

## تأثیر تکرار دفعات بازیافت بر خواص فیزیکی و مکانیکی خمیر کاغذهای CMP و NSSC

فهیمه میرزازاد<sup>۱</sup>، محمد آزادفلاح<sup>۲\*</sup> و یحیی همزه<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> کارشناس ارشد علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، ایران  
<sup>۲</sup> استادیار، گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، ایران  
<sup>۳</sup> دانشیار، گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۸۹/۱۲/۸، تاریخ تصویب: ۱۳۹۰/۸/۱)

### چکیده

در این تحقیق اثر تکرار دفعات بازیافت بر ویژگی‌های فیزیکی خمیر کاغذهای لیگنین‌دار سولفیت خنثی نیمه شیمیایی (NSSC) و خمیر کاغذ شیمیایی-مکانیکی (CMP) ارزیابی شد. به این منظور خمیر کاغذهای مورد نظر بدون انجام پالایش بیشتر و با حفظ نرمه سه بار تحت فرآیند بازیافت قرار گرفتند. نتایج نشان داد که برخی از خواص هر دو خمیر کاغذ نظیر مقاومت به کشش، جذب انرژی کششی، مقاومت به ترک‌شدن، مقاومت فشاری و دانسیته ظاهری با افزایش دفعات بازیافت کاهش می‌یابند که این امر به دلیل استخوانی شدن، کاهش انعطاف‌پذیری و کاهش واکشیدگی الیاف است که منجر به کاهش پیوندهای بین لیفی می‌گردد. با وجود این از خواص نوری اندازه‌گیری شده، ماتی و ضریب پخش نور کاغذهای تهیه شده از خمیر CMP و NSSC با بازیافت روند افزایشی داشته است. به‌علاوه، زبری سطح، سفتی خمشی و نفوذپذیری در برابر هوا در اثر بازیافت روند افزایشی داشته‌اند. بطور کلی نتایج تحقیق نشان می‌دهد رفتار خمیر کاغذهای CMP و NSSC در طی بازیافت مشابه رفتار خمیر کاغذهای شیمیایی می‌باشد.

**واژه‌های کلیدی:** بازیافت، خمیر کاغذ نیمه شیمیایی سولفیت خنثی، خمیر کاغذ شیمیایی-مکانیکی، خواص فیزیکی

## مقدمه

در طول دهه‌های گذشته، مساله بازیافت به طور فزاینده‌ای مبدل به مهمترین بخش از صنعت خمیر و کاغذ گشته است. فواید اقتصادی و نگرانی‌های زیست محیطی مانند تمایل به کاهش دفن سطحی پسماندها و کاهش برداشت از درختان به منظور تولید کاغذهای جدید، موجب تقویت این مساله شده است.

علی‌رغم گرایش شدید کشورهای پیشرفته به سوی صنعت بازیافت در قرن حاضر و پیشرفت‌های زیاد این صنعت در دهه‌های اخیر، معمولاً الیاف بازیافتی به دلیل اینکه حداقل یکبار مسیر تولید را گذرانده‌اند، خواص مقاومتی متفاوتی در مقایسه با الیاف بکر دارند (Hern, 1975; Wistara & Young, 1999; Nazhad, 2005).

در این زمینه مطالعات نشان می‌دهد که رفتار خمیر کاغذهای مکانیکی با خمیر کاغذهای شیمیایی متفاوت است. در مورد خمیر کاغذهای شیمیایی (کم بازده) نظیر کرافت و سولفیت، نظر مشترکی وجود دارد و آن کاهش پتانسیل پیوندیابی با بازیافت است. این کاهش خصوصیات ذاتی الیاف از قبیل قابلیت پیوندیابی، انعطاف‌پذیری و پتانسیل واکنشیدگی به سخت شدن غیرقابل برگشت یا استخوانی شدن الیاف که در طی خشک شدن ایجاد می‌گردد، نسبت داده می‌شود (Howard & Bichard, 1992; Valade *et al.*, 1994). در مقایسه با خمیر کاغذهای شیمیایی، میزان استخوانی شدن خمیر کاغذهای مکانیکی و پربازده، احتمالاً به علت وجود ژل لیگنوهیمی سلولزی در دیواره الیاف که مانع از تماس مستقیم بین سطوح سلولزی در طی خشک کردن می‌شود، کم می‌باشد (Sudarsan, 1996).

تأثیر بازیافت مجدد کاغذ بر روی ویژگی‌های آن موضوعی است که سال‌های متمادی توجه محققین را به خود معطوف کرده است و در این راستا مطالعات فراوانی در دهه‌های گذشته صورت پذیرفته است. در واقع قابلیت رقابت الیاف حاصل از کاغذهای باطله در برابر الیاف بکر خود مسأله انکارناپذیری است. در این راستا به اجمال به برخی از مهمترین تحقیقات صورت گرفته اشاره می‌شود.

آثار فرآیند بازیافت بر روی ویژگی‌های کاغذسازی از خمیر کاغذ مکانیکی و پربازده بررسی شده و مشخص شده است که خشک شدن الیاف در این نوع خمیر کاغذها در اولین مرحله تولید کاغذ، بیشترین تغییرات را در خواص الیاف ایجاد می‌نماید و اکثر این تغییرات تا حد زیادی برگشت ناپذیرند. اما

خشک شدن‌های مجدد بعدی (از دست دادن آب تا آخرین حد ممکن) تغییرات چندانی را در خواص الیاف ایجاد نمی‌کند. در این بین افت ظرفیت جذب آب و پتانسیل ایجاد اتصالات الیاف به وضوح مشاهده شده است (Kevin *et al.*, 1996).

با بررسی خواص فیزیکی و شیمیایی خمیر کاغذهای بازیافتی بعد از یک دوره تیمار شیمیایی مشخص شده است که مقاومت کششی، مقاومت به ترکیدن، دانسیته ظاهری، مقدار گروه‌های کربوکسیل و مقدار ماندگاری آب با بازیافت کاهش می‌یابد. به علاوه گزارش شده است که تیمارهای شیمیایی، قابلیت برقراری پیوند را در خمیر کاغذهای بازیافتی افزایش نمی‌دهند (Wistara *et al.*, 1999).

در بررسی مقاومت پیوند بین لیفی خمیر کاغذهای کرافت یکبار خشک شده پهن‌برگان، عمده‌ترین دلیل کاهش مقاومت، کاهش مقاومت پیوند بین لیفی و کاهش اندکی در سطوح پیوندهای بین لیفی ذکر شده است (Gurnagul, 2001).

تغییرات در خواص مقاومتی الیاف با بازیافت شدیداً به خصوصیات مورفولوژیکی الیاف بستگی دارد. در این رابطه Takauki (2002) اظهار کرد که خمیر کاغذ کرافت در نتیجه بازیافت دستخوش تغییرات مورفولوژیکی از قبیل دلمه‌شدگی و ترک در دیواره الیاف می‌گردد. وی با اندازه‌گیری حجم منافذ دیواره سلولی الیاف دریافت که در نتیجه بازیافت، حجم منافذ کاهش می‌یابد. همچنین نتایج نشان داد که الیاف بازیافتی آبدوستی بسیار کمتری نسبت به الیاف بکر دارند، وی دلیل این مسئله را غیرفعال شدن سطح الیاف (استخوانی شدن) بیان کرد.

تأثیر خشک کردن و تیمار شیمیایی با هیدروکسید سدیم و اتیلن‌آمین بر پتانسیل بازیافت خمیر کاغذ باگاس توسط Sheikhi *et al.* (2010) مورد ارزیابی قرار گرفته و نشان داده شده است که طول پارگی، شاخص ترکیدن، تعداد دفعات تاشدگی و دانسیته ظاهری بطور پیوسته با بازیافت کاهش می‌یابد. اما خواص نوری در خمیرهای تیمار شده، در نتیجه بازیافت افزایش نشان می‌دهد. این پژوهشگران همچنین مورفولوژی الیاف بازیافتی را با میکروسکوپ الکترونی پویشی (SEM)<sup>1</sup> مورد مطالعه قرار دادند و مشاهده کردند که خمیرهای تیمار شده، الیاف تاب خورده‌تری<sup>2</sup> دارند و این مسئله را یکی از دلایل کاهش مقاومت الیاف در طی بازیافت ذکر کردند. آنها همچنین دریافتند که تیمار شیمیایی تأثیر

<sup>1</sup> Scanning Electron Microscope

<sup>2</sup> Curled fiber

ساخته شد بنام بازیافت صفر نام گرفت. تعدادی از این ورقه‌ها جهت آزمون‌های کاغذ انتخاب شدند و باقی ورقه‌ها برای انجام بازیافت، دوباره به خمیرکاغذ تبدیل شدند. برای این منظور کاغذهای دست‌ساز به مدت حداقل ۸ ساعت در آب خیس‌انده شدند. سپس مطابق استاندارد SCAN-C 18:65 توسط دستگاه پراکنده‌ساز<sup>۲</sup> آزمایشگاهی با ۳۰۰۰ دور در دقیقه الیاف از هم جدا گردیدند، و مجدداً از سوسپانسیون الیاف، کاغذ دست‌ساز تهیه گردید. این روند تا ۳ بار بازیافت برای هر نوع خمیرکاغذ ادامه یافت و خمیرکاغذهای حاصل به ترتیب بازیافت یک، دو و سه نامیده شد.

کاغذهای دست‌ساز قبل از انجام آزمایشات، در رطوبت نسبی ۵۰٪ و درجه حرارت  $2 \pm 23^{\circ}\text{C}$  حداقل به مدت ۴۸ ساعت در شرایط مشروط‌سازی قرار گرفتند. پس از آن آزمون‌های فیزیکی پس از هر بار بازیافت، به شرح زیرطبق دستورالعمل‌های آیین‌نامه‌های ISO، SCAN، TAPPI انجام و نتایج حاصل ثبت گردید.

- دانسیته ظاهری کاغذ T 411 om-97
- ضخامت کاغذ T 411 om-97
- مقاومت به ترکیدن T 403 om-02
- زبری سطح ورقه کاغذ SCAN P-21
- قابلیت عبور هوا SCAN P-60
- مقاومت فشاری فاصله کوتاه SCAN P-46
- مقاومت به کشش SCAN P-67
- ماتی و ضریب پخش نور به ترتیب طبق ISO 2471 و ISO 2470

### نتایج

نتایج اندازه‌گیری شده برای برخی از ویژگی‌های فیزیکی کاغذهای تهیه شده از خمیرکاغذهای NSSC و CMP به ترتیب در جدول‌های ۲ و ۳ و شکل‌های (۱ تا ۷) خلاصه شده‌اند.

ماتی و ضریب پخش نور کاغذهای تهیه شده از خمیرکاغذهای CMP و NSSC طی سه دوره توالی بازیافت اندازه‌گیری شد که نتایج آن به ترتیب در جدول‌های ۲ و ۳ نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد، ماتی و ضریب پخش نور طی تکرار فرآیند بازیافت روند افزایشی دارند. همچنین بر اساس اندازه‌گیری‌های انجام شده، دانسیته ظاهری خمیرکاغذهای CMP و NSSC در اثر بازیافت، کاهش

مثبتی بر میزان جذب آب الیاف بازیافتی نداشت.

پتانسیل بازیافت الیاف خمیرکاغذهای چوب جوان و بالغ صنوبر دلتوئیدس توسط Hashemi *et al.* (2010) بررسی و نتایج بدست آمده نشان داد که خواص مقاومتی خمیرکاغذها در طی پنج مرحله بازیافت، روند کاهشی دارد و این روند کاهشی در چوب جوان نسبت به چوب بالغ شدیدتر است. همچنین مشاهده شد که افت خواص مقاومتی در کاغذهای با عدد کاپای کمتر از شدت کمتری برخوردار بود. ایشان علت این امر را ناشی از تاثیر لیگنین بر جذب آب و تورم الیاف می‌دانند.

با توجه به این موضوع که قسمت عمده‌ای از کاغذهای تولید داخل، از انواع خمیرکاغذهای شیمیایی-مکانیکی و نیمه شیمیایی می‌باشد، و از سوی دیگر منابع اطلاعاتی و داده‌های علمی جامع کمی در زمینه خمیرکاغذهای مکانیکی نظیر NSSC و CMP در طی بازیافت، وجود دارد، امکان پیش‌بینی ویژگی‌های کاغذ حاصل از این نوع خمیرکاغذها در اثر بازیافت دشوار است. لذا با بررسی تأثیر مستقیم بازیافت بر ویژگی‌های خمیرکاغذهای منتخب داخلی NSSC و CMP و شناخت علل تغییرات رخ داده، می‌توان راهکارهایی را برای به حداقل رساندن اثرات نامطلوب بازیافت ارائه داد.

### مواد و روش‌ها

#### - تهیه نمونه خمیر کاغذ

خمیر کاغذهای CMP و NSSC مورد نیاز این تحقیق با ویژگی‌های اولیه ارائه شده در جدول ۱ از کارخانه چوب و کاغذ مازندران تهیه گردید و تا رسیدن به درصد خشکی حدود ۲۰٪ آبیگری و به آزمایشگاه منتقل گردید.

#### - فرایند بازیافت

برای شبیه‌سازی فرایند بازیافت ابتدا از خمیرکاغذهای مورد نظر بدون انجام فرآیند پالایش تعداد ۶۰ ورق کاغذ دست‌ساز تهیه شد. ساخت کاغذ دست‌ساز مطابق با استاندارد SCAN C M5:67<sup>۱</sup> و با استفاده از دستگاه ورق‌ساز KCL انجام گرفت. در این تحقیق وزن پایه کاغذ  $60 \text{ g/m}^2$  در نظر گرفته شد و عمل پرس کردن طبق استاندارد SCAN C26:79 طی مدت زمان ۲۴۰ ثانیه و اعمال فشار  $5 \pm 0.2 \text{ kgf/cm}^2$  انجام شد. نهایتاً ورقه‌های دست‌ساز با خشک‌کن استوانه‌ای در دمای  $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$  خشک گردید. ورقه دست‌ساز که در مرحله اول

<sup>2</sup> Disintegrator

<sup>1</sup> Scandinavian Standard for Pulp and Paper industry

همچنین نفوذپذیری در برابر هوا و زبری سطح در خمیرکاغذهای CMP و NSSC در طی تکرار چرخه بازیافت روند افزایشی دارد (شکل‌های ۴ و ۵).

سفتی خمشی متناسب با مدول الاستیسیته و توان سوم ضخامت کاغذ می‌باشد. سفتی خمشی کاغذهای تهیه شده از خمیرهای مربوطه طی سه دوره توالی بازیافت اندازه‌گیری شد (شکل ۶). نتایج نشان داد که سفتی خمشی در طی تکرار چرخه‌های بازیافت افزایش می‌یابد.

بررسی همزمان نتایج اندازه‌گیری ضریب پراکندگی نور و شاخص مقاومت به کشش اطلاعات با ارزشی برای توجیه رفتار خمیرکاغذها و روند تغییرات مربوط در حین بازیافت ارائه می‌کند (شکل ۷).

و ضخامت آنها افزایش یافت. نیروی لازم برای پاره‌کردن یک نوار باریک کاغذ هنگامی که طول نوار و سرعت بارگذاری هر دو به دقت مشخص شده‌اند مقاومت کششی نامیده می‌شود. مقاومت به کشش و جذب انرژی کشش در کاغذهای تهیه شده از خمیرکاغذهای CMP و NSSC، مطابق با جدول‌های ۲ و ۳ و شکل ۱ با بازیافت کاهش یافت.

در شکل‌های ۲ و ۳ اثر تکرار چرخه بازیافت بر مقاومت در برابر ترکیدن و مقاومت فشاری خمیرکاغذهای CMP و NSSC نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود، مقاومت در برابر ترکیدن و مقاومت فشاری در خمیرکاغذهای مورد نظر با بازیافت کاهش می‌یابد.

جدول ۱- مشخصات خمیرکاغذ مورد استفاده

نوع خمیرکاغذ	درجه روانی (ml, CSF)	بازده خمیرکاغذ (%)	pH	انبوهه <sup>۱</sup> الیاف (%)
CMP	۴۸۰	۸۳	۵/۱	۰/۰۳
NSSC	۵۳۰	۷۷	۶/۱	۱/۳

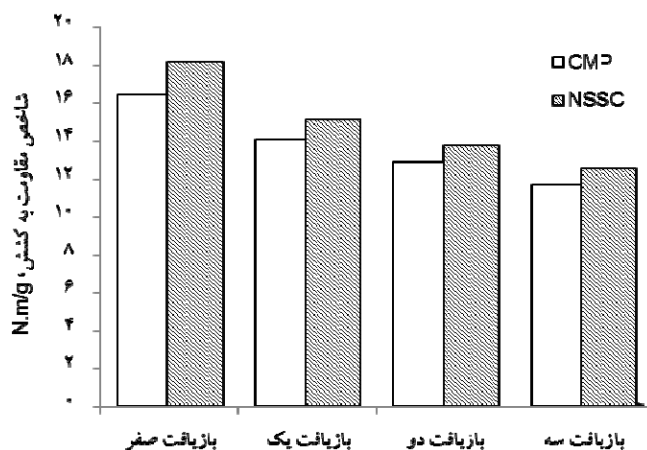
جدول ۲- ویژگی‌های فیزیکی اندازه‌گیری شده در خمیرکاغذ CMP

توالی بازیافت	ماتی (%)	ضریب پراکندگی نور (m <sup>2</sup> /Kg)	ضخامت (mm)	دانسیتته ظاهری (g/cm <sup>3</sup> )	جذب انرژی کشش (J/m <sup>2</sup> )
بازیافت صفر	۹۵/۴۷	۲/۳۹	۰/۱۸۱	۰/۳۴۷	۱۱/۸۶
بازیافت یک	۹۷/۲۱	۳/۵۵	۰/۲۱۴	۰/۲۹۳	۹/۰۳
بازیافت دو	۹۸/۴۵	۴/۰۳	۰/۲۲۷	۰/۲۸۸	۷/۰۲
بازیافت سه	۹۹/۲۹	۴/۲۳	۰/۲۲۸	۰/۲۸۶	۶/۱۳

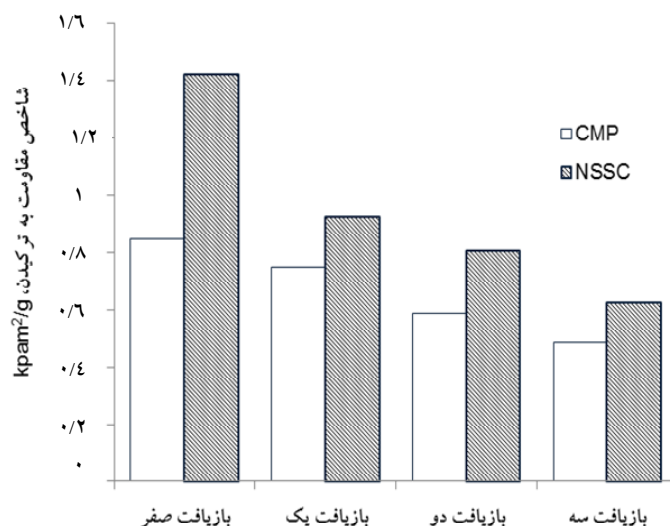
جدول ۳- ویژگی‌های فیزیکی اندازه‌گیری شده در خمیرکاغذ NSSC

توالی بازیافت	ماتی (%)	ضریب پراکندگی نور (m <sup>2</sup> /Kg)	ضخامت (mm)	دانسیتته ظاهری (g/cm <sup>3</sup> )	جذب انرژی کشش (J/m <sup>2</sup> )
بازیافت صفر	۹۷/۳۶	۲/۵۳	۰/۱۶۳	۰/۴۰۱	۱۸/۱۹
بازیافت یک	۹۸/۲۳	۳/۱۸	۰/۱۸۸	۰/۳۴۱	۹/۰۰
بازیافت دو	۹۸/۸۳	۳/۵۴	۰/۲۰۴	۰/۳۳۳	۷/۳۶
بازیافت سه	۹۹/۳۶	۳/۸۸	۰/۲۱۶	۰/۲۹۹	۵/۴۷

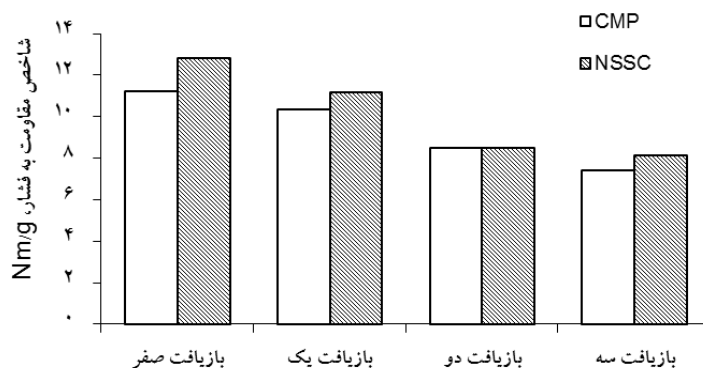
<sup>۱</sup>: Shive



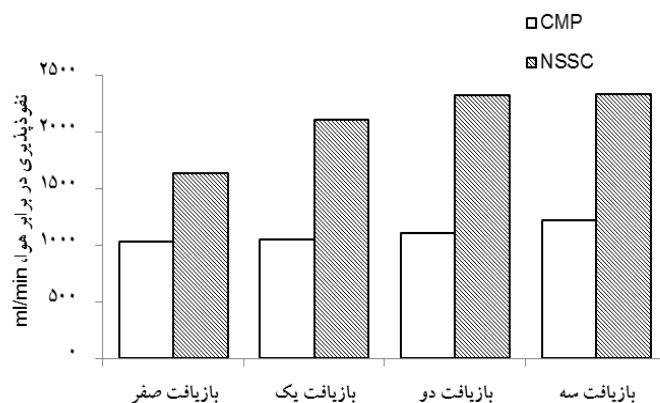
شکل ۱- تغییرات شاخص کشش خمیر کاغذهای CMP و NSSC در اثر تکرار چرخه بازیافت



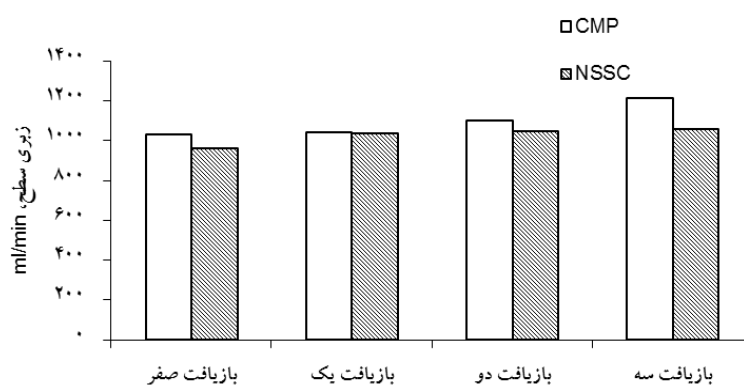
شکل ۲- تغییرات شاخص ترکیدن خمیر کاغذهای CMP و NSSC در اثر تکرار چرخه بازیافت



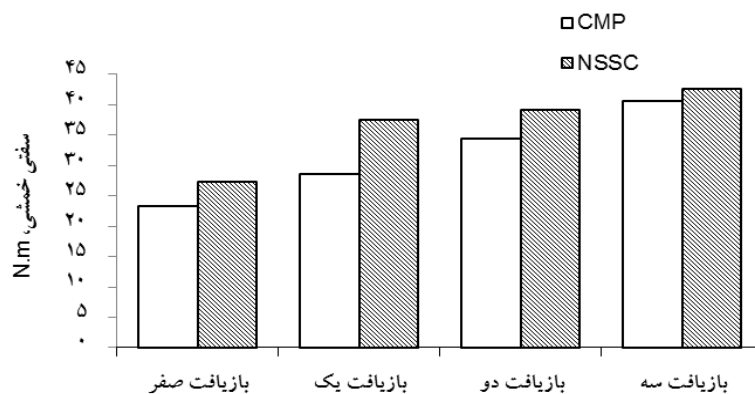
شکل ۳- تغییرات مقاومت فشاری خمیر کاغذهای CMP و NSSC در اثر تکرار چرخه بازیافت



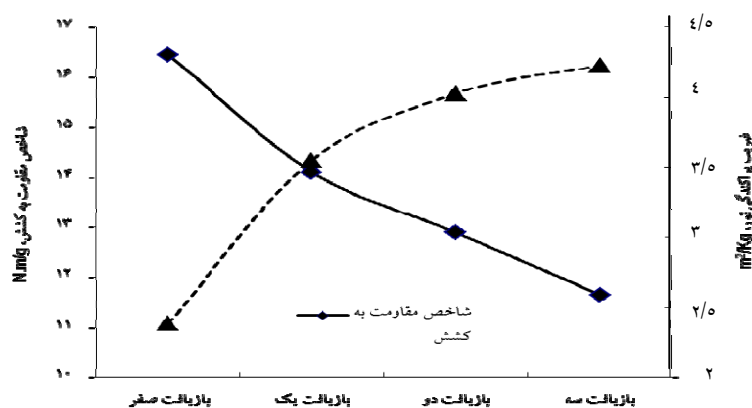
شکل ۴- تغییرات نفوذپذیری در برابر هوا در خمیر کاغذهای CMP و NSSC در اثر تکرار چرخه بازیافت



شکل ۵- تغییرات زبری سطح خمیر کاغذهای CMP و NSSC در اثر تکرار چرخه بازیافت



شکل ۶- تغییرات سفتی خمشی خمیر کاغذهای CMP و NSSC در اثر تکرار چرخه بازیافت



شکل ۷- ارتباط بین شاخص مقاومت به کشش و ضریب پراکندگی نور خمیر کاغذ CMP در اثر تکرار چرخه بازیافت

در نتیجه الیاف خوب با یکدیگر پیوند برقرار نکرده و ضخامت کاغذ افزایش پیدا می‌کند.

#### دانسیتته ظاهری

دانسیتته کاغذ یکی از ویژگی‌های غیرمقاومتی است که بیانگر درجه فشردگی شبکه الیاف می‌باشد و مشخص می‌نماید که تا چه اندازه‌ای الیاف مجاور در تماس نزدیکی با هم قرار دارند. کاهش در دانسیته الیاف با بازیافت به معنی افزایش در حجم حفرات هوا در ساختارشان به دلیل کاهش سطح پیوندیابی بین الیاف می‌باشد که ناشی از افزایش استخوانی شدن و سفتی الیاف است. البته در اکثر مشاهدات، چرخه دوم و سوم بازیافت تفاوت قابل توجهی ندارند. بدین مفهوم که افزایش تعداد دفعات بازیافت تا توالی سوم بازیافت در این خمیر کاغذها تفاوت چندانی در دانسیته ظاهری ایجاد نمی‌کند.

در طی مطالعات بر روی تاثیر بازیافت بر خواص الیاف مشخص شده است که در نتیجه بازیافت، دانسیته الیاف به دلیل کاهش پیوندیابی بین الیاف، کاهش می‌یابد (Young & Wistara, 1999; Gurnagul, 2001; Sheikhi et al., 2010). همچنین کاهش دانسیته در طی بازیافت را ناشی از کاهش انعطاف‌پذیری و سفت‌تر شدن بیان نموده‌اند (Brancato et al., 2007).

#### بحث و نتیجه‌گیری

##### خواص نوری ماتی

ماتی یک خاصیت مهم کاغذهای چاپ، اوراق بهادار و تحریر می‌باشد. افزایش ماتی خمیر کاغذهای مربوطه با بازیافت، ناشی از افزایش ضریب پراکندگی نور الیاف در اثر بازیافت است. با کاهش اتصالات بین الیاف سطح تماس<sup>۱</sup> نوری کاهش یافته، نور به جای اینکه هنگام خروج از فیبر اول وارد فیبر دیگر شود، وارد هوا شده، لذا در اثر کاهش تماس نوری مقدار ماتی افزایش می‌یابد.

##### ضریب پخش نور

این ضریب وابسته به درجه تخلخل کاغذ و میزان اتصال الیاف به یکدیگر است. اما بیشتر مرتبط با سطح نسبی پیوند<sup>۲</sup> بین الیاف می‌باشد. از این رو به عنوان معیاری از درجه پیوندهای بین لیفی است. افزایش ضریب پراکندگی نور در طی بازیافت، نشان دهنده کاهش قابلیت اتصال الیاف با بازیافت می‌باشد (جدول ۱ و ۲).

#### ویژگی‌های فیزیکی

##### ضخامت

در نتیجه تکرار چرخه بازیافت، ضخامت ورقه‌های حاصل از خمیر کاغذهای CMP و NSSC افزایش می‌یابد (جدول ۳ و ۲). کاغذهای حاصله در طی هر مرحله بازیافت، مسیر تولید را گذرانده‌اند و خشک شده‌اند و در پی خشک شدن‌های متوالی خاصیت انعطاف‌پذیری خود را تا اندازه‌ای از دست می‌دهند و

<sup>۱</sup> Optical Contact

<sup>۲</sup> Relative Bonded Area

### مقاومت به کشش

مقاومت به کشش شاخصی از دوام پتانسیل کششی کاغذ می‌باشد که در اثر نوع مصرف تحت تنش کششی قرار می‌گیرد. مهمترین فاکتور موثر بر مقاومت به کشش کاغذ، مقدار و کیفیت اتصال الیاف به یکدیگر می‌باشد. روند کاهش شاخص مقاومت به کشش با افزایش دفعات بازیافت در خمیر کاغذهای مربوطه کاملاً<sup>۱</sup> مشخص است (شکل ۱). این به دلیل افزایش سفتی و در نتیجه کاهش انعطاف‌پذیری، کمتر شدن قابلیت پیوندیابی بین لیفی الیاف است که در نتیجه استخوانی شدن الیاف رخ می‌دهد. همچنین مشاهده رابطه عکس بین شاخص کشش و ضریب پراکندگی نور در خمیر کاغذهای مربوطه دلیل دیگری بر اثبات این امر می‌باشد (شکل ۷). این نتایج مشابه یافته‌های سایر تحقیقات قبلی در این زمینه است (Bovin *et al.*, 1973; Hern, 1975; Howard & Bichard, 1992; Klofta & Miler, 1994; Gurnagul, 2001).

### مقاومت به ترکیدن

شاخص مقاومت در برابر ترکیدن فاکتور بسیار مهمی است که ابتدا به میزان اتصال بین الیاف و سپس به طول الیاف و مقاومت خود الیاف بستگی دارد. اولین نتیجه قابل مشاهده روند کاهش شاخص مقاومت به ترکیدن با افزایش دفعات بازیافت در هر دو خمیر کاغذ CMP و NSSC است (شکل ۲). علت این امر ناشی از استخوانی شدن و کاهش تورم‌پذیری الیاف است که منجر به کاهش پیوندهای بین لیفی می‌گردد. به عبارتی کاهش انعطاف‌پذیری و قابلیت پیونددهی الیاف منجر به کاهش در هم‌رفتگی الیاف می‌شود. هرچه الیاف نازک‌تر یا انعطاف‌پذیرتر باشند به دلیل ایجاد اتصالات هیدروژنی بیشتر، پیوند بین الیاف افزایش یافته و در نتیجه مقاومت کاغذ در برابر ترکیدن افزایش می‌یابد. این نتایج، مشابه نتایج تحقیقات سایر محققین (Bovin *et al.*, 1973; Hern, 1975; Howard & Bichard, 1992; Klofta & Miler, 1994; Jin Kim *et al.*, 2010; Gurnagul, 2001) است.

### جذب انرژی کششی (TEA)<sup>۱</sup>

جذب انرژی کششی سطح زیر منحنی تنش-کرنش (پهنا/نیرو در برابر کرنش) بوده و معیاری از انرژی کل است که پیش از تخریب کاغذ، قابل جذب می‌باشد. با توجه به کاهش شاخص مقاومت به کشش و در واقع کاهش سطح زیر منحنی تنش - کرنش در کاغذهای بازیافتی در تمام چرخه‌ها، کاهش جذب انرژی کششی قابل انتظار است. به عبارتی نتایج نشان

می‌دهد که افزایش تعداد دفعات بازیافت خمیر کاغذ منجر به تولید کاغذهایی خواهد شد که در سطح انرژی پائین‌تری دستخوش شکست می‌شوند.

### مقاومت فشاری

دلیل شکست کاغذ تحت فشار، فروپاشی جداره الیاف است. لذا مقاومت فشاری تقریباً به طول الیاف حساسیتی ندارد. فروپاشی بیشتر الیاف در جریان بازیافت، احتمالاً علت کاهش متناظر مقاومت فشاری در کاغذهای حاصله باشد.

### زبری سطح<sup>۲</sup>

زبری نشان‌دهنده سطح ناصاف است. الیاف بلندتر و زبرتر سطح زبرتری تولید می‌کنند. کاهش دانسیته ظاهری و قابلیت تراکم‌پذیری الیاف در سطح کاغذ در اثر بازیافت، منجر به افزایش زبری سطح می‌گردد. بیشترین افت مقاومت در خمیر کاغذ NSSC در اولین سیکل بازیافت رخ می‌دهد. اما در مورد خمیر کاغذ CMP بیشترین میزان افزایش در میزان زبری سطح کاغذ در سیکل سوم بازیافت رخ می‌دهد و این روند افزایشی در هر مرحله سیکل بازیافت شدت بیشتری می‌یابد.

### نفوذپذیری در برابر هوا<sup>۳</sup>

کاغذ ساختار متخلخلی دارد که متشکل از الیاف، هوا و آب می‌باشد. در طی فرایند بازیافت، نفوذپذیری در برابر هوا در خمیر کاغذهای CMP و NSSC افزایش می‌یابد (شکل ۴). این مطلب تأیید دیگری در کاهش قابلیت اتصال بین الیاف در نتیجه بازیافت است به طوری که ساختار بازتری در ورق ایجاد شده و مقاومت در برابر عبور هوا کاهش می‌یابد.

### سفتی خمشی<sup>۴</sup>

سفتی خمشی متناسب با مدول الاستیسیته و توان سوم ضخامت می‌باشد. افزایش در سفتی خمشی ناشی از افزایش در ضخامت (کاهش دانسیته) ورقه می‌باشد که به علت کاهش در انعطاف‌پذیری، غیرفعال شدن سطح الیاف و نهایتاً کاهش عوامل اتصال الیاف رخ می‌دهد.

با توجه به این که خمیر کاغذهای مورد آزمایش، خمیر کاغذ نیمه‌شیمیایی سولفیت خنثی و خمیر شیمیایی- مکانیکی است و با توجه به فرآیند ساخت آنها انتظار می‌رفت که رفتار خمیر کاغذ CMP، بیشتر مشابه رفتار خمیر کاغذهای مکانیکی نظیر CTMP و TMP باشد. اما نتایج حاصل نشان داد که خمیر کاغذ CMP تقریباً رفتاری شبیه خمیر کاغذهای شیمیایی

<sup>2</sup> Roughness

<sup>3</sup> Air Permeability

<sup>4</sup> Bending Stiffness

<sup>1</sup> Tensile Energy Adsorption



### سیاسگزاری

این پژوهش با حمایت مالی معاونت پژوهشی دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران و با مساعدت دکتر موسی محمد نژاد در موسسه فناوری آسیا (AIT) به انجام رسیده است.

در اثر بازیافت از خود نشان می‌دهد. همچنین نتایج نشان داد که خمیر کاغذ NSSC به عنوان نماینده‌ای از کاغذهای نیمه‌شیمیایی در جریان بازیافت نیز رفتاری مشابه با رفتار خمیرهای شیمیایی دارد.

### References

- Bovin, A. Hartler, N. and Teder, A. 1973. Changes in pulp quality due to repeated papermaking. Paper Technology. 14(5): 261-264.
- Brancato, A. Walsh, F.L. Sabo, R. and Banergee, S. 2007. Effect of recycling on the properties of paper surfaces. Industrial & Engineering Chemistry Research. 46(26): 9103-9106.
- Gurnagul, N. Ju, S. and Page, D.H. 2001. Fiber-fiber bond strength of once dried pulp. Journal of Pulp and Paper Science. 27(3): 88-91.
- Hashemi, M. 2010. Recycling potential of chemical pulp fibers from juvenile wood and mature wood of Poplar Deltoides. M.Sc. thesis. University of Tehran. 80 pp.
- Hern, E. L. 1975. Effect of recycling on properties of waste paper. TAPPI Journal. 68(7): 236-242.
- Howard, R., and Bichard, W. 1992. The basic effects of recycling on pulp properties. Journal of Pulp and Paper Science. 18(4): 151-159.
- Jin Quan, W.Y. and Wanga, Q. 2010. Effects of hemicellulose removal on cellulose fiber structure and recycling characteristics of eucalyptus pulp. Bioresource Technology. 101: 4577-4583.
- Kewin, L. Jacques, L. Jinying, V. 1996. Effect of recycling on papermaking and high yield pulps. TAPPI Journal. 79(3): 167-172.
- Klofta, J. L. and Miler, M., 1994. Effect of deinking on the recycle potential of papermaking fiber. Pulp Paper Canada. 95(8): 41-49.
- Nazhad, M.M. 2005. Recycled fiber quality. Journal of Industrial and Engineering Chemistry. 11(3): 314-329.
- Sheikhi, P. Talaeipour, M. Hemasi, A. Eslam, H. Gumuskaya, E. 2010. Effect of drying and chemical treatment of Bagasse soda pulp properties during recycling. Bioresource. 5(3): 1702-1716 .
- Sudarsan, C.N. 1996. Recycling of thermomechanical pulps. M.S. thesis. New York University. 88 pp.
- Takayuki, O. 2002. The effect of recycling on pulp and paper properties. Japan TAPPI Journal. 56(7): 986-992.
- Valade, J. L. Law, K. N. Peng, Y. X. 1994. Changes in TMP on recycling. Progress in Paper Recycling. 3(2): 60-67.
- Wistara, N. Young, R. A. 1999. Properties and treatments of pulps from recycled paper .part I. Physical and chemical properties of pulps. Cellulose. 6(4): 291-324.

## Effects of Recycling Periods on Physical and Mechanical Properties of CMP and NSSC Pulps

F. Mirzazad<sup>1</sup>, M. Azadfallah<sup>2\*</sup> and Y. Hamzeh<sup>3</sup>

<sup>1</sup> M.Sc., Department of Wood and Paper Science and Technology, Natural Resources Faculty, University of Tehran, I.R. Iran

<sup>2</sup> Assistant Professor, Department of Wood and Paper Science and Technology, Natural Resources Faculty, University of Tehran, I.R. Iran

<sup>3</sup> Associate Professor, Department of Wood and Paper Science and Technology, Natural Resources Faculty, University of Tehran, I.R. Iran

(Received: 27 February 2009, Accepted: 22 November 2011)

### Abstract

The effect of recycling on physical properties of lignin rich chemimechanical pulp (CMP) and neutral sulfite semi-chemical (NSSC) pulp was evaluated. The pulps were exposed to recycling treatment for three times without any further refining and the fines were conserved. The results indicated that some physical properties like tensile strength, tensile energy adsorption (TEA), burst strength, apparent density and compression strength were decreased by recycling due to hornification followed by loss in fiber flexibility and swelling which give rise to interfiber bonding loss. However the opacity and light scattering coefficient presented gain through recycling. Besides, the bending stiffness, air permeability and roughness increased due to recycling. The observations generally indicated that the CMP and NSSC pulps behavior under recycling is much similar to that of chemical pulp rather than mechanical pulps.

**Keywords:** Recycling, NSSC, CMP, Physical properties