



Investigation of the Effect of Energy Consumption on the Physical and Mechanical Properties of Cellulose Nanofibers Derived from Wheat Straw

Bita Moezipour¹, Farajollah Hajjalizadeh², Mohammad Ahmadi^{3*}

1- Assistant prof. of Wood Science and Technology department of natural resources Faculty of agriculture and natural resources University of Mohaghegh Ardabili Ardabil Iran

2- M.Sc. Student of Wood Science and Technology department of natural resources Faculty of agriculture and natural resources University of Mohaghegh Ardabili Ardabil Iran

3- 1. Corresponding author, Associate prof. of Wood Science and Technology University of Mohaghegh Ardabili, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Ardabil, Iran. Email: m.ahmadi@uma.ac.ir

Received: June 2025

Accepted: August 2025

Abstract

Problem definition and objectives: Cellulose nanofibers (CNF), as an emerging bio-based material with outstanding mechanical, optical, and environmental properties, play a significant role in the development of innovative products in packaging, nanocomposites, and functional papers. However, the industrial production of CNF faces challenges such as high energy consumption and the costly nature of preparation processes including bleaching and refining. On the other hand, the use of non-wood lignocellulosic resources such as wheat straw as a cheap, abundant, and renewable material can be an effective approach to reduce production costs, improve process efficiency, and enhance environmental compatibility. This study aims to investigate the effect of energy consumption in two critical stages mechanical refining and microfluidization on the physical and mechanical properties of CNF derived from wheat straw. The study also seeks to determine optimal energy conditions for producing high-performance CNF while eliminating the need for bleaching in industrial processes.

Methodology: In this study, pulping was performed using the soda process under specific conditions: alkali concentration of 16%, cooking time of 30 minutes, cooking temperature of 160°C, and a liquor-to-wheat straw ratio of 3:1. The resulting unbleached pulp was directly subjected to mechanical refining without any bleaching treatment. This refining was carried out using a disk refiner at four different energy levels: 130, 170, 250, and 500 kWh/t, to evaluate the effect of refining intensity on fiber preparation for microfibrillation. Subsequently, the refined samples were passed through a microfluidizer in six different stages (from one to six successive passes) to complete the final fibrillation process and produce cellulose nanofibers. Ultimately, the mechanical properties including tensile index, burst index, and tear length as well as physical and optical characteristics such as thickness, surface roughness, density, and transparency of the CNF samples were evaluated. All tests were performed according to ISO and TAPPI standards.

Results: The results indicated that increasing energy consumption up to an optimal level led to a significant improvement in the mechanical properties of CNF. The treatment condition using 170 kWh/t in refining and 258 kWh/t in microfluidization showed the best performance. Under these conditions, the tensile index reached 113.5 N·m/g and the tear length reached 11.5 km, representing an improvement of over 220% compared to the control sample. Additionally, the

samples under this optimal condition exhibited reduced thickness, increased density, lower surface roughness, and enhanced transparency, indicating a more uniform structure, better nanofiber distribution, and stronger interfiber bonding. In contrast, excessive energy input in the microfluidization stage did not result in further improvements and, in some cases, led to a decline in mechanical performance—likely due to fiber structure degradation caused by over-processing.

Conclusion: The findings of this study demonstrate that it is possible to produce high-quality CNF from unbleached wheat straw pulp without the need for lignin removal. Eliminating the bleaching stage not only reduces energy consumption and production costs but also preserves the structural components of the fibers, thereby enhancing the mechanical performance of the CNF. Moreover, precise control over energy input at each stage is a key factor in optimizing the final product properties. These results can serve as a foundation for the development of industrial-scale CNF production processes from non-wood sources with a cost-effective and resource-efficient approach.

Keywords: Cellulose Nanofibers (CNF), Wheat Straw, Energy Consumption, Refiner, Microfluidizer.

بررسی تأثیر مصرف انرژی بر ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی نانو الیاف سلولزی حاصل از کاه

گندم

بیبا معزی پور^۱، فرج‌اله حاجی علیزاده^۲، محمد احمدی^{۳*}

۱- استادیار گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی صنایع چوب و فراورده‌های سلولزی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

۳- نویسنده مسئول، دانشیار گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران. رایانامه: m.ahmadi@uma.ac.ir

تاریخ پذیرش: شهریور ۱۴۰۴

تاریخ دریافت: تیر ۱۴۰۴

چکیده

بیان مساله و اهداف: نانو الیاف سلولزی (CNF) به‌عنوان یکی از مواد نوین و زیست‌پایه با ویژگی‌های برجسته مکانیکی، نوری و محیط‌زیستی نقش مؤثری در توسعه محصولات نوآورانه در صنایع بسته‌بندی، نانو کامپوزیت‌ها و کاغذهای عملکردی ایفا می‌کنند. با این حال، تولید صنعتی CNF با موانعی مانند مصرف بالای انرژی و هزینه‌بر بودن فرآیندهای آماده‌سازی از جمله رنگ‌بری و پالایش همراه می‌باشد. از سوی دیگر، استفاده از منابع لیگنوسلولزی غیرچوبی مانند کاه گندم، به‌عنوان ماده‌ای ارزان، فراوان و تجدیدپذیر، می‌تواند راهکاری مؤثر برای کاهش هزینه‌های تولید، بهبود کارایی فرآیند و سازگاری محیط زیستی باشد. پژوهش حاضر با هدف بررسی تأثیر مصرف انرژی در دو مرحله‌ی کلیدی پالایش مکانیکی (ریفاینر) و میکروفلوئیدایزر (فیبریلایسیون نهایی) بر ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی CNF حاصل از کاه گندم انجام شده است. همچنین این مطالعه به دنبال یافتن شرایط بهینه مصرف انرژی جهت تولید نانو الیاف با عملکرد بالا و حذف نیاز به مراحل رنگ‌بری در فرآیندهای صنعتی می‌باشد.

مواد و روشها: در این پژوهش، فرآیند خمیر سازی به روش سودا با شرایط مشخصی انجام گرفت؛ به‌طوری‌که میزان قلیاییات محلول پخت ۱۶ درصد، مدت‌زمان پخت ۳۰ دقیقه، دمای پخت ۱۶۰ درجه سانتی‌گراد و نسبت مایع پخت به کاه گندم ۳:۱ در نظر گرفته شد. خمیر حاصل بدون انجام عملیات رنگ‌بری، مستقیماً وارد مرحله پالایش مکانیکی شد. این فرآیند با استفاده از دستگاه دیسک ریفاینر در چهار سطح انرژی شامل ۱۳۰، ۱۷۰، ۲۵۰ و ۵۰۰ kWh/t انجام گردید تا تأثیر شدت پالایش بر آماده‌سازی الیاف برای میکروفیبریلایسیون بررسی شود. در گام بعد، نمونه‌های پالایش‌شده در شش سطح عبور از دستگاه میکروفلوئیدایزر (۱ تا ۶ مرحله عبور متوالی) تحت فرآیند فیبریلایسیون نهایی قرار گرفتند تا نانو الیاف سلولزی تولید شود. در نهایت ویژگی‌های مکانیکی شامل شاخص کشش، ترک‌شدن و طول پارگی و نیز ویژگی‌های فیزیکی و نوری شامل ضخامت، زبری سطح، دانسیته و شفافیت نمونه‌های CNF ارزیابی شد. تمامی آزمون‌ها بر اساس استانداردهای ISO و TAPPI انجام گردید.

نتایج: نتایج نشان داد که افزایش مصرف انرژی تا یک نقطه‌ی بهینه منجر به بهبود قابل توجه در خواص مکانیکی CNF می‌شود. تیماری که در آن از انرژی ۱۷۰ kWh/t در پالایش و ۲۵۸ kWh/t در میکروفلوئیدایزر استفاده شده بود، عملکرد بهینه‌ای از خود نشان داد. در این شرایط، شاخص کشش به ۱۱۳/۵ m/g.N و طول پارگی به ۱۱/۵ km رسید که نسبت به نمونه شاهد، بهبودی بیش از ۲۲۰ درصد را نشان می‌دهد. همچنین در این شرایط، نمونه‌ها دارای ضخامت کمتر، دانسیته بیشتر، زبری کم‌تر و شفافیت بهتری بودند که بیانگر ساختار یکنواخت‌تر، توزیع مناسب نانو الیاف و پیوندهای بین‌الیافی قوی‌تر می‌باشد. در مقابل، افزایش بیش‌ازحد انرژی مصرفی در میکروفلوئیدایزر نه تنها به بهبود بیشتر منجر نشد بلکه در برخی موارد باعث افت خواص مکانیکی شد که احتمالاً ناشی از تخریب ساختار الیاف در اثر اعمال انرژی بیش‌ازحد بوده است.

نتیجه گیری: بررسی نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که تولید CNF با کیفیت بیشتر از خمیر غیرنگبری شده کاه گندم و بدون نیاز به حذف لیگنین، امکان‌پذیر می‌باشد. حذف مرحله رنگ‌بری نه تنها موجب کاهش مصرف انرژی و هزینه‌های تولید می‌شود، بلکه با حفظ ترکیبات ساختاری الیاف، عملکرد مکانیکی CNF را نیز تقویت می‌کند. همچنین طراحی دقیق میزان انرژی مصرفی در هر مرحله، عاملی کلیدی در بهینه‌سازی خواص نهایی محصول به شمار می‌رود. یافته‌های این مطالعه می‌تواند به‌عنوان مبنایی برای توسعه فرآیندهای صنعتی تولید از منابع غیرچوبی با رویکرد پایدار و مقرون‌به‌صرفه مورد استفاده قرار گیرد.

واژه های کلیدی: نانو الیاف سلولزی (CNF)، کاه گندم، مصرف انرژی، ریفاینر، میکروفلوپداپرز.

مقدمه

نماید. با وجود این ویژگی‌های چشمگیر، چالش‌های فنی و اقتصادی مهمی در مسیر تولید صنعتی NFC وجود دارد. مهم‌ترین آن‌ها، مصرف انرژی بسیار زیاد در فرآیند فیبریلاسیون مکانیکی می‌باشد که بسته به نوع تجهیزات و ماده اولیه می‌تواند به بیش از ۲۰ هزار کیلووات ساعت بر تن برسد [۹، ۱۰]. این سطح از مصرف انرژی به‌ویژه برای کشورهایی که دسترسی گسترده به منابع انرژی ارزان ندارند، مانعی جدی برای مقیاس‌پذیری اقتصادی این فناوری محسوب می‌شود. همچنین انسداد تجهیزات جداکننده به علت درهم‌رفتگی الیاف بلند و نیاز به عبورهای چندباره از دستگاه، سبب افزایش هزینه‌های عملیاتی و زمان تولید می‌گردد. از سوی دیگر، استفاده از خمیر کاغذهای تجاری یا خالص‌سازی شدید ماده اولیه، فرآیندهای انرژی‌بر و پرهزینه‌ای همچون رنگ‌بری و حذف لیگنین را تحمیل می‌کند که هم هزینه نهایی تولید را افزایش داده و هم بار آلودگی محیط زیستی به همراه دارند [۱۱]. یکی از راهکارهای پیشنهادی برای غلبه بر این چالش‌ها، بهره‌گیری از منابع سلولزی غیرچوبی مانند کاه گندم می‌باشد [۱۲، ۱۳]. کاه گندم به‌عنوان پسماند کشاورزی فراوان در ایران و بسیاری از کشورهای جهان، دارای ساختار فیبری مناسبی برای استخراج میکروفیبریل‌های سلولزی می‌باشد. مطالعات نشان داده‌اند که دیواره سلولی الیاف غیرچوبی در مقایسه با الیاف چوبی، از تراکم کمتری برخوردار بوده و ساختاری متخلخل‌تری دارند و به دلیل چنین ویژگی‌هایی منجر به مصرف انرژی کمتر در فرآیند فیبریلاسیون می‌گردد [۱۴]. استفاده از این ماده نه تنها از نظر اقتصادی به‌صرفه می‌باشد، بلکه از منظر محیط زیستی نیز مزایای قابل توجهی دارد؛ زیرا به‌جای سوزاندن یا دفع این پسماندها،

سلولز به‌عنوان فراوان‌ترین پلیمر طبیعی روی زمین، ستون اصلی ساختار گیاهی و جزء اساسی دیواره سلولی در گیاهان به شمار می‌رود. ساختار خطی، قابلیت تشکیل پیوندهای هیدروژنی، پایداری مکانیکی و تجدیدپذیری از جمله عواملی هستند که سلولز را به ماده‌ای ارزشمند برای توسعه انواع فرآورده‌های زیست‌پایه تبدیل کرده‌اند [۱، ۲]. در سال‌های اخیر، گسترش فناوری نانو، امکان استفاده از این پلیمر در مقیاس نانومتری را فراهم کرده و منجر به معرفی موادی با خواصی کاملاً متفاوت تحت عنوان نانوسلولز می‌باشد. در میان انواع نانو سلولزها، نانو الیاف سلولزی (NFC) مورد توجه ویژه‌ای قرار گرفته‌اند. موادی که از طریق فیبریلاسیون مکانیکی الیاف سلولزی به دست می‌آیند و به‌واسطه سطح ویژه و مقاومت کششی، انعطاف‌پذیری، قابلیت زیست‌تخریب‌پذیر و توانایی تشکیل شبکه‌های فشرده هیدروژنی کاربردهای متعددی در صنایع پیشرفته پیدا کرده‌اند [۳-۵]. کاربردهای NFC به طیف وسیعی از حوزه‌ها گسترش یافته است که شامل صنایع بسته‌بندی زیست‌پایه، داروسازی، پزشکی، مواد غذایی، تجهیزات الکترونیکی، کامپوزیت‌های پلیمری و حتی هوافضا می‌شود [۶، ۷]. در صنعت بسته‌بندی، NFC جایگزین مناسبی برای پلیمرهای بر پایه نفت محسوب می‌شود چرا که علاوه بر ایجاد خواص مکانیکی برتر، سد مؤثری در برابر گازها، بخار آب و آلودگی‌های میکروبی ایجاد می‌کند [۸]. در حوزه نانو کامپوزیت‌ها، اضافه کردن مقادیر اندک NFC می‌تواند خواص فیزیکی و مکانیکی ماتریس را به‌طور معناداری بهبود بخشد، سفتی و استحکام را افزایش دهد و از گسترش ترک جلوگیری

^۱ Cellulose Nanofibers

شرایطی حاصل شد که انرژی مصرفی در کل فرآیند برابر با ۲۵۸ kWh/t بود. همچنین در طول این فرآیند، قطر نانو الیاف از حدود ۱۹ هزار به ۳۶ هزار نانومتر کاهش یافت [۱۹]. این نتایج بیانگر آن می‌باشد که انتخاب صحیح سطح انرژی پالایش نه تنها سبب کاهش مصرف انرژی کل فرآیند می‌شود بلکه ویژگی‌های مکانیکی نهایی NFC را نیز بهبود می‌دهد. بر این اساس، پژوهش حاضر با تمرکز بر بهینه‌سازی مصرف انرژی پالایشگر در فرآیند تولید الیاف و نانو الیاف سلولزی از کاه گندم در پی آن می‌باشد که با بررسی سیستماتیک پارامترهای پالایش، ارتباط میان شدت پالایش، ساختار الیاف، و انرژی مصرفی در مرحله فیبریلاسیون را تحلیل کند. هدف اصلی دستیابی به مدلی بهینه برای تولید NFC از منابع غیرچوبی با کمترین مصرف انرژی، بیشترین کارایی و قابلیت تعمیم در مقیاس صنعتی می‌باشد.

مواد و روش‌ها

مواد مورد استفاده

نمونه‌های کاه گندم از مزارع ایالت هامبورگ آلمان تهیه و پس از حذف برگ و ضایعات، توسط دستگاه خردکن ۵به قطعات کوچک تقسیم شدند. نمونه‌ها برای دستیابی به رطوبت تعادل، در شرایط کنترل شده آزمایشگاهی نگهداری و سپس در کیسه‌های پلاستیکی بسته‌بندی شدند. میزان رطوبت نمونه‌ها پیش از آزمایش به دقت اندازه‌گیری شد. همچنین، هیدروکسید سدیم مورد استفاده در فرآیند خمیر سازی از شرکت مرک آلمان ۶ تأمین گردید.

مراحل تهیه خمیر کاغذ

در این پژوهش، فرآیند خمیر سازی به روش سودا با قلیاییات محلول پخت ۱۶ درصد، مدت زمان پخت ۳۰ دقیقه، دمای پخت ۱۶۰ درجه سانتی‌گراد و نسبت مایع پخت به کاه گندم ۳:۱ در نظر گرفته شد. عملیات پخت با استفاده از دیگ پخت پاندیای ۸۰ لیتری در بخش شیمی چوب دانشگاه هامبورگ صورت گرفت و در هر بار پخت، ۲۵۰۰ گرم ماده اولیه بر پایه وزن خشک بکار گرفته شد.

می‌توان آن‌ها را به موادی با ارزش افزوده بالا مانند NFC تبدیل کرد. در کنار انتخاب ماده اولیه مناسب، به‌کارگیری پیش‌تیمارهای مکانیکی مانند پالایش، گام مهمی در بهینه‌سازی فرآیند تولید NFC به شمار می‌رود [۱۴، ۱۵]. پالایش مکانیکی با اعمال برش و فشار کنترل شده بر الیاف، باعث ایجاد رشته‌ای شدن داخلی و خارجی، کاهش طول الیاف و افزایش انعطاف‌پذیری آن‌ها می‌شود. این تغییرات ساختاری منجر به کاهش انسداد تجهیزات دفیبره‌کننده و در نتیجه کاهش انرژی مصرفی می‌گردد. دستگاه‌های پالایشگر نیمه‌صنعتی مانند PFI mill و Jokro mill این امکان را فراهم می‌کنند که شدت، مدت و انرژی پالایش به‌صورت دقیق کنترل شده و شرایط الیاف برای ورود به مرحله فیبریلاسیون بهینه شود. تحقیقات نشان داده‌اند که انتخاب مناسب پیش‌تیمار مکانیکی نه تنها باعث تسهیل جداسازی نانو الیاف می‌شود، بلکه می‌تواند کیفیت نهایی NFC را نیز حفظ یا حتی بهبود بخشد [۶، ۱۶، ۱۷]. Zimmermann و همکاران (۲۰۱۰)، انواع مختلف مواد لیگنوسلولزی از جمله ساقه گندم، تفاله چغندر و کتان را برای تولید NFC بررسی کردند. آن‌ها دریافتند که مواد غیرچوبی مانند ساقه گندم به دلیل ساختار متخلخل و بازتر دیواره سلولی، راحت‌تر فیبریله می‌شوند. در این مطالعه، اندازه ذرات الیاف پس از میکروفیبریلاسیون به ۸۰۰-۲۰۰ نانومتر رسید و تعداد عبورهای لازم از میکروفیلویدایزر برای کاه گندم کمتر از چوب بود. این یافته‌ها تأیید می‌کند که پیش‌تیمار مکانیکی همراه با انتخاب ماده اولیه غیرچوبی می‌تواند انرژی را تا ۴۰ درصد کاهش دهد [۱۸]. در تحقیقات دیگری نیز Moezzi pour و همکاران (۲۰۲۱)، طی پژوهشی تأثیر فرآیند خمیر سازی به روش سودا و پالایش مکانیکی به همراه سه مرحله میکروفیلویدایزر بر ویژگی‌های مکانیکی نانو الیاف سلولزی حاصل از کاه گندم را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان دادند که استفاده از این روش، شاخص کشش^۲ فیلم‌های نانو فیبریل لیگنوسلولزی^۳ (NFLC) را ۱۱۳/۵ N.m/g و شاخص ترکیبگی^۴ را به ۸/۵ kPa.m²/g رساند و این عملکرد در

² Tensile index

³ Nanofibrillated lignocellulose films

⁴ burst index

⁵ Cutter

⁶ Merck

به سمت جلو حرکت می‌کند و نمونه را به داخل مسیر حلقه‌ای هدایت می‌کند. دو نوع تیغه در طول مسیر قرار دارند و تیغه‌ای که در ابتدا قرار دارد تحت عنوان تیغه کمکی^۹ و تیغه دوم که کوچک‌تر می‌باشد، تیغه برهم کنش^{۱۰} نام دارد. مصرف انرژی دستگاه در تمامی مراحل عبور اندازه‌گیری گردید؛ به طوری که در فشار ۶۹ MPa (گذر اول و دوم) مصرف انرژی برابر با ۷۹ kWh/t و در فشار ۱۳۸ MPa (از گذر سوم تا ششم)، برابر با ۱۰۰ kWh/t گزارش شد. در پایان فرآیند، نمونه‌ها پیش از جمع‌آوری توسط مبدل حرارتی خنک شدند تا از افزایش دمای ناخواسته جلوگیری شود.

بررسی مورفولوژی سطح نانو الیاف سلولزی

برای تحلیل ساختار سطح نانو الیاف سلولزی، از میکروسکوپ الکترونی روبشی میدان گسیلی (FEI-SEM) مدل Quanta 250 ساخت شرکت FEI استفاده شد. تصاویر در بزرگ‌نمایی‌های ۲۰۰، ۵۰۰، ۱۰۰۰، ۵۰۰۰ و ۱۰۰۰۰ برابر ثبت گردید. به منظور جلوگیری از بار الکتریکی در سطح نمونه‌ها، پیش از تصویربرداری همه نمونه‌ها با لایه‌ای از طلا پوشش داده شدند.

ساخت فیلم‌های NFC

برای ساخت فیلم‌های NFC از دوغاب نانو الیاف سلولزی با غلظت ۰/۲۴ درصد استفاده شد. گراماژ هدف در این تحقیق ۳۰ g/m² تعیین شد. فرآیند شکل‌دهی با استفاده از دستگاه نیمه اتوماتیک Rapid-Köthen تحت خلأ انجام گرفت. دوغاب به داخل استوانه‌ای با غربال فلزی وارد شد که روی آن غشای فیلتر از جنس پلی‌آمید با سطح مقطع ۰/۰۳۱۷ و اندازه مش ۴۰۰ قرار داشت. پس از شکل‌گیری لایه اولیه، فیلم به مدت ۱۰ دقیقه در دمای ۹۳ درجه سانتی‌گراد و تحت خلأ ۲۰۰ bar خشک شد. سپس از توری جدا شده و به مدت ۲۴ ساعت در اتاق با شرایط رطوبت نسبی ۵۰ درصد و دمای ۲۲ درجه سانتی‌گراد نگهداری گردید.

پس از اتمام مرحله پخت، محتوای دیگ پخت پس از سرد شدن از طریق الک با اندازه ۲۰۰ مش تخلیه گردید تا مایع پخت از کاه گندم جدا شود. سپس خمیر کاغذهای حاصل با آب تحت فشار شسته شدند. برای اطمینان از حذف کامل مواد شیمیایی، نمونه‌ها برای چند دقیقه در آب غوطه‌ور شده و پس از آن تحت فشار مجدد شستشو شدند. در مرحله نهایی، برای جداسازی بسته‌های الیاف و تبدیل آن‌ها به الیاف منفصل از جداکننده الیاف آزمایشگاهی استفاده گردید. خمیر پخته‌شده تحت اثر نیروهای مکانیکی به الیاف مجزا تبدیل شد و سپس با غربال آزمایشگاهی دارای الک به قطر ۰/۱۵ میلی‌متر، الیاف قابل قبول از تراشه‌ها و وزده‌ها جدا شدند.

پیش تیمار مکانیکی خمیر کاغذ

پالایش با پالایشگر نیمه‌صنعتی Voith

برای انجام عملیات پالایش مکانیکی در مقیاس نیمه‌صنعتی از پالایشگر مدل LR40 ساخت شرکت Voith استفاده شد. برای هر مرحله پالایش، مقدار ۱۵۰۰ گرم خمیر کاغذ (بر پایه وزن خشک) به دستگاه افزوده شد. مقدار انرژی مصرفی در هر سطح پالایش از طریق رایانه متصل به دستگاه کنترل و ثبت گردید. در این پژوهش، برای دو نوع خمیر سودا، چهار سطح انرژی شامل (۱۳۰، ۱۷۰، ۲۵۰ و ۵۰۰ Kwh/t) در نظر گرفته شد. خمیر کاغذ پیش از آغاز پالایش با آب رقیق گردید تا به غلظت مشخصی برسد. سپس بدون اعمال انرژی در داخل مخزن به آرامی هم زده شد تا به دمای مطلوب برسد. پس از اعمال میزان مشخصی از انرژی، نمونه به صورت خودکار از دستگاه خارج و در ظرف جداگانه جمع‌آوری شد.

تولید نانو الیاف سلولزی

فرآیند نانوفیبریل‌کردن با استفاده از دستگاه میکروفلوئیدایزر مدل M-110 EH ساخت شرکت Microfluidics و با غلظت دوغاب معادل ۰/۲۴ درصد انجام گرفت. در قدم اول، پیستون مکنده نمونه را از داخل محفظه^۷ به سمت تیغه^۸ کوچک می‌کشد. سپس پیستون

⁹ Auxiliary

¹ Interaction

¹ Field Emission Scanning Electroh Microscope

⁷ Container

⁸ Chamber

اندازه‌گیری ویژگی‌های نانو کاغذهای سلولزی

(NFC)

ویژگی‌های مکانیکی و فیزیکی نانو کاغذهای سلولزی مطابق با استانداردهای معتبر بین‌المللی اندازه‌گیری شد. شاخص مقاومت به کشش و طول پارگی بر اساس TAPPI T 494 om-96، مقاومت در برابر ترکیدن طبق TAPPI T 403 om-01 ارزیابی گردید. همچنین، دانسیته بر پایه ISO 534، ضخامت طبق TAPPI T 411 om-97 و زبری سطح مطابق با TAPPI T 538 om-01 سنجیده شد.

طرح آماری

در این مطالعه، داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SPSS و آزمون ANOVA و دانکن تجزیه و تحلیل شدند. مقایسه میانگین‌ها در سطح اطمینان ۹۵٪ انجام شد. تعداد تیمارها ۲۴ و تعداد تکرار هر آزمون ۳ مرتبه بود.

نتایج

ویژگی نانو الیاف‌های سلولزی (CNF) حاصل از

خمیر کاغذ سودا بدون رنگ‌بری

آنالیز نانو الیاف‌های سلولزی پس از پیش تیمار با

ریفاینر

در ابتدا از خمیر کاغذهای سودا که تحت پیش تیمار ریفاینر با سطح مصرف انرژی ۹۰ kWh/t قرار گرفته بودند جهت عبور از میکروفلویدایزر و تولید CNF استفاده گردید؛ اما مشاهده شد که نمونه‌های سودا نیز با وجود شدت کمتر، منجر به مسدود شدن منافذ دستگاه شده و عبور دوغاب از میکروفلویدایزر را با مشکل مواجه می‌سازد؛ بنابراین، برای تولید نانو الیاف‌های سلولزی، از خمیر کاغذهایی استفاده گردید که سطح مصرف انرژی در مرحله پیش تیمار با ریفاینر بیش از ۹۰ kWh/t باشد.

پیش تیمار در سطح مصرف انرژی ۱۳۰ kWh/t

نتایج مربوط به نانو الیاف‌های سلولزی تولید شده از خمیر کاغذ سودا پس از پیش تیمار مکانیکی در سطح انرژی ۱۳۰ kWh/t در جدول ۱ نشان می‌دهد که تیمار شاهد، پایین‌ترین مقادیر در شاخص کشش، طول پارگی، شاخص ترکیدن، شفافیت و دانسیته را دارا می‌باشد. با انجام پیش تیمار مکانیکی و عبور مکرر دوغاب خمیر کاغذ از میکروفلویدایزر، مقادیر این ویژگی‌ها به‌طور معناداری افزایش یافت. افزایش تعداد دفعات عبور از دستگاه و به‌تبع آن، افزایش مصرف انرژی، تأثیر محسوسی در بهبود این ویژگی‌ها داشت. در مورد نانو الیاف‌های سلولزی سودا، بیشترین میزان شاخص کشش (۱۰۹ N.m/g) و طول پارگی (۱۱،۱۱ km) در مرحله پنجم عبور از دستگاه میکروفلویدایزر حاصل شد که در این مرحله انرژی مصرفی دستگاه برابر با ۴۵۸ kWh/t بود. همچنین، بیشترین مقدار شاخص ترکیدگی برای CNF‌های سودا برابر با ۹۰۹ kPa.m²/g به دست آمد که رسیدن به این مقدار مستلزم صرف انرژی کلی برابر با ۵۵۸ kWh/t میکروفلویدایزر بود. با توجه به مجموع مصرف انرژی ۵۸۸ kWh/t (شامل ریفاینر و میکروفلویدایزر)، افزایش شاخص کشش CNF‌های سودا به میزان ۲۱۶ درصد گزارش شد. علاوه بر این با افزایش انرژی مصرفی در میکروفلویدایزر، ضخامت و زبری نانو الیاف‌های سلولزی نیز به‌طور معناداری کاهش یافت؛ به‌طوری که در بالاترین سطح انرژی مصرفی، کمترین مقادیر برای CNF‌های سودا به ترتیب برابر با ۳۲ μm و ۱۷۳۲ ml/min به دست آمدند. بر اساس داده‌های جدول ۱، تیمارهای شاهد دارای درجه ماتی بالاتر و درصد شفافیت پایین‌تری نسبت به نمونه‌های فیبری له‌شده بودند. با هر بار عبور نمونه‌های سودا از میکروفلویدایزر، کاهش درجه ماتی و افزایش شفافیت در نانو الیاف‌های سلولزی مشاهده شد.

جدول ۱- نتایج CNF های سودا پس از پیش تیمار با ریفاینر در سطح مصرف انرژی ۱۳۰ kwh/t

ویژگی‌ها	شاهد	پیش تیمار	تعداد عبور از میکروفلوئیدایزر					
			۱	۲	۳	۴	۵	۶
شاخص کشش (Nm/g)	g۳۴/۴	f۵۰	e۵۶	d۶۶	c۷۷	c۹۶	a۱۰۹	b۱۰۷/۵
طول پارگی (km)	g۳/۵۱	f۵/۰۹	e۵/۷	d۶/۷۲	c۷/۸۴	c۹/۷۸	a۱۱/۱۱	b۱۰/۹۵
شاخص ترکیدن (kpm2/g)	f۱/۴	e۱/۵۸	d۳/۴	d۳/۵	c۵/۶	b۷/۷	a۷/۹	a۸/۱
درجه ماتی (%)	a۸۰/۵	b۷۵/۷۶	c۵۲/۸۸	d۴۸/۳۴	e۴۳/۶۴	f۳۹/۹۱	g۳۷/۵	c۴۸/۵۳
شفافیت	f۳۹/۲	e۴۳/۷۹	d۶۴/۴۱	c۶۷/۵۶	b۷۱/۱۹	a۷۴/۳۴	a۷۴/۹۹	c۶۷/۲۴
ضخامت (μm)	f۵۳	e۴۹	d۴۰	d۴۰	c۳۷/۷	b۳۵/۶	a۳۳/۲	a۳۲
دانسیته (g/cm3)	h۰/۴۹	g۰/۵۲	f۰/۵۶	e۰/۶۴	d۰/۷۱	c۰/۷۶	b۰/۷۸	a۰/۷۹
زبری (ml/min)	f۳۴۱۰	e۳۳۲۰	d۲۶۰۳	d۲۴۸۳	c۲۲۵۴	b۱۹۹۳	ab۱۸۲۰	a۱۷۳۲

سودا

پیش تیمار در سطح مصرف انرژی ۱۷۰ kwh/t

جدول ۲، نتایج مربوط به نانو الیاف‌های سلولزی تولیدشده از خمیرکاغذ سودا که تحت پیش تیمار مکانیکی ریفاینر در سطح مصرف انرژی ۱۷۰ kWh/t قرار گرفته و سپس شش مرحله که از میکروفلوئیدایزر عبور کرده‌اند را نشان می‌دهد. یافته‌ها نشان می‌دهند که افزایش مصرف انرژی در میکروفلوئیدایزر تأثیر معناداری بر افزایش شاخص کشش، طول پارگی، شاخص ترکیدن، شفافیت و دانسیته CNF های سودا دارد. از سوی دیگر این افزایش انرژی منجر به کاهش قابل توجه ماتی، ضخامت و زبری نانو الیاف‌های سلولزی نیز می‌شود. با مقایسه نمونه‌های شاهد و نمونه‌های فیبریل شده، مشخص است که نمونه‌های شاهد دارای درجه ماتی بیشتر و شفافیت کمتری هستند. پس از انجام پیش تیمار توسط ریفاینر، درجه ماتی کاهش یافته و شفافیت افزایش می‌یابد. این روند پس از هر مرحله عبور از میکروفلوئیدایزر ادامه می‌یابد، به گونه‌ای که کمترین مقدار ماتی و بیشترین مقدار شفافیت در مرحله ششم عبور از دستگاه حاصل می‌شود.

کاهش ماتی و افزایش شفافیت برای نانو الیاف‌های سودا به ترتیب ۵۰ و ۱۰۰ درصد گزارش شده است. بر اساس داده‌های جدول پس از پیش تیمار با انرژی ۱۷۰ kWh/t و سه مرتبه عبور از میکروفلوئیدایزر (با مجموع انرژی ۲۵۸۸ kWh/t) حداکثر شاخص کشش و طول پارگی برای

CNF های سودا به ترتیب برابر با ۱۱۳/۳ N.m/g و ۱۱۳/۳ km می‌باشد. در مجموع انرژی مصرفی ۴۸۲ kWh/t (شامل پالایشگر و میکروفلوئیدایزر)، نانو الیاف سلولزی سودا شاهد افزایش ۲۲۹ درصدی در شاخص کشش شدند. همچنین مقایسه جداول مربوط به دو سطح پیش تیمار انرژی ۱۳۰ kWh/t و ۱۷۰ (نشان می‌دهد که با افزایش انرژی پالایشگر، مقدار انرژی لازم در میکروفلوئیدایزر برای دستیابی به حداکثر شاخص کشش و طول پارگی، کاهش می‌یابد. این کاهش در مصرف انرژی معادل ۲۰۰ kWh/t برآورد شد. با افزایش مصرف انرژی در میکروفلوئیدایزر، شاخص ترکیدن نانو الیاف‌های سلولزی نیز افزایش یافته و در مرحله پنجم عبور از دستگاه به مقدار حداکثری $۸/۵ \text{ kPa.m}^2/\text{g}$ رسیده است، که در این مرحله انرژی مصرف شده در دستگاه معادل ۴۵۸ kWh/t می‌باشد. در سطح یکسان انرژی مصرفی کل (۴۸۲ kWh/t)، افزایش شاخص ترکیدن برای نانو الیاف‌های سلولزی سودا برابر با ۵۰ درصد گزارش شد. علاوه بر این، افزایش مصرف انرژی در پالایشگر تأثیر قابل توجهی بر کاهش ضخامت و زبری CNF داشت. در مرحله ششم عبور از میکروفلوئیدایزر، کمترین مقدار زبری برای CNF های سودا برابر با ۱۹۷۴ ml/min به دست آمد. در مجموع داده‌ها نشان می‌دهند که نانو الیاف‌های سلولزی حاصل از خمیر سودا دارای ضخامت و زبری کمتری نسبت به سایر نمونه‌ها می‌باشند.

جدول ۲- نتایج CNFهای سودا پس از پیش تیمار با ریفاينر در سطح مصرف انرژی ۱۷۰kWh/t

ویژگی‌ها	شاهد	پیش تیمار	تعداد عبور از میکروفلوئیدایزر					
			۱	۲	۳	۴	۵	۶
شاخص کشش (Nm/g)	g۳۴/۴	f۵۰/۷	e۸۲/۴	d۸۸	a۱۱۳/۵	b۹۶	c۹۰/۳۹	c۹۰/۶۳
طول پارگی (km)	g۳/۵۱	f۵/۱۶	e۸/۴	d۸/۹۷	a۱۱/۵۴	b۹/۷۸	c۹/۲۱	c۹/۲۳
شاخص ترکیب (kpm2/g)	d۱/۴	c۱/۷۲	b۳/۹	b۴	b۵/۹	a۸	a۸/۴	a۸/۸
درجه ماتی (/.)	a۸۰/۵	a۷۰/۲۱	b۵۰/۲۲	b۴۸/۷۱	b۴۸/۸۷	c۴۳/۴۳	d۴۱/۶۹	d۴۰/۲
شفافیت	e۳۹/۲	e۴۹/۹۵	d۶۷/۵۳	d۶۷/۶۱	bc۷۱/۳۸	c۷۰/۶۶	b۷۲/۹۳	a۷۶/۱۱
ضخامت (μm)	e۵۳	d۴۹/۴	c۴۴	b۴۱/۴	b۴۱	b۳۷/۲	b۳۶	a۲۹/۸
دانسیته (g/cm3)	f۰/۴۹	e۰/۵۱	d۰/۶۵	d۰/۶۶	c۰/۷۸	b۰/۷۶	a۰/۷۹	a۰/۸۱
زبری (ml/min)	f۳۴۱۰	e۳۲۲۸	d۲۶۳۶	c۲۵۹۸	c۲۴۷۶	b۲۲۶۳	b۲۱۸۲	a۱۹۷۴

سودا

به‌عنوان مثال، برای دستیابی به افزایش ۲۲۷ درصدی در شاخص کشش و افزایش ۴۰۰ درصدی در شاخص ترکیب CNFهای سودا به مجموع انرژی مصرفی معادل ۸۰۸kWh/t نیازمند می‌باشد. همان‌گونه که در جدول ۳ مشخص است، بیشترین میزان ضخامت و زبری به نمونه‌های شاهد اختصاص دارد که این مقادیر برای نمونه‌های سودا به ترتیب برابر با ۵۳ میکرومتر و ۳۴۱۰ میلی‌لیتر بر دقیقه گزارش شده است. در مقابل، با افزایش تعداد دفعات عبور از دستگاه میکروفلوئیدایزر، کاهش معناداری در ضخامت و زبری CNFها مشاهده می‌شود. کمترین مقادیر ضخامت و زبری مربوط به مرحله ششم عبور از میکروفلوئیدایزر هستند که برای CNFهای سودا به ترتیب ۲۶۰۷ میکرومتر و ۱۸۷۴ میلی‌لیتر بر دقیقه گزارش شده‌اند.

پیش تیمار در سطح مصرف انرژی ۲۵۰kWh/t

نتایج مربوط به نانو الیاف‌های تولیدشده از خمیر کاغذ سودا که تحت پیش تیمار مکانیکی با مصرف انرژی kWh/t ۲۵۰ قرار گرفته‌اند در جدول ۳، ارائه می‌شود. بر اساس یافته‌های جدول ۳، بیشترین مقادیر شاخص کشش، طول پارگی و شاخص ترکیب در نانو الیاف‌های سلولزی سودا مربوط به عبور از مرحله ششم دستگاه میکروفلوئیدایزر می‌باشد. این مرحله متناظر با بیشترین میزان انرژی مصرفی در دستگاه میکروفلوئیدایزر است. نتایج نشان می‌دهد که افزایش مصرف انرژی ریفاينر از ۱۷۰kWh/t به ۲۵۰kWh/t تأثیری بر کاهش انرژی مصرفی در میکروفلوئیدایزر یا بهبود مقاومت‌های مکانیکی CNFها نداشته است. در واقع، مقایسه نتایج با پیش تیمار سطح ۱۷۰kWh/t نشان می‌دهد که افزایش انرژی پالایشگر منجر به افزایش بیشتر شاخص‌های مکانیکی نشده است.

جدول ۳- نتایج CNFهای سودا پس از پیش تیمار با ریفاينر در سطح مصرف انرژی ۲۵۰kWh/t

ویژگی‌ها	شاهد	پیش تیمار	تعداد عبور از میکروفلوئیدایزر					
			۱	۲	۳	۴	۵	۶
شاخص کشش (Nm/g)	h۳۴/۴	g۵۱/۱۷	f۸۲	e۸۹	d۹۲	c۹۷/۵	b۱۰۵/۸	a۱۱۲/۸
طول پارگی (km)	h۳/۵۱	g۵/۲۱	f۸/۳۵	e۹/۰۷	d۹/۳۷	ac۹/۹۳	b۱۰/۷۸	a۱۱/۴۹
شاخص ترکیب (kpm2/g)	e۱/۴	d۱/۹۳	cd۳	bc۴/۱	b۴/۹	a۶/۸	a۶/۹	a۷
درجه ماتی (/.)	a۸۰/۵	b۷۰	c۵۱/۷۲	d۴۸/۶۳	e۴۲/۲۲	f۳۷/۶	g۳۴/۷	e۴۳/۷۹
شفافیت	e۳۹/۲	d۵۰	c۶۵/۳۸	c۶۶/۸	b۷۲/۱۷	a۷۵/۱۸	a۷۵/۲	b۷۰/۴۲
ضخامت (μm)	f۵۳	e۴۹	d۳۸/۲	c۳۴/۶	bc۳۳/۲	b۳۲	b۳۱/۵	a۲۶/۷
دانسیته (g/cm3)	g۰/۴۹	f۰/۵۳	e۰/۶۶	d۰/۷۴	c۰/۷۷	c۰/۷۸	b۰/۸۰	a۰/۸۳
زبری (ml/min)	e۳۴۱۰	d۲۴۵۵	d۲۳۹۹	cd۲۳۳۵	bc۲۲۰۰	ab۲۰۵۵	a۱۹۳۶	a۱۸۷۴

سودا

پیش تیمار در سطح مصرف انرژی ۵۰۰ kWh/t

انرژی بیشتر نه تنها منجر به بهبود این ویژگی‌ها نگردیده بلکه موجب کاهش شاخص‌های مکانیکی نیز شده است. شاخص ترکیدن CNFهای سودا با افزایش تعداد دفعات عبور از میکروفلویدایزر روند افزایشی داشته و در مرحله ششم عبور با مصرف انرژی ۵۵۸kWh/t، به حداکثر مقدار خود یعنی ۹/۶ kPa.m²/g می‌رسد. همچنین، مشخص شد که برای دستیابی به افزایش ۲۲۹ درصدی در شاخص کشش و شاخص ترکیدن CNFهای سودا، مجموع انرژی مصرف شده در پالایشگر و میکروفلویدایزر به ترتیب برابر با ۸۵۸kWh/t و ۱۰۵۸kWh/t می‌باشد.

جدول ۴، نتایج حاصل از نانو الیاف سلولزی تولیدشده از خمیرکاغذ سودا را که تحت پیش تیمار مکانیکی با مصرف انرژی ۵۰۰kWh/t قرار گرفته‌اند، ارائه می‌دهد. بر اساس نتایج، افزایش تعداد دفعات عبور دوغاب خمیرکاغذ از میکروفلویدایزر تأثیر معناداری بر ویژگی‌های مکانیکی، فیزیکی و نوری نانو الیاف سلولزی (CNF) دارد. بیشینه شاخص کشش (۱۱۳/۴ N.m/g) و طول پارگی (۱۱/۵۶ km) برای CNFهای سودا پس از سه مرتبه عبور از میکروفلویدایزر و با مصرف انرژی ۲۵۸kWh/t حاصل شده است. پس از این نقطه، افزایش دفعات عبور و مصرف

جدول ۴- نتایج CNFهای سودا پس از پیش تیمار با ریفاینر در سطح مصرف انرژی ۵۰۰kWh/t

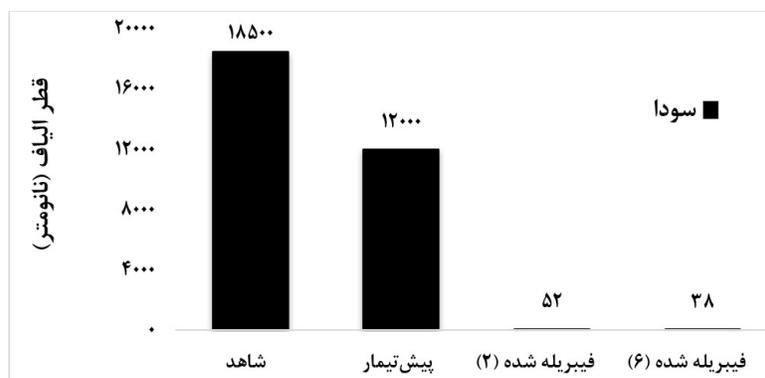
تعداد عبور از میکروفلویدایزر						پیش تیمار	شاهد	ویژگی‌ها
۶	۵	۴	۳	۲	۱			
d۸۷/۹	d۸۶/۴	b۱۱۲/۴	a۱۱۳/۴	c۹۹/۲	c۹۸/۵	e۵۷/۲	f۳۴/۴	شاخص کشش (Nm/g)
d۸/۹۶	d۸/۸۰	b۱۱/۴۵	a۱۱/۵۶	c۱۰/۱۱	c۱۰/۰۴	e۵/۸۳	f۳/۵۱	طول پارگی (km)
a۸/۵	ab۸/۲	ab۸	b۷/۴	b۷/۲	c۴/۷	d۲	c۱/۴	شاخص ترکیدن (kpam ² /g)
c۴۶	e۳۶/۵	d۴۳/۷۷	cd۴۵/۵۳	cd۴۵/۴۵	c۴۶	b۴۸/۴۳	a۸۰/۵	درجه ماتن (/.)
a۷۰/۴	a۷۰/۸۳	a۶۹/۹۸	a۷۰/۰۵	a۶۹/۹۴	b۶۴/۹۱	c۵۷/۰۴	d۳۹/۲	شفافیت
a۳۱	a۳۲	b۳۴	c۳۶	c۳۷	d۴۰	e۴۸	f۵۳	ضخامت (μm)
a۰/۸۰	b۰/۷۸	b۰/۷۸	c۰/۷۱	d۰/۶۸	e۰/۶۳	f۰/۵۷	۰g/۴۹	دانسیته (g/cm ³)
a۱۸۰۰	b۱۹۸۹	b۲۰۰۴	c۲۵۲۴	c۲۵۹۰	d۲۶۳۴	d۲۹۸۰	c۳۴۱۰	زبری (ml/min)

میانگین قطر الیاف نمونه سودا بعد از ۲ مرحله عبور (۱۵۸ kWh/t) از میکروفلویدایزر به ۵۲ نانومتر و بعد از ۶ مرحله گذر (۵۵۸ kWh/t) به ۳۸ نانومتر می‌رسد. یافته‌ها نشان می‌دهد که افزایش انرژی پیش تیمار مکانیکی تا ۵۰۰kWh/t، تأثیر قابل توجهی در کاهش قطر نداشت و نسبت به پیش تیمار با ۱۷۰kWh/t تفاوت محسوسی مشاهده نشد. تصاویر میکروسکوپی مربوط به نانو الیاف‌های سلولزی سودا قبل و بعد از میکروفلویدایزر در شکل ۲ نشان داده شده است.

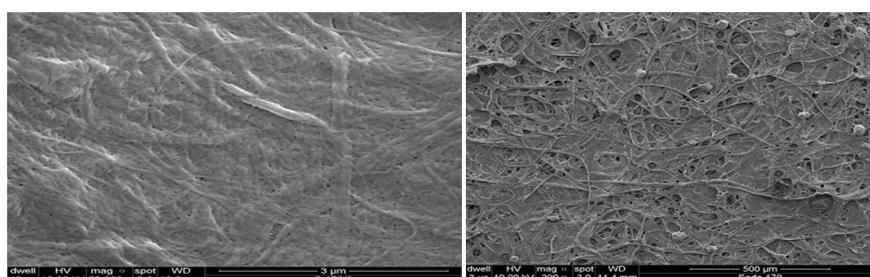
بررسی مورفولوژیک نانو الیاف سلولزی سودا بدون رنگ‌بری پس از پیش تیمار با ریفاینر

بررسی مورفولوژی نمونه‌های شاهد، پیش تیمار شده با ریفاینر (۱۷۰kWh/t) و میکروفیبریل شده با میکروفلویدایزر

شکل ۱، نتایج اندازه‌گیری قطر ۱۰۰ نمونه از الیاف را نشان دهد. میانگین قطر نمونه سودا بعد از پیش تیمار ریفاینر (۱۷۰ kWh/t) برابر با ۱۲ میکرومتر می‌باشد.

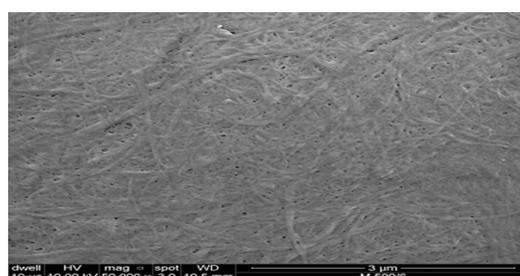


شکل ۱- ابعاد الیاف شاهد، پیش تیمار شده و نانو فیبریل شده



(ب)

(الف)



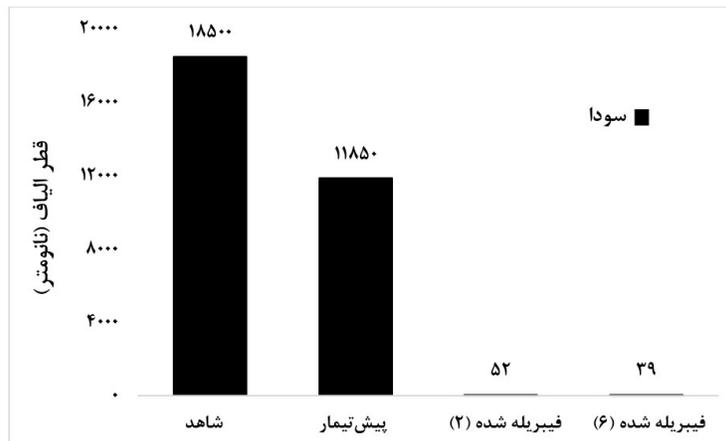
(ج)

شکل ۲- الف: میکروفیبر سلولزی سودا بعد از پیش تیمار ریفاینر (۱۷۰ kwh/t). ب: نانو الیاف سلولزی سودا (گذر ۲). ج: نانو الیاف سلولزی سودا (گذر ۶)

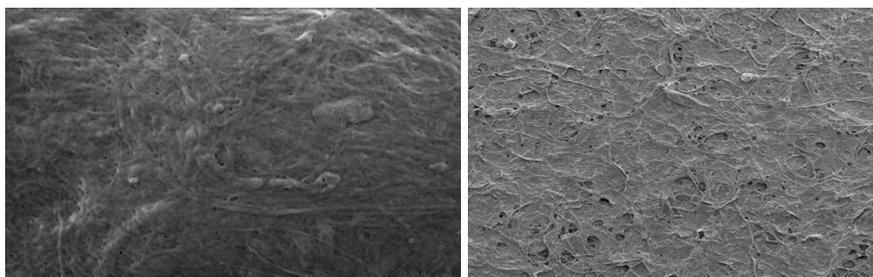
نانومتر و پس از شش مرحله عبور (۵۵۸kWh/t) حدود ۴۶ نانومتر بود. نتایج نشان می‌دهد که افزایش مصرف انرژی در مرحله پیش تیمار مکانیکی به ۵۰۰ kwh/t، تاثیری بر کاهش قطر الیاف نسبت به زمانی که مصرف انرژی در ریفاینر ۱۷۰ kwh/t می‌باشد ندارد. تصاویر میکروسکوپی مربوط به نانو الیاف‌های سلولزی سودا قبل و بعد از میکروفلویدایزر در شکل ۴ نشان داده شده است.

بررسی مورفولوژی نمونه‌های سودا شاهد، پیش تیمار شده با ریفاینر (۵۰۰kWh/t) و میکروفیبریل شده بدون رنگبری

شکل ۳، نتایج اندازه‌گیری قطر ۱۰۰ نمونه از الیاف سودا را نشان می‌دهد. میانگین قطر الیاف پس از پیش تیمار با ریفاینر (۵۰۰kWh/t) حدود ۱۲ میکرومتر، پس از دو مرحله عبور از میکروفلویدایزر (۱۵۸ kWh/t) ۵۲

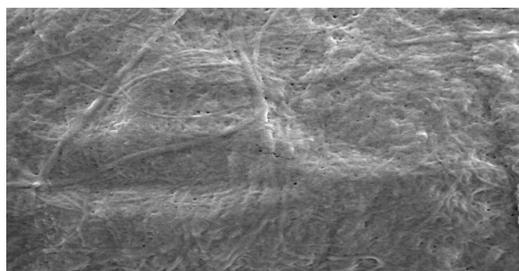


شکل ۳- اندازه قطر الیاف شاهد، پیش تیمار شده و نانو فیبریل شده



(ب)

(الف)



(ج)

شکل ۴- الف: میکروفیبر سلولزی سودا بعد از پیش تیمار ریفاپر (۵۰۰ kwh/t). ب: نانو الیاف سلولزی سودا (گذر ۲). ج: نانو الیاف سلولزی سودا (گذر ۶)

بحث و تحلیل نتایج

بررسی نتایج جداول ۱ تا ۴ نشان می‌دهد که مقاومت کششی نانو کاغذها بازتابی از میزان و قدرت پیوندهای هیدروژنی بین نانو الیاف در ساختار ورق می‌باشد. افزایش تعداد و استحکام این پیوندها که وابسته به سطح تماس بیشتر و مقاومت ذاتی نانو الیاف است، موجب بهبود قابل توجه ویژگی‌های مکانیکی نانو کاغذ می‌شود. روند افزایشی در فیبریلاسیون، چه از طریق مصرف انرژی

بیشتر در میکروفلوئیدایزر و چه از طریق پیش تیمار مکانیکی، بهبود قابل توجهی در مقاومت کششی نانو کاغذها ایجاد می‌کند. این بهبود به دلایلی از جمله افزایش سطح مخصوص نانو الیاف (در اثر کاهش ابعاد) و بالا رفتن تعداد گروه‌های هیدروکسیل منجر به پیوندهای هیدروژنی بیشتر، افزایش درهم‌رفتگی فیزیکی نانو الیاف و کاهش نقاط ضعف ساختاری در مقایسه با میکروفیبریل‌ها نسبت داده می‌شود [۲۰، ۱۹]. یافته‌ها نشان می‌دهند که با

دانسیته بین 0.99 g/cm^3 تا 0.82 ، ضخامت بین $6/6 \mu\text{m}$ تا 4 و ماتی بین 80 تا $79/9$ درصد را گزارش کردند [۳]. در رابطه با تحلیل مورفولوژیک نانو الیاف سلولزی تولید شده از خمیر کاغذ سودا و بررسی شکل‌های ۱ تا ۴؛ طبق گزارش Alemdar (۲۰۰۸)، قطر نانو الیاف سلولزی استخراج‌شده از کاه گندم پس از ۲۰ مرحله عبور از دستگاه همگن‌ساز در بازه‌ای بین ۱۰ تا ۸۰ نانومتر و با طولی در مقیاس چندین هزار نانومتر قرار داشت [۲۳]. Spence و همکاران (۲۰۱۱) نیز در پژوهش خود به این نتیجه رسیدند که قطر میکروفیبریل‌های سلولز (MFC) تولیدشده از خمیرهای حاوی لیگنین، مستقل از نوع ماده اولیه به‌طور قابل توجهی بزرگ‌تر می‌باشد؛ به‌طوری که قطر MFC حاصل از خمیر کاغذ سوزنی‌برگ رنگ‌بری نشده با ۹ درصد لیگنین برابر با ۳۱ نانومتر و برای خمیر حاوی ۱۴ درصد لیگنین معادل ۳۴ نانومتر گزارش شد [۲]. این یافته‌ها بیانگر تأثیر مستقیم میزان لیگنین باقیمانده در خمیر بر قطر نانو الیاف تولیدی می‌باشد. در همین راستا، Jonoobi و همکاران (۲۰۰۹) طی بررسی‌هایی بر روی نانو الیاف استخراج‌شده از خمیر کاغذ رنگ‌بری نشده کنف، پس از اعمال پیش تیمار مکانیکی و ۴۰ بار عبور از هموژنایزر، قطر نانو الیاف را در محدوده ۱۰ تا ۹۰ نانومتر و طول آن‌ها را در محدوده میکرومتری گزارش کردند؛ که تأکیدی است بر اهمیت تعداد مراحل فیبریلاسیون در دستیابی به ساختارهای نانومقیاس [۲۴]. همچنین، در پژوهش Ferrer و همکاران (۲۰۱۲)، نانو الیاف سلولزی تهیه‌شده از خمیر راش رنگ‌بری نشده، پس از پیش تیمار شیمیایی با اسید و پیش تیمار مکانیکی با ریفاینر تا رسیدن به درجه روانی SR ۹۰ و عبور از میکروفلویدایزر به تعداد ۵ بار، دارای قطری در حدود ۲۰ نانومتر بودند. این نتایج به‌وضوح نقش تعیین‌کننده‌ی ترکیب پیش‌تیمارهای شیمیایی و مکانیکی در کاهش قطر نانو الیاف و ارتقاء ساختار آن‌ها را نشان می‌دهد [۲۵].

نتیجه گیری

در این پژوهش، تأثیر مصرف انرژی در مراحل پالایش مکانیکی و فیبریلاسیون بر خواص فیزیکی و مکانیکی نانو الیاف سلولزی (CNF) حاصل از کاه گندم بدون رنگ‌بری

افزایش انرژی مصرفی در میکروفلویدایزر، شاخص کشش و طول پارگی افزایش می‌یابد؛ اما عبورهای بیش‌ازحد، صرفاً منجر به افزایش مصرف انرژی شده و در برخی موارد باعث آسیب به ساختار الیاف و افت خواص مکانیکی می‌شود [۳]. بهینه‌ترین تیمار برای نمونه‌های سودا، ترکیب مصرف انرژی 170 kWh/t در ریفاینر و 258 kWh/t در میکروفلویدایزر بود که در مجموع 428 kWh/t انرژی مصرف کرد و منجر به دستیابی به شاخص کشش 1.48 N.m/g و $113/5$ و طول پارگی $11/56 \text{ km}$ گردید. مقایسه‌ای با پژوهش Spence و همکاران (۲۰۱۱) نشان می‌دهد که با مصرف انرژی بسیار بیشتر (3119 kWh/t تا 2200)، شاخص کشش به 138 تا 148 N.m/g رسید [۳]. همچنین در پژوهش Ankerfors (۲۰۱۲)، مقاومت کششی در CNF‌های حاصل از خمیر سولفیت سفید شده به 170 MPa با مصرف انرژی 2221 kWh/t گزارش شد. از نظر شاخص ترکیدن، نتایج نشان می‌دهند که با افزایش انرژی، انعطاف‌پذیری و اتصالات بین الیاف بیشتر شده و شاخص ترکیدن بهبود می‌یابد [۲۱]. بیشینه مقدار این شاخص برای CNF سودا برابر $8/8 \text{ kPa}\cdot\text{m}^2/\text{g}$ بود که در شرایط 170 kWh/t (ریفاینر) و 458 kWh/t (میکروفلویدایزر) حاصل شد. بررسی ویژگی‌های نوری نشان می‌دهد که با افزایش میزان فیبریلاسیون، ماتی نانو کاغذها کاهش و شفافیت آن‌ها افزایش می‌یابد. دلیل این امر، کاهش اندازه ذرات به مقیاس کمتر از طول موج نور مرئی و همچنین کاهش ناهمواری سطح می‌باشد [۲۲]. بیشینه شفافیت برای نمونه‌های سودا در این مطالعه $76/11$ درصد به دست آمد. همچنین با افزایش مراحل عبور از میکروفلویدایزر، ضخامت نانو کاغذها کاهش یافته و ساختار آن‌ها متراکم‌تر می‌شود. بیشترین تراکم و کمترین ضخامت مربوط به تیمار با بیشترین مصرف انرژی می‌باشد. افزایش انرژی مصرفی همچنین موجب افزایش دانسیته ساختاری شده است. در شرایط یکسان، CNF‌های سودا دارای دانسیته بیشتر، ضخامت بالاتر و زبری کمتر نسبت به سایر تیمارها بودند. به‌عنوان مقایسه، Spence و همکاران (۲۰۱۱) در نمونه‌های استخراج‌شده از خمیر کاغذ پهن برگان با مصرف انرژی 3100 kWh/t تا 2200 ،

- processing methods. *Cellulose*, 18(4), pp.1097-1111. <http://dx.doi.org/10.1007/s10570-011-9533-z>
- [4] Isogai, A., Saito, T. and Fukuzumi, H., 2011. TEMPO-oxidized cellulose nanofibers. *nanoscale*, 3(1), pp.71-85. <https://doi.org/10.1039/CONR00583E>
- [5] Ismaeilimoghadam, S., Mahdavi, S., Pourhashemi, M., Shahraki, A. and Jonoobi, M., 2024. Mono Ethanol Amine (MEA) Pulping of Wheat Straw: An Environmentally Friendly Suggestion for the Fluff Pulp Production. *Journal of Renewable Materials*, 12(10), p.1771. <http://dx.doi.org/10.32604/jrm.2024.054888>
- [6] Bita Moezzi-pour, Aida Moezzi-pour, Mohammad Ahmadi, Farajolah Hajializadeh, 2022. 'Structural properties and thermal stability of nano crystalline cellulose produced from waste paper', *Iranian Journal of Wood and Paper Industries*, 13(1), pp.37-47. magiran.com/p2449462. (in persian) <https://www.magiran.com/p2449462>
- [7] Chen, T., Xie, Y., Wei, Q., Wang, A., Hagman, O., Karlsson, O. and Liu, J., 2016. Effect of refining on physical properties and paper strength of *Pinus massoniana* and *China fir* cellulose fibers. *BioResources*, 11(3), pp.7839-7848. <http://dx.doi.org/10.15376/biores.11.3.7839-7848>
- [8] Liu, Z., Wang, H. and Hui, L., 2018. Pulping and papermaking of non-wood fibers. *Pulp and paper processing*, 1, pp.4-31. <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.79017>
- [9] Banavath, H.N., Bhardwaj, N.K. and Ray, A.K., 2011. A comparative study of the effect of refining on charge of various pulps. *Bioresource Technology*, 102(6), pp.4544-4551. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.12.109>
- [10] Djafari Petroudy, S.R., Chabot, B., Loranger, E., Naebe, M., Shojaeiarani, J., Gharekhani, S., Ahvazi, B., Hu, J. and Thomas, S., 2021. Recent advances in cellulose nanofibers preparation through energy-efficient approaches: A review. *Energies*, 14(20), p.6792. <https://doi.org/10.3390/en14206792>
- [11] Salehi, K., Kordsachia, O. and Patt, R., 2014. Comparison of MEA/AQ, soda and soda/AQ pulping of wheat and rye straw. *Industrial crops and products*, 52, pp.603-610. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2013.11.014>
- [12] Ghaffar, S.H., 2019. Wheat straw biorefinery for agricultural waste valorisation. <https://doi.org/10.1680/jgrma.19.00048>
- [13] FAO. (2022). Global wheat production statistics. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- [14] Yang, H., Duan, Y., Wang, Z., Lu, D., Xu, T., Xie, H., Gao, M. and Si, C., 2025. Eco-friendly production of cellulose nanocrystals from corn straw through combined enzyme pretreatment, mild homogenization, and enzymolysis. *Industrial Crops*
- بررسی شد. هدف اصلی، تعیین شرایط بهینه برای تولید CNF با کیفیت بالا و مصرف انرژی بهینه بود. نتایج نشان داد که افزایش انرژی مصرفی در میکروفلولویدایزر تا یک حد مشخص (۲۵۸ kWh/t) به بهبود قابل توجه در شاخص‌های مکانیکی نظیر کشش، طول پارگی و ترکیب منجر می‌شود. با این حال، مصرف انرژی بیشتر از این مقدار، نه تنها بهبود اضافی ایجاد نمی‌کند، بلکه در مواردی باعث افت خواص مکانیکی نیز می‌شود. بهینه‌ترین ترکیب فرآیندی با مصرف انرژی ۱۷۰ kWh/t در ریفاینر و سه مرحله عبور از میکروفلولویدایزر (۲۵۸ kWh/t) به دست آمد که با حذف مرحله رنگ‌بری، شاخص کشش به بیش از ۱۱۳ N.m/g و طول پارگی به ۱۱۵ km افزایش یافت. این نتایج نشان می‌دهد که با حذف مراحل پرهزینه و انرژی‌بر نظیر رنگ‌بری و خالص‌سازی، می‌توان ضمن حفظ یا حتی ارتقاء کیفیت CNF، فرآیند تولید را اقتصادی‌تر و زیست‌سازگارتر کرد. این موضوع برای توسعه صنعتی نانو الیاف سلولزی از منابع غیرچوبی اهمیت ویژه‌ای دارد و می‌تواند مسیر را برای تولید گسترده‌تر و پایدارتر این مواد هموار کند. پیشنهاد می‌شود در ادامه، تأثیر پیش‌تیمارهای زیست‌سازگار مانند آنزیم‌ها یا اکسیداسیون TEMPO بر فرآیند فیبریلاسیون بررسی‌شده و مقایسه‌ای میان جنبه‌های انرژی، هزینه و محیط‌زیست در روش‌های مختلف تولید CNF انجام گیرد. همچنین ارزیابی عملکرد صنعت NFC در کاربردهایی مانند بسته‌بندی زیست‌تخریب‌پذیر یا نانو کامپوزیت‌ها می‌تواند زمینه‌ساز توسعه‌های کاربردی آینده باشد.

منابع

- [1] Ghaffar, S.H. and Fan, M., 2013. Structural analysis for lignin characteristics in biomass straw. *Biomass and bioenergy*, 57, pp.264-279. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.07.015>
- [2] Gharekhani, S., Sadeghinezhad, E., Kazi, S.N., Yarmand, H., Badarudin, A., Safaei, M.R. and Zubir, M.N.M., 2015. Basic effects of pulp refining on fiber properties—A review. *Carbohydrate polymers*, 115, pp.785-803. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2014.08.047>
- [3] Spence, K.L., Venditti, R.A., Rojas, O.J., Habibi, Y. and Pawlak, J.J., 2011. A comparative study of energy consumption and physical properties of microfibrillated cellulose produced by different

- nanopaper structures of high toughness. *Biomacromolecules*, 9(6), pp.1579-1585. <https://doi.org/10.1021/bm800038n> Ankerfors, M., 2012. Microfibrillated cellulose: Energy-efficient preparation techniques and key properties (Doctoral dissertation, KTH Royal Institute of Technology). <https://urn:nbn:se:kth:diva-15922>
- [21] Lahti, J., Dauer, M., Hirn, U., Lahti, J. and Hirn, U., 2016, August. Linking paper structure to tensile deformation and fracture initiation. In *Progress in Paper Physics Seminar 2016 Conference Proceedings*, Darmstadt (pp. 71-75). <http://www.tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/5636>
- [22] Alemdar, A. and Sain, M., 2008. Isolation and characterization of nanofibers from agricultural residues—Wheat straw and soy hulls. *Bioresource technology*, 99(6), pp.1664-1671. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.04.029>
- [23] Jonoobi, M., Mathew, A.P. and Oksman, K., 2012. Producing low-cost cellulose nanofiber from sludge as new source of raw materials. *Industrial Crops and Products*, 40, pp.232-238. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2012.03.018>
- [24] Ferrer, A., Quintana, E., Filpponen, I., Solala, I., Vidal, T., Rodríguez, A., Laine, J. and Rojas, O.J., 2012. Effect of residual lignin and heteropolysaccharides in nanofibrillar cellulose and nanopaper from wood fibers. *Cellulose*, 19(6), pp.2179-2193. <http://dx.doi.org/10.1007/s10570-012-9788-z>
- and *Products*, 224, p.120397. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.120397>
- [15] Talaei Poor, M., 2009. Effect of refining of deinked pulp on the optical, physical and mechanical properties of paper. *Iranian Journal of Wood and Paper Science Research*, 24(1), pp.148-157. (in persian) <https://doi.org/10.22092/ijwpr.2009.117364>
- [16] Ahmadi, M., Hedjazi, S. and Salehi, K., 2017. Effect of beating time on the properties of soda and monoethanolamine pulp from wheat straw. <https://www.magiran.com/p1691867>
- [17] Hawanis, H.S.N., Ilyas, R.A., Jalil, R., Ibrahim, R., Majid, R.A. and Ab Hamid, N.H., 2024. Insights into lignocellulosic fiber feedstock and its impact on pulp and paper manufacturing: A comprehensive review. *Sustainable Materials and Technologies*, 40, p.e00922. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2024.e00922>
- [18] Zimmermann, T., Bordeanu, N. and Strub, E., 2010. Properties of nanofibrillated cellulose from different raw materials and its reinforcement potential. *Carbohydrate polymers*, 79(4), pp.1086-1093. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2009.10.045>
- [19] Moezzi-pour, B., Hedjazi, S., Yousefi, H. and Ahmadi, M., 2021. The influence of pulping process and energy consumption on properties of nanofibrillated lignocellulose (NFLC) films isolated from wheat straw. *Drvna industrija*, 72(4), pp.327-336 <https://doi.org/10.5552/drvind.2021.2025> .
- [20] Henriksson, M., Berglund, L.A., Isaksson, P., Lindström, T. and Nishino, T., 2008. Cellulose