary fibers: cellulases/hemicellulases versus laccase-mediator system," J. Ind. Microbial Biotechnol, 39: 1-9.
-Kim, H.J., Jo, B.M. and Lee, S.H., 2006. "Potential for Energy Saving in Refining of Cellulase-Treated Kraft Pulp," J. Ind. Eng. Chem. Vol. 12, No. 4, 578-583.
-Loosvelt, I., 2009. "Modifying the Quality of Fiber with Enzymes," Paper Age 20-22.
-Lee, C.K., Ibrahim, D., Ibrahim, C.O. and Wan Rosli, W., 2011. "Enzymatic and Chemical Deinking of Mixed Office Waste Pper and Old Newspaper: Paper Quality and Effluent Characteristics," Bioresources, 6(4), 3859-3875.
-Mayeli, N. and Talaeipour, M., 2010. "Effect of different HLB Value and Enzymatic Treatment on the

www.SID.ir

Archive of SID


# The effect of Enzymatic treatment and Refining Sequence on the Properties of Pulp Produced from Mixed Office Waste Paper

**M.A. Hossein [1], M. Talaeipour [2]*, A.H. Hemmasi [3], B. Bazyar [4] and S. Mahdavi Feyz-abadi [5]**

1-Ph.D., Department of Wood and Paper Science, Faculty of Natural Resources and Environment, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
2*-Corresponding author, Associate Prof., Department of Wood and Paper Science, Faculty of Natural Resources and Environment, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran, Email: m.talaeipoor@srbiau.ac.ir
3-Prof., Department of Wood and Paper Science, Faculty of Natural Resources and Environment, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
4- Associate Prof., Department of Wood and Paper Science, Faculty of Natural Resources and Environment, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
5-Associate Prof., Wood & Forest Products Division, Research Institute of Forests and Rangelands, Agriculture Research Education and Extension Organization, Tehran, Iran

Received: Feb., 2020 Accepted: May, 2020

**Abstract**

The effect of applying the sequence of enzymatic treatment and refining on the properties of deinked pulp from mixed office waste (MOW) is investigaed. Refining was applied for 700 and 1500 revolutions with PFI mill beater. Enzymatic treatment was applied for 60 minutes at the temperature of 60°C and 13% consistency. Applying enzymatic treatment led to decrease the strength properties of pulp and also decreased the freeness . The refining process resulted in increase the pulp properties. By applying enzymatic treatment before refining, the freeness of pulp changed significantly so that, the freeness of the pulp reached 496 and 390 for 700 and 1500 refining revolution respectively just for refining but these numbers changed to 397 and 544 for same revolutions for "enzymatic treatment + refining" sequence. Enzymatic pre-treatment led to increase in freeness of pulp with higher refining revolution. This means that the enzymatic treatment was effective. Generally, refining itself improved the quality of pulp, but refining with enzymatic pre-treatment, led to decrease in quality parameters of pulp in the same refining revolutions. Refining with enzymatic pre-treatment increased ERIC as one of the effective parameters of waste paper pulp.

**Keywords:** Cellulase, refining, pulp, ERIC, MOW, strength.

www.SID.ir