



تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۱/۱۴

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۴/۱۳

ص ۱۱۱-۱۱۹

## مقایسه تأثیر نانوفناوری لایه‌به‌لایه و پالایش بر ویژگی‌های خمیر و کاغذ حاصل از الیاف بازیافتی

- ❖ **حمیدرضا رودی\***؛ استادیار گروه مهندسی فناوری تولید سلولز و کاغذ، دانشکده مهندسی انرژی و فناوری‌های نوین، دانشگاه شهید بهشتی، زیراب، ایران
- ❖ **یحیی همزه\***؛ استاد گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران
- ❖ **اعظم برهانی\***؛ دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

### چکیده

در این تحقیق، به منظور تشکیل چندلایه پلیمری (PEM) با نانوفناوری لایه‌به‌لایه (LbL)، الیاف بازیافتی (OCC) با لایه‌نشانی یک‌درمیان نشاسته کاتیونی (CS) و نشاسته آنیونی (AS) هر لایه به مدت ۱۰ دقیقه در pH خنثی تیمار شدند. برای مقایسه با تیمار مکانیکی پالایش، خمیر با کوبنده والی با ۲۵ دقیقه تا درجه روانی حدود ۲۹۱ میلی‌لیتر (CSF) پالایش شد. از هر دو نوع خمیر پالایش شده و تیمار شده کاغذهای دستی با وزن پایه ( $60 \text{ g/m}^2$ ) تهیه و ویژگی‌های آنها مقایسه شد. نتایج نشان داد که با تشکیل چندلایه، بار سطح الیاف در پتانسیل زتای مثبت و منفی بیشتری نسبت به پالایش اتفاق می‌افتد و این امر امکان جذب الکترواستاتیک ذراتی همچون نشاسته کاتیونی را افزایش می‌دهد. با پالایش خمیر OCC تا درجه روانی ۲۹۱ میلی‌لیتر (CSF)، دانسیته کاغذ  $0.0545 \text{ g/cm}^3$  بر سانتی‌متر مکعب، اندیس مقاومت به کشش آن  $37/92 \text{ N.m/g}$  و مقاومت خمشی  $12/2 \text{ mN}$  اندازه‌گیری شد. در حالی که در سیستم‌های چندلایه CS/AS، مقاومت‌ها بدون افزایش چشمگیر دانسیته، بیشتر شد. در سیستم چندلایه CS/AS و در لایه هفتم، دانسیته کاغذ  $0.0445 \text{ g/cm}^3$ ، مقاومت کششی  $33/51 \text{ N.m/g}$  و مقاومت خمشی  $21/4 \text{ mN}$  اندازه‌گیری شد. با افزودن نمک کلرید سدیم  $0.001$  مولار (هدایت الکتریکی  $140 \mu\text{S/cm}$ ) به سیستم چندلایه CS/AS، این مقادیر به ترتیب  $0.0472 \text{ g/cm}^3$ ،  $36/65 \text{ N.m/g}$  و  $25/6 \text{ mN}$  اندازه‌گیری شد. این نتایج نشان می‌دهد که سیستم‌های چندلایه‌ها (CS/AS PEMs) به لحاظ بهبود مقاومت‌ها، قابل مقایسه و رقابت با تیمار مکانیکی پالایش است.

واژگان کلیدی: الیاف بازیافتی، پالایش، چندلایه‌های پلیمری، مقاومت خمشی، نشاسته کاتیونی و آنیونی.

## مقدمه

در حوضه فناوری نانو است که می‌توان با کمک آن مقدار بیشتری از پلیمرها را بر روی سطح الیاف نشاناند [۷]. هدف اصلی روش لایه‌به‌لایه، تشکیل چندلایه پلیمری<sup>۳</sup>، اصلاح ویژگی‌های سطح الیاف، افزایش جذب ذرات پلیمری و توسعه پیوند بین الیاف است. از این رو این تحقیق با هدف بررسی تأثیر تیمار الیاف بازیافتی با روش لایه‌به‌لایه با استفاده از جفت زیست پلیمر نشاسته کاتیونی و نشاسته آنیونی بر ویژگی‌های خمیر و کاغذ و مقایسه آن با عملیات مکانیکی پالایش انجام گرفت.

## مواد و روش‌ها

در این تحقیق از کارتن‌های کنگره‌ای کهنه یا OCC<sup>۴</sup> استفاده شد. ابتدا قسمت‌های زاید جدا شد و سپس کاغذها با دست در اندازه‌های تقریبی ۲/۵×۲/۵ سانتی متری خرد شد. سپس براساس آیین‌نامه C 25:76-SCAN، خیساندن آن در آب شهری<sup>۵</sup> دست‌کم به مدت ۲۴ ساعت با میانگین هدایت الکتریکی ۲۲۵  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ، جداسازی الیاف با کوبنده والی<sup>۶</sup>، غربال کردن آن با الک مسطح<sup>۷</sup> به منظور حذف ضایعات موجود در خمیر و دسته‌بندی الیاف با دستگاه کلاسه‌بندی الیاف<sup>۸</sup> انجام گرفت. الیاف پشت غربال ۲۰۰ مش<sup>۹</sup> (خمیر بدون نرمة‌های الیاف) برای ادامه آزمایش‌ها به کار گرفته شد. از دستگاه کوبنده والی نیز برای پالایش خمیر به منظور رسیدن به درجه روانی حدود ۲۹۱ میلی‌لیتر (CSF)<sup>۱۰</sup> در مدت زمان ۲۵ دقیقه استفاده شد. مقدار نرمة‌های الیاف در این خمیر ۱۵/۰۵ درصد اندازه‌گیری شد.

امروزه بازیافت کاغذهای باطله راهکاری مناسب برای مصرف ضایعات کاغذی و به‌عنوان یک منبع غنی الیاف سلولزی در جهت کاهش فشار بر جنگل‌ها، توسعه فراوانی پیدا کرده است. رقابت زیادی برای استفاده از الیاف بازیافتی برای تولید کاغذهای بسته‌بندی<sup>۱</sup> وجود دارد. علی‌رغم تلاش‌های گسترده به‌منظور استفاده از الیاف بازیافتی برای تولید انواع کاغذ بسته‌بندی، نیاز مصرف‌کننده و بازار به برخی از ویژگی‌ها در این نوع کاغذها هنوز برآورده نشده است [۱]. از این رو زمانی که صحبت از الیاف بازیافتی به میان می‌آید، اولین و مهم‌ترین چالش، مناسب‌سازی آن برای استفاده در صنعت کاغذسازی است [۲]. عملیات مکانیکی پالایش و کوبش الیاف، رایج‌ترین روش در صنعت کاغذسازی برای این منظور است. خواص مقاومتی الیاف بازیافتی با کوبش یا پالایش تا حدی بازیابی می‌شود، ولی محدودیت‌های این تیمارهای مکانیکی شامل افزایش چشمگیر نرمة‌های الیاف، افزایش زمان آگیری، کاهش نرخ تولید [۳] و کاهش مقاومت‌های وابسته به طول الیاف به علت تخریب ساختار دیواره سلولی الیاف [۴] و کوتاه شده آن [۵] است. از این رو اصلاح، مناسب‌سازی و بازیابی مقاومت‌ها در الیاف بازیافتی، ضروری به نظر می‌رسد. استفاده از تیمارهای شیمیایی همانند افزودنی‌های مقاومت خشک در بخش پایانه تر از جمله به‌کارگیری نشاسته کاتیونی، از دیگر روش‌های رایج برای حل این مشکل است. [۲، ۶]؛ اما به دلیل استفاده تک‌مرحله‌ای، امکان جذب مقدار بیشتری از این پلیمرها وجود ندارد. روش نانو فناوری لایه‌به‌لایه<sup>۲</sup>، رویکرد جالب و امیدوارکننده‌ای

3. Polyelectrolytes multilayering (PEM)  
4. Old Corrugated Container  
5. Tap water  
6. Valley Beater  
7. Flat Screen  
8. Bauer McNett  
9. Decrilled pulp (Fines free pulp)  
10. Canadian standard freeness

1. Packaging papers  
2. Layer-by-Layer nanotechnology

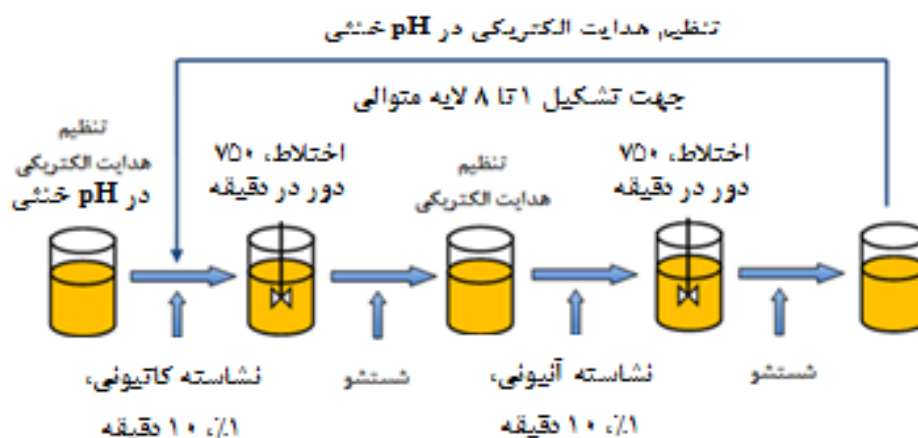
تهیه سوسپانسیون الیاف و شست و شوی خمیر تیمار شده، از آب یون زدایی شده تهیه شده با روش اسمزی معکوس ( $14/5 \mu\text{S/cm}$ ) استفاده شد. در تیمار چند لایه در شرایط نمکی، همه مراحل واکنش و شست و شو با افزودن نمک کلرید سدیم  $0/01$  مولار (هدایت الکتریکی  $140 \mu\text{S/cm}$ ) انجام گرفت. بعد از لایه نشانی ها، پتانسیل زتا یا بار الکتریکی سطح الیاف و تغییرات آن (کاتیونی و آنیونی شدن سطح الیاف پس از هر مرحله لایه نشانی) توسط دستگاه Mutek SZP06 اندازه گیری شد که در صورتی که دارای بار الکتریکی مثبت بودند، مرحله بعدی لایه نشانی با نشاسته آنیونی همانند مرحله اول صورت گرفت. در این تحقیق یک تا هشت مرحله برای تشکیل یک تا هشت لایه متوالی کاتیونی - آنیونی بر روی الیاف اعمال شد. شکل ۱ طرح شماتیک روش LbL با لایه گذاری یک دولایه کاتیونی - آنیونی را نشان می دهد.

سپس با استفاده از دستگاه کاغذساز دستی فنلاندی (Model KCL TYPE) از خمیرهای تیمار نشده، پالایش شده و تیمار شده، کاغذهای دست ساز ( $60 \pm 3 \text{g/m}^2$ ) براساس TAPPI T205 SP-95 تهیه شد. سپس نمونه ها در شرایط استاندارد ( $RH \approx 50 \pm 2$ ) و ( $T \approx 23 \pm 1^\circ\text{C}$ ) نگهداری شد. اندازه گیری ضخامت کاغذهای دست ساز با دستگاه میکرومتر شرکت L&W براساس استاندارد SCAN P-7 انجام گرفت. شاخص مقاومت به کشش کاغذ، با دستگاه آزمون کششی ساخت شرکت MTS مدل Synergie 200 و براساس دستورالعمل SCAN-P 67:93، و مقاومت خمشی با استفاده از دستگاه سنجش مقاومت خمشی شرکت L&W براساس SCAN-C 36 اندازه گیری شد. دانسیته ظاهری کاغذ نیز با تقسیم گراماژ ( $\text{g/m}^2$ ) به ضخامت (میکرون) محاسبه شد.

از پلیمرهای نشاسته کاتیونی کوآترنری<sup>۱</sup> و نشاسته آنیونی برای لایه نشانی استفاده شد. آماده سازی مواد شیمیایی استفاده شده در این تحقیق براساس دستورالعمل شرکت های عرضه کننده محصول انجام گرفت. نشاسته کاتیونی کوآترنری کاتیونی شده با گروه های آمین نوع چهارم و نشاسته آنیونی شده با اکسیداسیون گروه های هیدروکسیل به گروه های کربوکسیل، منبع هر دو ماده از گیاه Tapioca، تولید شرکت Siam Modified LTD Starch Co. کشور تایلند هستند که در این تحقیق استفاده شدند. به منظور آماده سازی نشاسته کاتیونی، محلول ۱ درصد آن بر روی اجاق الکتریکی به مدت ۳۰ دقیقه به آرامی حرارت داده شد تا به دمای ۹۵ درجه سانتی گراد برسد؛ سپس در این دما به مدت ۳۰ دقیقه دیگر نگهداری شد و در نهایت پس از خنک شدن تا دمای محیط، در طول مدت همان روز از آن استفاده شد. برای جلوگیری از تغییر غلظت نشاسته در اثر تبخیر آب در طی پخت، دهانه ارلن محتوی محلول نشاسته تا زمان خنک شدن با فویل آلومینیومی کاملاً مسدود نگه داشته شد. نشاسته آنیونی محلول در آب سرد است. به منظور آماده سازی نشاسته آنیونی، ابتدا پودر خشک آن با آب مقطر به محلول یکنواخت ۱ درصدی تبدیل و سپس این محلول بر روی همزن مغناطیسی به مدت نیم ساعت هم زده شد.

برای تشکیل چند لایه پلیمری، مقداری سوسپانسیون الیاف با غلظت  $0/6$  درصد در یک بشر ریخته شده و با دستگاه DDJ<sup>۲</sup> به مدت ۱۰ دقیقه، با محلول نشاسته کاتیونی (۱ درصد) به هم زده شد و سپس خمیر آبیگری، شست و شو و دوباره آبیگری شد. در همه مراحل آزمایش،

1. Quaternary
2. Dynamic Drainage Jar



شکل ۱. طرح شماتیک تکنیک لایه‌به‌لایه استفاده شده در این تحقیق

دامنه تغییر زیاد پتانسیل زتا که از  $16/9 \pm 4/45$  تا  $17/2 \pm 4/65$  میلی‌ولت با لایه‌نشانی‌های متوالی رخ می‌دهد، حتی در پایانه تر و در روش‌های معمول تیمار مکانیکی پالایش و با اضافه کردن افزودنی‌های مقاومت خشک همچون نشاسته کاتیونی امکان‌پذیر نیست. افزودن نمک نیز به علت پیکربندی مؤثرتر و کمتر توسعه یافته مولکول‌های نشاسته [۱۰] از یک طرف و اندازه مؤثر مولکول‌ها [۱۱] از طرف دیگر، موجب افزایش جذب نشاسته و پتانسیل زتای بیشتر سطح الیاف شد.

در پالایش و کوبش اصلاح ویژگی الکتروشیمیایی سطح الیاف از طریق لایه‌برداری از سطح الیاف<sup>۱</sup> یا لایه‌لایه شدن از لایه خارجی سطح<sup>۲</sup> انجام می‌گیرد که سبب ایجاد نرمه‌های الیاف نیز می‌شود [۱۲]؛ ولی در روش چندلایه‌ها به علت افزایش مقدار جذب پلی‌الکترولیت‌ها، اصلاح ویژگی الکتروشیمیایی سطح بدون تخریب ساختار الیاف (با بازده بیشتری) انجام می‌گیرد [۱۳].

## نتایج و بحث

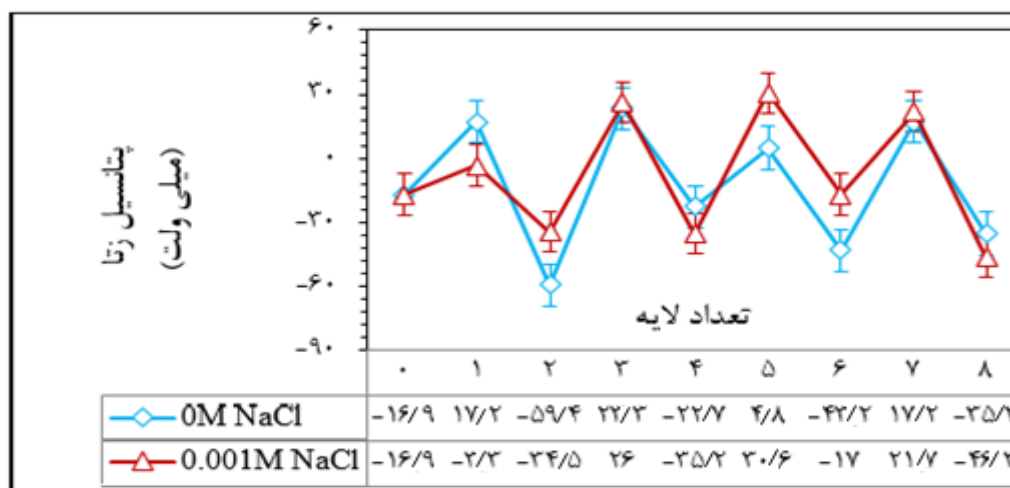
### پتانسیل زتا

پتانسیل زتا یا بار منفی بیشتر سطح الیاف (به‌طور غیرمستقیم) تأثیر زیادی بر مقاومت نهایی کاغذ دارد [۸]؛ زیرا مقدار جذب ذرات پلیمر کاتیونی را افزایش می‌دهد. از این رو یکی از اهداف اصلی روش چندلایه‌های پلیمری، اصلاح ویژگی الکتروشیمیایی سطح الیاف است [۹].

پتانسیل زتای الیاف خمیر OCC تیمارنشده، منفی و در حدود  $16/9 \pm 4/45$  و با پالایش خمیر تا درجه روانی ۲۹۱ میلی‌لیتر (CSF)، در حدود  $4/05 \pm 19/5$  میلی‌ولت اندازه‌گیری شد؛ اما همان‌طور که در شکل ۲ ملاحظه می‌شود، پتانسیل زتای الیاف تیمارنشده ( $16/9 \pm 4/45$  میلی‌ولت)، پس از لایه‌نشانی لایه اول با نشاسته کاتیونی، به سمت ناحیه مثبت ( $17/2 \pm 4/65$  میلی‌ولت) تغییر یافت. اولاً، این تغییر پتانسیل زتا حاکی از تشکیل اولین لایه (کاتیونی) و نیز آمادگی سطح الیاف برای لایه‌نشانی نشاسته آنیونی و جذب ذرات پلیمر آنیونی است. ثانیاً،

1. Peeling off

2. Outer surface delamination



شکل ۲. تغییرات پتانسیل زتا در سیستم چندلایه CS/AS و CS/AS همراه با نمک (غلظت نمک محیط لایه نشانی ۰/۰۰۱ مولار کلرید سدیم - هدایت الکتریکی ۱۴۰ میکروزیمنس بر سانتی متر - لایه های فرد کاتیونی و لایه های زوج آنیونی است)

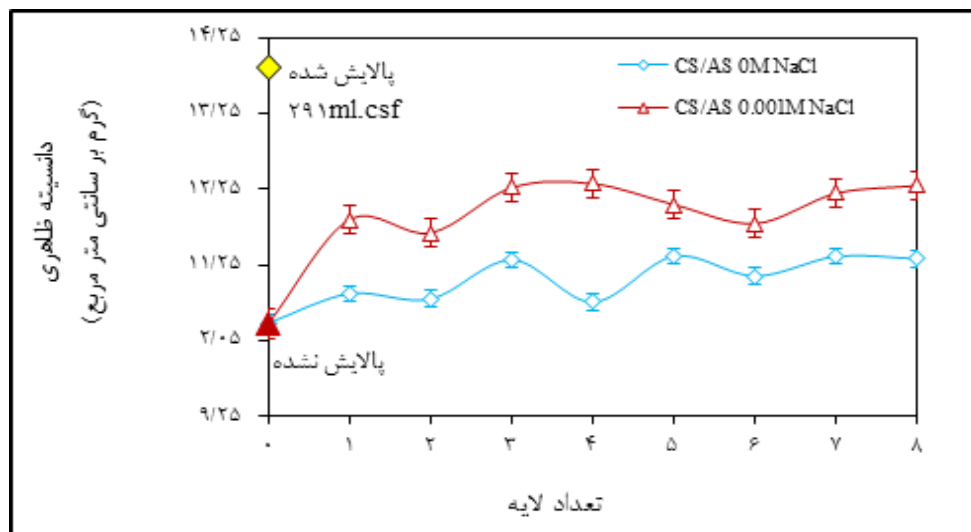
چون الیاف بازیافتی بیشتر برای تهیه کاغذهای بسته بندی استفاده می شود، این موضوع از این نظر در مورد این نوع کاغذها حائز اهمیت است که افزایش زیاد دانسیته کاغذ، اثر منفی بر برخی خصوصیات مهم آن از جمله مقاومت خمشی دارد [۱]. بنابراین دانسیته کمتر (و ضخامت بیشتر) کاغذهای بسته بندی برای دستیابی به برخی مقاومت ها همچون مقاومت خمشی و سفتی کاغذ، برتری خمیر تیمار چندلایه CS/AS نسبت به خمیر پالایش شده ارزیابی شد.

#### شاخص مقاومت به کشش

نتایج شاخص مقاومت به کشش از یک نظر بسیار چشمگیر است؛ زیرا مقدار آن در کاغذ تهیه شده از خمیر OCC با ۲۵ دقیقه پالایش با درجه روانی ۲۹۱ میلی لیتر (CSF) و با ۱۵/۰۵ درصد نرمه های الیاف تقریباً ۳۷/۹۲ N.m/g اندازه گیری شده است. مقایسه شاخص مقاومت به کشش در این تیمار با مقدار آن در سیستم چندلایه CS/AS شایان تأمل بوده و خود گویای افزایش چشمگیر قابلیت پیوندپذیری بین

#### دانسیته کاغذ

دانسیته ظاهری کاغذ از خواص فیزیکی کاغذ است که دیگر خواص فیزیکی و مکانیکی آن را تحت تأثیر قرار می دهد. دانسیته ظاهری کاغذ به صورت نسبت وزن پایه به ضخامت آن محاسبه می شود. در ضخامت یکسان، با افزایش وزن پایه، دانسیته ظاهری کاغذ افزایش می یابد (افزایش ماندگاری اجزای خمیر کاغذ) یا در وزن پایه ثابت، ضخامت نمونه ها کم می شود (استفاده از افزودنی های مقاومت دهنده یا پالایش). همان طور که در شکل ۳ ملاحظه می شود، بین داده های دانسیته کاغذ در دو سیستم چندلایه CS/AS و پالایش، اختلاف معنی داری وجود دارد. با پالایش خمیر OCC تا درجه روانی ۲۹۱ میلی لیتر (CSF)، دانسیته کاغذ از ۰/۴۰۹ گرم بر سانتی متر مکعب به ۰/۵۴۵ گرم بر سانتی متر مکعب افزایش یافت؛ در حالی که در سیستم چندلایه CS/AS با ۰/۰۰۱ مولار غلظت نمک کلرید سدیم (هدایت الکتریکی ۱۴۰ میکروزیمنس بر سانتی متر) و با پنج مرحله لایه نشانی نشاسته های یونی، دانسیته کاغذ به ۰/۴۷۲ گرم بر سانتی متر مکعب افزایش پیدا کرد.



شکل ۳. مقایسه تغییرات دانسیته کاغذ در سیستم چندلایه CS/AS و CS/AS در حضور نمک با تیمار پالایش تا درجه روانی ۲۹۱ میلی لیتر CSF (غلظت نمک محیط لایه‌نشانی؛ ۰/۰۰۱ مولار کلرید سدیم - هدایت الکتریکی ۱۴۰ میکروزیمنس بر سانتی متر - لایه‌های فرد کاتیونی و لایه‌های زوج آنیونی است)

نیروهای جاذبه الکترواستاتیکی، عامل اصلی توسعه مقاومت‌ها در سیستم لایه‌به‌لایه بیان شده است [۱۶].

بنابراین با توجه به اطلاعات جدول ۱ ثابت شده است که الیاف بازیافتی در این تحقیق به سطحی از قابلیت پیوندپذیری رسیدند که می‌توانند با پالایش و کوبش رقابت کنند (سیستم چندلایه CS/AS\*\*\*). از نکات ظریف این رقابت این است که چون تیمار پالایش و کوبش، افزایش شدید نرمه‌های الیاف را در پی دارد، هر فرایندی که بتواند برای تولید الیاف خمیر با سطوح مناسب پیوندپذیری، نرمه‌های کمتری ایجاد کند، بی‌گمان دفعات استفاده مجدد از الیاف بازیافتی را نیز افزایش خواهد داد [۳].

مطابق با نتیجه یادشده، گزارش شده است که تکنیک لایه‌به‌لایه شرایطی را برای بهبود مقاومت‌ها فراهم می‌سازد که قابل مقایسه با سطحی از مقاومت‌هایی است که به‌طور معمول با روش‌های افزایش مقاومت‌ها با استفاده از روش‌های رایج مکانیکی (پالایش و کوبش الیاف) قابل دستیابی است.

الیاف OCC در سیستم چندلایه استفاده شده است که قابل مقایسه و رقابت با تیمار مکانیکی پالایش است. همان‌طور که در جدول ۱ ارائه شده است، شاخص مقاومت به کشش در نمونه‌های تیمارنشده (خمیرکاغذ پایه)  $15/62 \text{ N.m/g}$  اندازه‌گیری شد و با افزایش تعداد لایه‌های نشاسته جذب‌شده، این ویژگی در لایه هفتم سیستم CS/AS تقریباً به  $33/51 \text{ N.m/g}$ ، و در لایه پنجم سیستم چندلایه CS/AS\*\*\* به  $36/65 \text{ N.m/g}$  رسیده که نشان می‌دهد مقاومت کششی کاغذ بیش از دوبرابر افزایش یافته است. نتیجه جالب‌تر اینکه این مقادیر افزایش مقاومت کششی در چندلایه‌ها بدون افزایش چشمگیر دانسیته کاغذ به دست آمده است (شکل ۲). در گزارش‌هایی ثابت شده است که مقاومت خشک کاغذهای حاصل از روش لایه‌به‌لایه (البته با استفاده از پلیمرهای مصنوعی) با افزایش تعداد لایه‌ها افزایش زیادی داشته است [۷، ۱۴، ۱۵]. گستردگی سطح تماس مولکولی و افزایش تعداد مؤثر تماس‌ها بین الیاف در اثر

جدول ۱. مقایسه اثر سیستم چندلایه پلیمری CS/AS با پالایش بر شاخص مقاومت به کشش

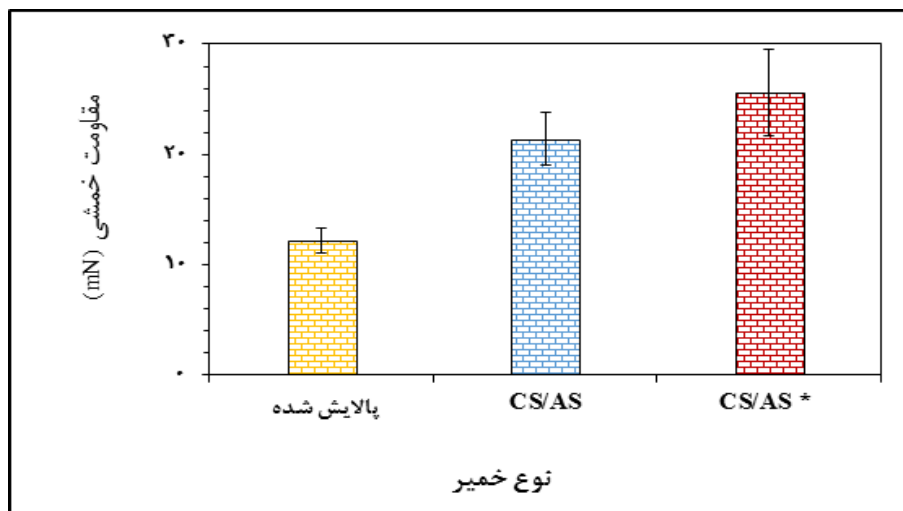
| تیمار                 | پالایش<br>(دقیقه) | درجه روانی<br>(mL.CSF) | تعداد<br>لایه | دانسیته کاغذ<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | شاخص مقاومت به کشش<br>(N.m/g) |
|-----------------------|-------------------|------------------------|---------------|--------------------------------------|-------------------------------|
| خمیر OCC پالایش نشده* | -                 | ≈ ۶۵۵                  | -             | ۰/۴۰۹                                | ۱۵/۶۲ : σ=۰/۷۳                |
| خمیر OCC پالایش شده   | ۲۵                | ≈ ۲۹۱                  | -             | ۰/۵۴۵                                | ۳۷/۹۲ : σ=۲/۷۳                |
| خمیر چندلایه CS/AS**  | -                 | ≈ ۵۸۸                  | ۷             | ۰/۴۴۵                                | ۳۳/۵۲ : σ=۱/۵۷                |
| خمیر چندلایه CS/AS*** | -                 | ≈ ۶۱۵                  | ۳             | ۰/۴۸۱                                | ۳۴/۹۴ : σ=۱/۰۵                |
| خمیر چندلایه CS/AS*** | -                 | ≈ ۵۸۸                  | ۵             | ۰/۴۷۲                                | ۳۶/۶۵ : σ=۱/۲۵                |

\* خمیر کاغذ پایه

\*\* نشاسته کاتیونی با DS≈۰/۰۲۷، نشاسته آنیونی با چگالی بار ۹۴۰ μeq/g (میکرو اکی والان بر گرم)

\*\*\* نشاسته کاتیونی با DS≈۰/۰۲۷، ۰/۰۰۱ مولار غلظت نمک کلرید سدیم با هدایت الکتریکی ۱۴۰ μS/cm (میکروزیمنس بر سانتی متر)

\*\*\*\* انحراف معیار اندازه گیری ها با نماد سیگما "σ" نمایش داده شده است



شکل ۴. مقایسه مقاومت خمشی در سیستم چندلایه CS/AS و CS/AS با تیمار پالایش (۲۹۱ mL.CSF)

\* غلظت نمک محیط لایه نشانی؛ ۰/۰۰۱ مولار کلرید سدیم (هدایت الکتریکی ۱۴۰ میکرو زیمنس بر سانتی متر)

### مقاومت خمشی

به طور کلی، در اکثر کاربردهای بسته بندی، ویژگی استحکام خمشی کاغذ به عنوان مهم ترین مقاومت مکانیکی باید از مقادیر زیادی برخوردار باشد. این ویژگی به خصوص در تبدیل کارتن، محافظت از محتوای بسته بندی شده و مقاومت به هنگام روی هم چیده شدن بسیار مهم است [۱۷]. رفتار خمشی کاغذ از جمله مقاومت خمشی<sup>۱</sup> و سفتی خمشی<sup>۲</sup> به

ضخامت و مدول الاستیسیته کاغذ بسیار وابسته است [۱]. شکل ۴ نشان می دهد که در مقایسه با تیمار مکانیکی پالایش، در سیستم های چندلایه پلیمری CS/AS و CS/AS\* و در لایه نشانی هفتم، مقاومت خمشی به طور معنی داری افزایش یافته است. احتمالاً در سیستم CS/AS، کاهش دانسیته و افزایش ضخامت کاغذ نسبت به پالایش؛ و در سیستم CS/AS\*، کاهش نسبی دانسیته و افزایش مدول الاستیسیته (ناشی از افزایش مقاومت کششی کاغذ) علت افزایش مقاومت خمشی است.

1. Bending resistance
2. Bending stiffness

## نتیجه‌گیری

نتایج کلی این پژوهش نشان داد که روش لایه‌به‌لایه، فرایند مؤثری برای اصلاح پتانسل زتای سطح الیاف است. با تشکیل چندلایه، پتانسیل زتای مثبت و منفی بیشتری نسبت به پالایش اندازه‌گیری شده است که امکان جذب الکترواستاتیک ذرات کاتیونی نشاسته را افزایش می‌دهد. تیمار LbL، بدون تخریب ساختار الیاف، در دانسیته کمتر موجب افزایش واکنش بین

الیاف OCC می‌شود. از این رو، شاخص مقاومت به کشش در این سیستم قابل مقایسه با پالایش است؛ زیرا بین مقادیر آن در سیستم چندلایه CS/AS (با دانسیته ظاهری کمتر) و کاغذ تهیه شده از خمیر OCC پالایش شده (با دانسیته ظاهری بیشتر) تفاوت واضحی مشاهده نشده است. ضمن اینکه این خمیرها استحکام خمشی بیشتری نسبت به خمیر پالایش شده از خود نشان می‌دهند.



## References

- [1]. Navaee-Ardeh, S. (2007). A new model for maximizing the bending stiffness of a symmetric three-ply paper or board. *Pulp and Paper Canada*, 108(4):45-47.
- [2]. Wistara, N., and Young, R.A. (1999). Properties and treatment of pulps from recycled paper. Part I. Physical and chemical properties of pulps. *Cellulose*, 6: 291-324.
- [3]. Malton, S., Kuys, K., Parker, I., and Vanderhoek, N. (1998). Adsorption of cationic starch on eucalypt pulp fibers and fines. *Appita Journal*, 51(4):292-298.
- [4]. Hubbe, M.A., Venditti, R.A., and Rojas, J.O. (2007). What happens to cellulosic fibers during papermaking and recycling? A Review. *BioResources*, 2(4):739-788.
- [5]. Ellis, R.L., and Sendlachek, K.M. (1993). Recycled versus virgin-fiber characteristics: A comparison in secondary fiber recycling, R. J. Spangenberg (ed.), TAPPI Press, Atlanta, GA.
- [6]. Gurnagul, N. (1995). Sodium hydroxide addition during recycling: effects on fiber swelling and sheet strength. *Tappi Journal*, 78 (12), 119–124.
- [7]. Eriksson, M., Notley, S.M., and Wagberg, L.J. (2005). The influence on paper strength properties when building multilayers of weak polyelectrolytes onto wood fibres. *Journal of Colloid and Interface Science*, 292:38-45.
- [8]. Torgnysdotter, A., Kulachenko, A., and Gradin, P. (2007). The link between the fiber contact zone and the physical properties. *Journal of Colloidal and Interface Science*, 41(13):1619-1633.
- [9]. Youn, H.J., Chin, S.M., Ryu, J., and Lee, S. (2007). Basic study on electrochemical properties of multilayered pulp fibers with polyelectrolytes. *Journal of KTAPPI*, 40(3): 53-60.
- [10]. Vermohlen K., Lewandowski H., Narres H.D., and Schwuger, M.J. (2000). Adsorption of Polyelectrolytes onto oxides- the influence of ionic strength, molar mass, and  $Ca^{2+}$  ions. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 163(1): 45-53.
- [11]. Wang, F., and Martin, H. (2002). Charge properties of fibers in the paper mill environment. 1. Effect of electrical conductivity. *Journal of Pulp and Paper Science*, 28(10): 347-353.
- [12]. Bhardwaj, K.N., Duong, T.D., and Nguyen, K.L. (2004). Pulp charge determination by different methods: effect of beating/refining. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 236: 39–44.
- [13]. Youn, H.J., Chin, S.M., Ryu, J., and Kwon, H.S. (2007). Basic study on electrochemical properties of multilayered pulp fibers with polyelectrolytes. *Journal of KTAPPI*, 40(3): 15-22.
- [14]. Lingstrom, R. (2006). Formation of polyelectrolyte multilayers on fibers: influence on wettability and fiber/fiber interaction. *Journal of Colloid and Interface Science*, 296: 396-408.
- [15]. Wagberg, L., Forsberg, S., Johansson A., and Juntti, P. (2002). Engineering of fiber surface properties by application of the polyelectrolyte multilayer concept. part 1: Modification of paper strength. *Journal of Pulp and Paper Science*, 28. 222-228.
- [16]. Lundstrom-Hamala, L., Johansson, E., and Wagberg, L. (2010). Polyelectrolyte multilayers from cationic and anionic starch: Influence of charge density and salt concentration on the properties of adsorbed layers. *Starch*, 62: 102-114.
- [17]. Bachman, J.S. (1968). Stiffness: its importance and its attainment. In: 12<sup>th</sup> Eucepa conference: multiply board. Berlin, Germany, pp. 8-16.