

جنگل و فرآورده‌های چوب، مجله منابع طبیعی ایران  
دوره ۶۹، شماره ۳، پاییز ۱۳۹۵

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۳/۲۴

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۷/۰۸

ص ۶۱۵-۶۲۴

## تأثیر همی سلولز در کارایی فیبریله شدن آنزیمی و مکانیکی الیاف سودای باگاس

❖ سید رحمان جعفری پطرودی\*؛ استادیار گروه فناوری تولید سلولز و کاغذ، دانشکده مهندسی انرژی و فناوری‌های نوین، پردیس علمی و تحقیقاتی دانشگاه شهید بهشتی، سوادکوه، مازندران، ایران

### چکیده

همی سلولزها به لحاظ فراوانی دومین پلی ساکارید موجود در مواد لیگنوسلولزی شامل الیاف گیاهان چوبی و غیرچوبی هستند. در این تحقیق، برای تولید نانوالیاف سلولزی، از دو نوع خمیر شامل خمیر رنگبری شده و خمیر حل شونده سودای باگاس با مقادیر متفاوت همی سلولز با بهره‌گیری از فرایند همگن‌ساز با فشار برشی زیاد استفاده شد. همچنین پیش‌تیمار آنزیمی اندوگلوکاناز برای جلوگیری از کلوخه شدن الیاف و نیز کاهش مصرف انرژی در بخش همگن‌ساز به کار گرفته شد. به منظور اندازه‌گیری مقدار فیبریله شدن الیاف شامل ضخامت نانوالیاف سلولزی و ناهمواری سطح، از دستگاه پروفیل‌سنج لیزری و میکروسکوپ الکترونی روبشی استفاده شد. نتایج نشان داد که نانوالیاف سودای باگاس دارای ضخامت کمتر از ۴۰ نانومتر بوده‌اند و رابطه مستقیمی بین مقدار همی سلولز و فیبریله شدن الیاف دیواره سلولی خمیر باگاس وجود دارد. همچنین نانوکاغذ حاوی همی سلولز بیشتر، دارای ناهمواری سطح کمتر و نانوالیاف سلولزی نازک‌تری از خمیر حل شونده بوده است. ناهمواری سطح، ویژگی بسیار مهمی برای بررسی میزان فیبریله شدن است؛ در نتیجه تأثیر همی سلولز به عنوان تسهیل‌کننده فیبریله شدن الیاف در این تحقیق ثابت شد.

واژگان کلیدی: باگاس، پروفیل‌سنج لیزری، خمیر حل شونده، میکروسکوپ الکترونی روبشی، همگن‌ساز، همی سلولز.

## مقدمه

ساختار شیمیایی الیاف دیواره سلولی ترکیبی از سه پلیمر مهم سلولز، همی سلولزها و لیگنین است. وجود یا نبود، و تغییر در مقدار و ساختار هر یک از این پلیمرها، تأثیر بسیار مهمی در بررسی چگونگی نانوفیبریل شدن الیاف سلولزی دارد. از گذشته تا کنون بسیاری از محققان بر این عقیده‌اند که بهترین سلولز نانوفیبریل شده را از لحاظ مورفولوژی می‌توان از سلولز کاملاً خالص (صد درصد آلفاسلولز) تهیه کرد [۲، ۱]. مطالعات بسیار کمی در زمینه تأثیر همی سلولزها در ابعاد نانو و تأثیر این پلیمر در فیبریل شدن سلولز در این ابعاد وجود دارد و برپایه این مطالعات، همی سلولزهای خمیرکاغذ تأثیر بسیار مهمی در فیبریل شدن الیاف سلولزی دارند و چندسازه‌های ساخته شده دارای مقاومت‌های مکانیکی بهتری‌اند. زیرا فرض بر این است که همی سلولزها چسبندگی بین نانوالیاف را افزایش می‌دهند [۳]. براساس بررسی‌ها تا کنون به‌جز موارد محدود، تحقیق گسترده‌ای درباره این موضوع انجام نگرفته است. دلایل این موضوع را می‌توان به این صورت تشریح کرد: ۱. ساختار همی سلولزها در خمیرکاغذهای چوبی اعم از سوزنی‌برگ، پهن‌برگ و نیز خمیرکاغذ گونه‌های غیرچوبی با هم کاملاً متفاوت است؛ ۲. مطالعه همی سلولزها در ابعاد نانو نیازمند استفاده از تجهیزات میکروسکوپی پیشرفته‌ای نظیر میکروسکوپ الکترونی روبشی است که دسترسی به آن به راحتی امکان‌پذیر نیست. از مدت‌ها قبل محققان دریافته‌اند که همی سلولزها در ابعاد میکرو به‌عنوان بخش بسیار مهم در ساختار خمیرکاغذ، به دلیل دارا بودن قدرت آب‌دوستی بسیار زیاد، تأثیر بسیار مهمی در فیبریل شدن

خارجی سطح الیاف دارد و هرچه مقدار همی سلولزها اعم از زایلان، مانان و گالاکتان بیشتر باشد، فیبریل شدن خارجی سطح الیاف در حین پالایش آنها بیشتر خواهد بود. ایواموتو و همکاران، در مطالعه‌ای به بررسی تأثیر همی سلولزها در فیبریل شدن خمیرکاغذهای متفاوت از چوب نوئل سیتکا<sup>۱</sup> (*Picea sitchensis Carr.*) و نیز تأثیر آن بر ویژگی‌های شبکه نانوالیاف پرداختند. در این تحقیق از خمیرکاغذ با درصد‌های متفاوت‌های همی سلولزها استفاده شد و نتایج نشان داد که سلولز موجود در خمیرهای با درصد همی سلولزهای بیشتر، به میزان بیشتری فیبریل می‌شود و نانوالیاف به پهنای ۲۰-۱۰ نانومتر تشکیل می‌دهد. خمیرهای با درصد همی سلولزهای کمتر، نسبت به خمیرهای دارای درصد همی سلولزهای بیشتر به سختی فیبریل می‌شوند و همچنین فیبریل‌سیون آنها یکنواخت نیست. همچنین چندسازه‌های ساخته شده از سلولز نانوفیبریل شده خمیرهای دارای همی سلولزهای بیشتر، دارای انبساط حرارتی کمتر و مقاومت مکانیکی بیشتر بودند. از این رو با در نظر گرفتن اینکه تا کنون مطالعه گسترده‌ای در خصوص تأثیر همی سلولزهای خمیرکاغذ گیاهان غیرچوبی در مقدار فیبریل شدن الیاف در ابعاد نانو انجام نگرفته است. مهمترین هدف مورد بررسی در این تحقیق، بررسی نقش همی سلولز به عنوان یکی از مهمترین ترکیبات شیمیایی ساختار الیاف مواد لیگنوسلولزی در عملکرد فیبریل شدن الیاف می‌باشد. همچنین در این مجال، ویژگی‌های مختلفی نظیر ضخامت نانوالیاف و ناهمواری سطح نانوکاغذ برای نشان دادن کارایی فیبریل شدن الیاف معرفی خواهد شد.

## مواد و روش‌ها

خمیر کاغذ نیمه‌رنگبری شده سودای باگاس مورد نیاز برای این تحقیق، از کارخانه کاغذ پارس در استان خوزستان تهیه شد. خمیر کاغذ تهیه شده دارای عدد کاپای حدود ۸ و مقدار لیگنین ۱/۳۲ درصد بود. سپس خمیر رنگبری شده DED سودای باگاس پس از رنگبری ECF<sup>۱</sup> و با توالی سه مرحله‌ای از خمیر نیمه‌رنگبری شده تهیه شد. عدد کاپای این خمیر، حدود ۲ و مقدار لیگنین آن حدود ۰/۳۵ درصد تعیین شد. ضمناً از هیدروکسید سدیم و هیدروکسید پتاسیم با غلظت‌های مختلف از ۸-۴ درصد بر مبنای وزن خشک خمیر و زمان‌های متفاوت از ۳۰ تا ۹۰ دقیقه برای استخراج قلیایی همی سلولزها و تهیه خمیر حل شونده یا آلفاسلولز کاملاً خالص استفاده شد. مواد شیمیایی لازم از شرکت مرک آلمان تهیه شد.

برای اندازه‌گیری ترکیبات شیمیایی و گراندرومی خمیر کاغذ سودای باگاس و خمیر کاغذ حل شونده باگاس به ترتیب از روش NREL/TP-51042618 و استاندارد ایزو به شماره (E) ۲۰۱۰-۵۳۵۱ استفاده شد [۴]. درجه بسپارش و وزن مولکولی نیز بر اساس روش مارک-هوینسک-ساکورادا و فرمول  $DP_v0.905=0.75[\eta]$  محاسبه شد [۵]. اندازه‌گیری میزان نگهداری آب خمیر کاغذ سودای باگاس و خمیر کاغذ حل شونده باگاس

با استفاده از استاندارد شماره (SCAN-C 62:00(2000) انجام شد. مواد لازم برای پیش تیمار آنزیمی (بافر آنزیم اندوگلوکاناز) شامل محلول ۲/۵ لیتری از فسفات پتاسیم ( $KH_2PO_4$ ) ۱۱ میلی‌مولار و فسفات سدیم ( $NaH_2PO_4$ ) ۹ میلی‌مولار در PH بین ۶/۸ تا ۷/۲ [۶] از شرکت سیگما آلدریچ تهیه شد. همچنین برای این تحقیق از آنزیم اندوگلوکاناز که در واقع نوعی سلولاز است استفاده شد [۶]. این آنزیم از شرکت نوونزایمز دانمارک با نام تجاری سلوکلاست تهیه شد.

برای تهیه سلولز نانوفیبریله شده و بررسی ویژگی‌های آن شامل ضخامت نانوالیاف سلولزی و ناهمواری سطح نانوکاغذ از روش جعفری پطرودی و همکاران استفاده شد [۶].

## نتایج و بحث

### ترکیبات شیمیایی خمیر کاغذ سودا و حل شونده باگاس

ویژگی‌های شیمیایی خمیر کاغذ سودا و خمیر حل شونده سودای باگاس به عنوان مواد اصلی برای تولید سلولز نانوفیبریله شده در جدول ۱ آورده شده است. در این بخش، بررسی تأثیر همی سلولزها در تولید و کیفیت سلولز نانوفیبریله شده تهیه شده از خمیر کاغذ حل شونده مدنظر بود که به شرح جدول ۱ ارزیابی شد.

جدول ۱. ویژگی‌های شیمیایی خمیر حل شونده سودای باگاس در مقایسه با خمیر کاغذ سودای باگاس

مقدار (درصد)		ویژگی‌ها
سودای باگاس	حل شونده	
۷۳/۳	۹۵/۲۵	سلولز
۲۵/۳	۴/۱۴	زایلووز
۰/۸	۰/۱۶	آرابینوز
۰/۱	۰	گالاکتوز
کمتر از ۰/۵	کمتر از ۰/۵	خاکستر

حل شونده باگاس، بیشتر از خمیر کاغذ سودای باگاس بود. به نظر می‌رسد یکی از مهم‌ترین دلایل کاهش این ویژگی‌ها در خمیر کاغذ سودای باگاس وجود همی سلولزهاست که در مجموع گرانشی اندازه‌گیری شده را کاهش داد.

### میزان نگهداری آب

میزان نگهداری آب خمیر حل شونده باگاس و خمیر کاغذ سودای باگاس در جدول ۴ نشان داده شده است. میزان نگهداری آب عبارت است از توانایی الیاف خمیر کاغذ باگاس برای نگه داشتن آب که به میزان گروه‌های هیدروکسیل آزاد موجود در دیواره الیاف بستگی مستقیم دارد. براساس اطلاعات این جدول، میزان نگهداری آب خمیر حل شونده باگاس، ۱۰ درصد کمتر از خمیر کاغذ سودای باگاس بود که دلیل اصلی آن، تیمار قلیایی سودای باگاس است. در طی این فرایند، تغییرات ساختار هولوسلوز در الیاف خمیر حل شونده اتفاق افتاد که موجب کاهش مقدار همی سلولزهای خمیر نیز شد. پیشتر ایواموتو و همکاران نیز چنین نتایجی را گزارش کرده بودند [۳].

همان‌طور که در جدول دیده می‌شود، مقدار سلولز خمیر حل شونده بسیار بیشتر از خمیر کاغذ سودای باگاس و برعکس مقدار همی سلولز آن کمتر از خمیر کاغذ سودای باگاس است؛ بنابراین می‌توان گفت استخراج قلیایی با هیدروکسید سدیم برای حل کردن و خارج کردن همی سلولزها بسیار مؤثر بود.

### ابعاد الیاف

شناخت کافی طول و ضخامت الیاف برای تولید سلولز نانوفیبریله شده اهمیت بسزایی دارد؛ براساس اندازه‌گیری‌های انجام گرفته، طول و ضخامت الیاف خمیر حل شونده باگاس کمی بیشتر از خمیر کاغذ سودای باگاس بود، ولی این حد از طول الیاف نیز محدودیتی برای عبور از همگن‌ساز در حین تولید از سلولز نانوفیبریله شده ایجاد نکرد.

### گرانروی، درجهٔ بسپارش و وزن مولکولی

مقدار گرانروی، درجهٔ بسپارش و وزن مولکولی خمیر کاغذ حل شونده باگاس در جدول ۳ نشان داده شده است. همان‌طور که از جدول بر می‌آید، مقدار گرانروی، درجهٔ بسپارش و وزن مولکولی خمیر

جدول ۲. نتایج ویژگی‌های الیاف خمیر حل شونده باگاس مورد استفاده برای تولید نانوالیاف سلولزی

ویژگی‌های الیاف	میانگین طول (میلی‌متر)	میانگین ضخامت (میکرومتر)
خمیر کاغذ حل شونده باگاس	۰/۶۹۵	۲۳/۱

جدول ۳. گرانروی، درجهٔ بسپارش و وزن مولکولی خمیر حل شونده باگاس در مقایسه با خمیر کاغذ سودای باگاس

ویژگی‌ها	مقدار	حل شونده	سودای باگاس
گرانروی (میلی‌لیتر بر گرم)	۶۲۶	۵۷۶	
درجهٔ بسپارش	۸۹۶	۸۱۷	
وزن مولکولی (مول بر گرم)	۱۴۵،۰۷۷	۱۳۲،۳۲۸	

## جدول ۴. مقدار نگهداری آب خمیر حل شونده باگاس در مقایسه با خمیر کاغذ سودای باگاس

مقدار (گرم بر گرم)		ویژگی
سودای باگاس	حل شونده	میزان نگهداری آب
۱/۶۶	۱/۴۹	

## ویژگی های سلولز نانوفیبریله شده

سلولز نانوفیبریله شده تهیه شده از خمیر حل شونده

باگاس بدون هیچ گونه پیش تیمار

## گرانروی، درجه بسپارش و وزن مولکولی

گرانروی، درجه بسپارش و وزن مولکولی سلولز نانوفیبریله شده تهیه شده از خمیر حل شونده سودای باگاس در مقایسه با خمیر کاغذ سودای باگاس در جدول ۵ نشان داده شده است. هر دو خمیر باگاس با سه و پنج مرحله عبور از همگن ساز به سلولز نانوفیبریله شده تبدیل شدند. همچنین با افزایش فیبریله شدن در نتیجه تیمار مکانیکی، مقدار پیوندهای هیدروژنی سطح نانوالیاف بیشتر خواهد شد و قدرت تشکیل پیوند نیز افزایش خواهد یافت. البته امروزه به دلیل مصرف زیاد انرژی در حین عملیات مکانیکی با استفاده از همگن ساز سعی می شود با استفاده از پیش تیمارهای آنزیمی و شیمیایی، میزان فیبریله شدن افزایش یابد [۷، ۸].

همان طور که ملاحظه می شود میزان گرانروی و به همراه آن درجه بسپارش و وزن مولکولی با افزایش عبور از همگن ساز، چه در مورد خمیر کاغذ سودای باگاس و چه در مورد خمیر حل شونده کاهش یافت. هرچه عبور از همگن ساز بیشتر شود، کاهش بیشتری در گرانروی، درجه بسپارش و وزن مولکولی اتفاق می افتد و این همان فیبریله شدن الیاف است و با

افزایش دوره های عبور از همگن ساز نیز بیشتر می شود. اما با مقایسه این دو خمیر می توان گفت میزان فیبریله شدن الیاف در خمیر کاغذ حل شونده باگاس کمتر از خمیر کاغذ سودای باگاس بوده است که دلیل اصلی آن خلوص و درصد بیشتر سلولز در خمیر کاغذ حل شونده است.

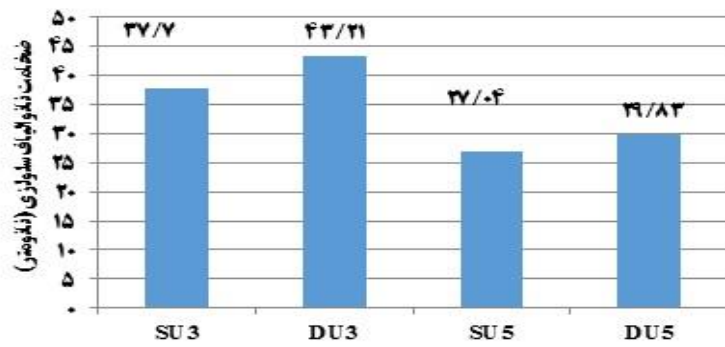
## ضخامت نانوالیاف

سلولز نانوفیبریله شده تهیه شده از خمیر حل شونده باگاس همانند خمیر کاغذ سودای باگاس، ضخامتی کمتر از ۱۰۰ نانومتر داشت که در شکل ۱ مقدار آن در کیفیت های مختلف سلولز نانوفیبریله شده با هم مقایسه شده است. همان طور که در شکل ۱ مشخص است، با سه مرحله عبور از همگن ساز، ضخامت سلولز نانوفیبریله شده از خمیر کاغذ سودای باگاس (SU<sub>۳</sub>) کمتر از خمیر حل شونده (DU<sub>۳</sub>) بود. همین روند در مورد پنج مرحله عبور از همگن ساز نیز صادق است (SU<sub>۵</sub> در مقایسه با DU<sub>۵</sub>). نکته شایان توجه این است که ضخامت سلولز نانوفیبریله شده تهیه شده هم از خمیر کاغذ سودا و هم از خمیر حل شونده کمتر از ۱۰۰ نانومتر بود که در محدوده ضخامت های سلولز نانوفیبریله شده گزارش شده در تحقیقات مشابه گذشته است [۷، ۹].

جدول ۵. گرانیروی، درجهٔ بسپارش و وزن مولکولی سلولز نانوفیبریله شده بدون پیش تیمار از خمیر سودا و حل شونده باگاس

نوع خمیر	نانوالیاف سلولزی	گرانیروی (میلی لیتر بر گرم)	درجهٔ بسپارش	وزن مولکولی (مول بر گرم)
سودا	U <sub>3</sub>	۴۹۸	۶۹۶	۱۱۲۶۷۴
	U <sub>5</sub>	۴۰۰	۵۴۶	۸۸۴۴۳
حل شونده	U <sub>3</sub>	۵۹۸	۸۵۱	۱۳۷۹۲۴
	U <sub>5</sub>	۴۸۰	۶۶۸	۱۰۸۱۸۳

U<sub>3</sub>: سلولز نانوفیبریله شده با سه مرحله عبور  
U<sub>5</sub>: سلولز نانوفیبریله شده با پنج مرحله عبور



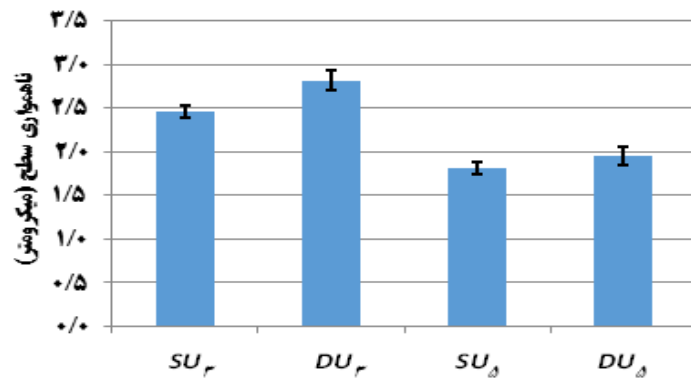
نانوالیاف سلولزی تهیه شده از خمیر کاغذ سودا و حل شونده باگاس

شکل ۱. مقایسهٔ ضخامت سلولز نانوفیبریله شدهٔ تهیه شده از خمیر کاغذ سودا و خمیر حل شونده باگاس در کیفیت‌های مختلف

### ناهمواری سطح

همان‌طور که در بخش‌های قبلی ذکر شد، این ویژگی مهم‌ترین ویژگی برای بررسی مقدار فیبریله شدن سلولز نانوفیبریله شده است [۱۰]؛ بنابراین در این بخش نیز ناهمواری سطح برای سلولز نانوفیبریله شدهٔ تهیه شده برای خمیر کاغذ سودا و خمیر حل شونده مقایسه شد (شکل ۲). براساس اطلاعات موجود، با

افزایش تعداد مراحل عبور از همگن‌ساز، مقدار فیبریله شدن الیاف نیز بیشتر شد و در نتیجه ناهمواری سطح کاهش یافت. همچنین سلولز نانوفیبریله شدهٔ تهیه شده از خمیر کاغذ سودا، ناهمواری سطح کمتری نسبت به خمیر حل شونده داشت (SU<sub>3</sub> در مقایسه با DU<sub>3</sub>).



نانوالیاف سلولزی تهیه شده از خمیر کاغذ سودا و حل شونده باگاس

شکل ۲. مقایسهٔ ناهمواری سطح سلولز نانوفیبریله شدهٔ تهیه شده از خمیر کاغذ سودا و خمیر حل شونده باگاس در کیفیت‌های مختلف

مرحله عبور از همگن‌ساز به مقدار ۴/۴ درصد بود. همین روند در مورد درجهٔ بسپارش و وزن مولکولی نیز مشاهده شد.

#### ضخامت سلولز نانوفیبریله شده

ضخامت سلولز نانوفیبریله شده با انجام تیمار آنزیمی به دلیل سهولت در عملیات فیبریله شدن کاهش می‌یابد. در شکل ۳ ضخامت سلولز نانوفیبریله شدهٔ تهیه شده از خمیر کاغذ سودا و خمیر حل شوندهٔ باگاس مقایسه شده است. نتایج به دست آمده بسیار شایان توجه بوده است، به طوری که متوسط ضخامت سلولز نانوفیبریله شدهٔ تهیه شده از خمیر کاغذ سودای باگاس هم در سه مرحله و هم در پنج مرحله عبور از همگن‌ساز کمتر از خمیر حل شوندهٔ باگاس بود. ضخامت سلولز نانوفیبریله شدهٔ تهیه شده از خمیر کاغذ سودای باگاس با سه مرحله عبور از همگن‌ساز، ۹۱ درصد کمتر از خمیر حل شوندهٔ باگاس بود (SE<sub>۳</sub> در مقایسه با DE<sub>۳</sub>). ضخامت سلولز نانوفیبریله شده در پنج مرحله عبور از همگن‌ساز نیز ۹۲ درصد کمتر از خمیر حل شوندهٔ باگاس بود (SE<sub>۵</sub> در مقایسه با DE<sub>۵</sub>). به نظر می‌رسد دلیل اصلی این موضوع فقط تفاوت ساختاری مادهٔ اولیه، یعنی مقدار همی سلولز بیشتر است.

بنابراین فیبریله شدن بیشتری در خمیر کاغذ سودا نسبت به خمیر حل شونده اتفاق افتاد. از آنجا که تفاوت مقدار همی سلولزها، تنها تفاوت این دو خمیر چه از لحاظ ساختاری و چه از لحاظ فرایندی است، می‌توان نتیجه گرفت که همی سلولزهای موجود در خمیر کاغذ سبب بهبود فرایند فیبریله شدن الیاف در هنگام عبور از همگن‌ساز شدند.

#### سلولز نانوفیبریله شدهٔ تهیه شده از خمیر حل شوندهٔ باگاس با پیش تیمار آنزیمی

##### گرانروی، درجهٔ بسپارش و وزن مولکولی

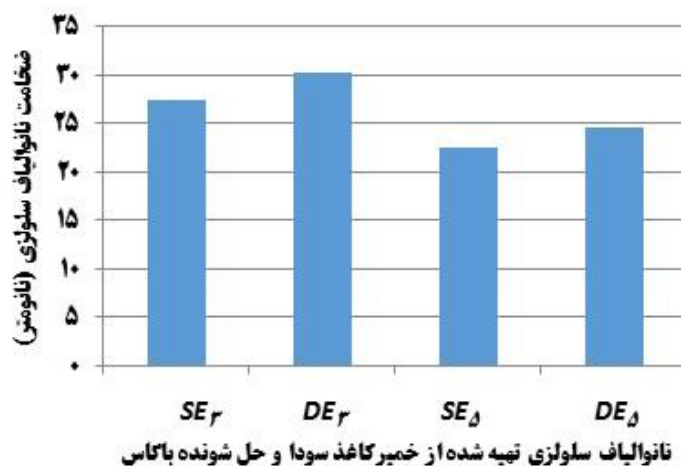
جدول ۶ نشان دهندهٔ گرانروی، درجهٔ بسپارش و وزن مولکولی سلولز نانوفیبریله شدهٔ تهیه شده از خمیر حل شوندهٔ باگاس در مقایسه با خمیر کاغذ سودای باگاس است. به طور کلی مقدار گرانروی اولیهٔ خمیر حل شونده بیشتر از خمیر کاغذ سودای باگاس بود. همچنین کاهش چشمگیری در مقدار گرانروی سلولز نانوفیبریله شدهٔ تولید شده اتفاق افتاد.

در مورد تغییرات گرانروی باید اظهار داشت که طی سه مرحله عبور از همگن‌ساز، گرانروی خمیر کاغذ تیمار شده با آنزیم اندوگلوکاناز ۲۰/۹ درصد کاهش یافت و به سلولز نانوفیبریله شده تبدیل شد؛ در حالی که تغییرات گرانروی در مورد پنج

جدول ۶. گرانروی، درجهٔ بسپارش و وزن مولکولی سلولز نانوفیبریله شده با تیمار آنزیمی از خمیر کاغذ سودا و خمیر حل شوندهٔ باگاس

وزن مولکولی (مول بر گرم)	درجهٔ بسپارش	گرانروی (میلی لیتر بر گرم)	نانوالیاف سلولزی	نوع خمیر
۹۰۸۹۰	۵۶۱	۴۱۰	E <sub>۳</sub>	سودا
۶۹۱۱۷	۴۲۷	۳۲۰	E <sub>۵</sub>	
۱۰۴۹۵۰	۶۴۸	۴۶۷	E <sub>۳</sub>	حل شونده
۷۳۹۰۵	۴۵۶	۳۴۰	E <sub>۵</sub>	

U<sub>۳</sub>: سلولز نانوفیبریله شده با سه مرحله عبور  
U<sub>۵</sub>: سلولز نانوفیبریله شده با پنج مرحله عبور



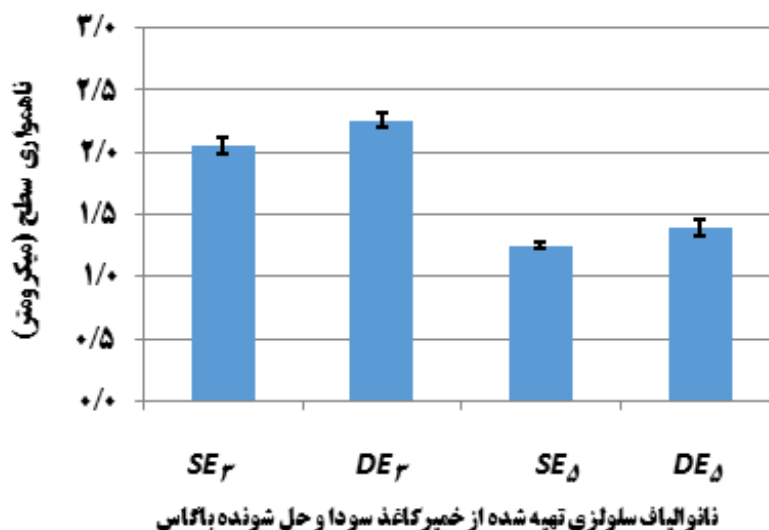
شکل ۳. مقایسه ضخامت سلولز نانوفیبریله شده تهیه شده از خمیر کاغذ سودا و خمیر حل شونده باگاس در کیفیت‌های مختلف

فیبریله شدن بیشتری در هنگام عبور از همگن‌ساز اتفاق افتاد.

در مورد خمیر حل شونده نیز ناهمواری سطح با افزایش عبور از همگن‌ساز از سه مرحله به پنج مرحله کاهش یافت و از ۲/۲۶ میکرومتر به ۱/۳۹ میکرومتر رسید. به طور مشابه این تغییرات در مورد خمیر کاغذ سودای باگاس نیز ۶۱ درصد بود.

### ناهمواری سطح

شکل ۴ ناهمواری سطح سلولز نانوفیبریله شده تهیه شده از خمیر حل شونده پیش تیمار شده با آنزیم اندوگلوکاناز را در مقایسه با خمیر کاغذ سودای باگاس نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، خمیر کاغذ سودای باگاس نسبت به خمیر حل شونده دارای ناهمواری سطح کمتری بود که نشان می‌دهد



شکل ۴. مقایسه ناهمواری سطح سلولز نانوفیبریله شده تهیه شده از خمیر کاغذ سودا و خمیر حل شونده باگاس در کیفیت‌های مختلف



## نتیجه گیری

در این تحقیق، اثر همی سلولز باگاس بر مقدار فیبریله شدن دیواره الیاف سلولزی آن بررسی شد. برای این منظور، دو نوع خمیر با درصدهای متفاوت همی سلولز به کیفیت‌های مختلف سلولز نانوفیبریله تبدیل شدند. نتایج نشان داد که رابطه مستقیمی بین مقدار همی سلولز و فیبریله شدن دیواره سلولی وجود دارد. همچنین نانوالیاف سلولزی تهیه شده از خمیر حاوی همی سلولز بیشتر، دارای ناهمواری سطح

کمتری از خمیر حل شونده بود. همچنین در این تحقیق برای اولین بار، ناهمواری سطح به عنوان مهمترین ویژگی برای بررسی میزان فیبریله شدن دیواره الیاف سلولزی معرفی شده است. ضمناً ثابت شده است که ضخامت نانوالیاف سلولزی تولید شده از خمیر حاوی همی سلولز بسیار کمتر از خمیرهای حل شونده بوده است. نتایج ناهمواری سطح و ضخامت نانوالیاف سلولزی نشاندهنده تسهیل فرایند فیبریله شدن الیاف توسط همی سلولز است.

## References

- [1]. Nogi, M., Iwamoto, S., Nakagaito, A.N., and Yano, H. (2009). Optically transparent nanofiber paper. *Advanced Material*, 20:1-4.
- [2]. Yousefi, H., Takashi Nishino, T., Faezipour, M., Ebrahimi, Gh., and Shakeri, A. (2011). Direct fabrication of all-cellulose nanocomposite from cellulose microfibrils using ionic liquid-based nanowelding. *Biomacromolecules*, 12(11):4080-4085.
- [3]. Iwamoto, S., Abe, K., and Yano, H. (2008). The effect of hemicelluloses on wood pulp nanofibrillation and nanofiber network characteristics. *Biomacromolecules*, 9: 1022-1026.
- [4]. Sluiter A, Hames B, Ruiz R, Scarlata C, Sluiter J, Templeton D, Crocker D (2008). Determination of structural carbohydrates and lignin in biomass. National Renewable Energy Laboratory, NREL/TP-51042618.
- [5]. Sihtola, H., Kyrklund, B., Laamanen, L., Palenius, I. (1963). Comparison and conversion of viscosity and DP-values determined by different methods, Vol. 4. Helsinki, Finland: Paperija Puu, 225-232.
- [6]. Djafari Petroudy, S. R., Ghasemian, A., Resalati, H., Syverud, K., and Chinga-Carrasco, G. (2015). The effect of xylan on the fibrillation efficiency of DED bleached soda bagasse pulp and on nanopaper characteristics. *Cellulose*, 22: 385-395.
- [7]. Hassan, M.L., Mathew A.P., Hassan E.A., and Oksman, K. (2010). Effect of pretreatment of bagasse pulp on properties of isolated nanofibers and nanopaper sheets. *Wood and Fiber Science*, 42(3): 362-376.
- [8]. Zimmermann, T., Bordeanu, N., and Strub, E. (2010). Properties of nanofibrillated cellulose from different raw materials and its reinforcement potential. *Carbohydrate Polymers*, 79(4): 1086-1093.
- [9]. Hassan, E. A., Hassan, M. L., and Oksman K. (2011). Improving bagasse pulp paper sheet properties with microfibrillated cellulose isolated from xylanase-treated bagasse. *Wood and Fiber Science*, 43(1): 76-82.
- [10]. Chinga-Carrasco, G. (2013). Optical methods for the quantification of the fibrillation degree of bleached MFC materials. *Micron*, 48: 42-48.