

بررسی روش‌های تولید نانوسلولز و انواع آن، جهت تقویت ناکامپوزیت‌های پلیمری

مصطفی یحیوی دیزج^۱

^۱ دانشجوی دکتری فرآورده‌های مرکب چوب دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

چکیده

سلولز درشت مولکولی زیستی با ویژگی بالا تجدیدشوندگی، زیست سازگاری و زیست تخریب پذیری است، ضمن آن که به عنوان فراوان ترین زیست پلیمر موجود بر روی کره زمین نیز شناخته شده است. در مقایسه با بسیاری از انواع نانو ذرات قابل مقایسه، نانوسلولز آسان تر و از منابع ارزان قیمتی به دست می آید که فراوانی بالایی دارند. نانوسلولز دارای ضریب لاغری قابل توجه و استحکام ویژه بسیار بالایی است، همچنین مقاومت شیمیایی و حرارتی مطلوبی دارد و نیز زیست سازگاری آن ثابت شده است. ضریب لاغری (نسبت طول به قطر) نانوذرات سلولزی بسته به منبع اولیه مورد استفاده و نیز روش تهیه می تواند بسیار متفاوت باشد. و این نسبت گاه از حدود ۳۰ تا ۱۵۰ تغییر می کند. نانوسلولز به سه روش مکانیکی، شیمیایی - مکانیکی و آنزیمی تولید می شود. نانوسلولزها شامل سلولز میکروکریستالی، سلولز میکروفیبریل شده، سلولز نانوفیبریل شده و سلولز نانوکریستالی می باشند. بنابراین استفاده از نانوسلولز به دلیل مزایای بی شمار شناخته شده ای از قبیل قیمت پایین، قابل دسترس بودن در سراسر جهان، زیست تخریب پذیر بودن، سفتی بالا و خواص مکانیکی خوب جهت تقویت ساختار نانوکامپوزیت های پلیمری مورد توجه محققین بوده و گزارشات متعددی پیرامون آن منتشر شده است. همچنین کامپوزیت های تمام سلولزی نگرانی های زیست محیطی نداشته و در طبیعت به راحتی از بین می رود و خواص مکانیکی خوبی را نیز از خود نشان می دهد.

واژه های کلیدی: نانوسلولز، روش های تولید نانوسلولز، انواع نانوسلولز، تقویت نانوکامپوزیت ها

Mostafa.yahyavi@yahoo.com

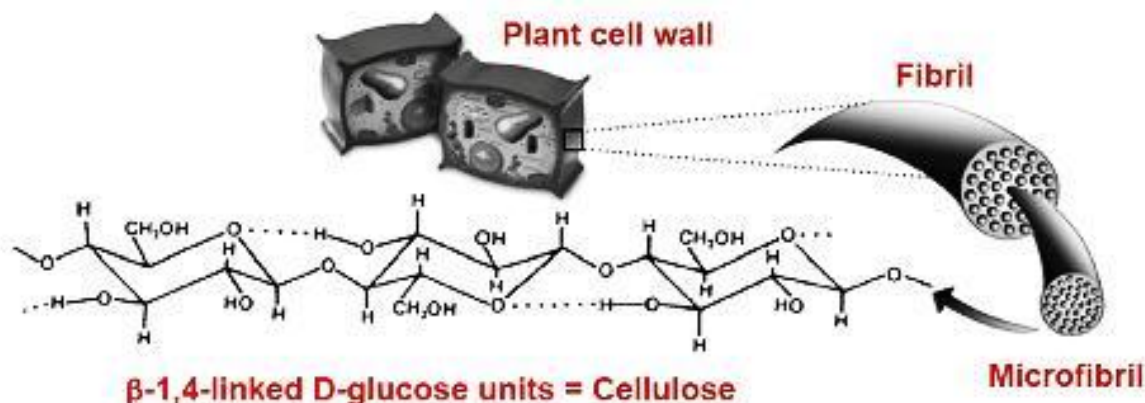
۱- مقدمه

فناوری نانو و تولید مواد در ابعاد نانومتری موضوع تحقیق جذابی است که در دهه های اخیر توجه بسیاری را به خود معطوف داشته است. نانوذرات موادی با ابعاد ۱ تا ۱۰۰ نانومتر هستند به گونه ای که خواص فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی این ذرات دارای تفاوت های اساسی با خواص مواد اولیه منشاء خود دارند (جنوبی و همکاران، ۱۳۸۹). به علت نسبت سطح به حجم زیاد نانوذرات، تمایل این مواد به آگلومره یا کلوخه شدن و واکنش با محیط اطراف بسیار زیاد است. نانوالیاف اصطلاحی است که به الیاف با قطر کمتر از ۵۰۰ نانومتر اطلاق می شود (کریم زاده و همکاران، ۱۳۹۱). این مواد در زمینه های گسترده و متنوعی از جمله نانوکامپوزیت های پلیمری کاربرد دارد. نانوکامپوزیت های پلیمری نیز نسل جدیدی از کامپوزیت ها هستند که یکی از مواد تشکیل دهنده ای آنها دست کم در یک بعد در گستره ی نانومتری می باشد (۱-۱۰۰ nm) و به طور معمول منجر به تولید کامپوزیت هایی با ویژگی های مکانیکی و گرمایی برتر می شود. از چندی پیش همراه با رشد نگرانی های زیست محیطی و پدید آمدن استانداردهای جدید، علاقه مندی روز افزونی به گسترش سامانه های تمام زیست تخریب پذیر و دوست دار محیط زیست با عملکرد مطلوب به وجود آمده است. جایگزینی پرکننده های غیرآلی با تقویت کننده های سلولزی منجر به تولید نانوجندسازهای تمام زیست تخریب پذیر و تجدیدشونده خواهد شد. بررسی ها برای تهیه نانوجندسازهای سلولزی نخستین بار با گروه پژوهشی سرماو در شهر گرنوبل فرانسه در حدود سال ۱۹۹۴ آغاز شد. این گروه نانوجندسازها را با روش قالب گیری محلول مخلوط تقویت کننده های نانومتری و پلیمرهای زمینه زیست تخریب پذیر تهیه کردند [۱]. با توجه به خواص متنوع نانوکامپوزیت های پلیمری، دلایل زیادی را می توان برای گسترش نانوکامپوزیت های پلیمری از جمله وزن کمتر قطعه نهایی در مقایسه با کامپوزیت های معمولی، استحکام مکانیکی بالاتر

در میزان بارگذاری کمتر، مقاومت بالا در برابر نفوذ گازها و بخارات، سطح ظاهری بهتر، فرآیندپذیری راحت تر و تحمل حرارتی بالاتر نام برد. بسته به اینکه زمینه نانوکامپوزیت از چه ماده ای تشکیل شده باشد، آن را به سه دسته پلیمری فلزی و سرامیکی تقسیم می کنند. نانو کامپوزیت ها به دو صورت ممکن است وجود داشته باشند، درحالت اول، زمینه ماده ای است با دمای ذوب پایین همانند پلیمر یا فلزی زود ذوب که با فاز دومی از جنس مواد با دمای ذوب بالا همانند سرامیک ها یا فلزات تقویت می شود و درحالت دوم، زمینه ماده ای سرامیکی یا فلزی با دمای ذوب بالا و فاز دوم ماده ای پلیمری، سرامیکی یا فلزی است. به طور کلی سه روش برای تولید نانوکامپوزیت های زمینه پلیمری وجود دارد که شامل مخلوط سازی مستقیم، فرآوری محلول و پلیمریزاسیون درجا می باشد. نکته ای که در روش های تولید نانوکامپوزیت های پلیمری اهمیت دارد و آن را از یکدیگر متمایز می کند، توزیع مناسب ماده پرکننده است. با اصلاح سطحی می توان این توزیع را به شکل یکنواخت به گونه ای انجام داد که از آگلومراسیون اجزای نانومتری ماده پرکننده جلوگیری شود و توزیع مناسب فاز تقویت کننده فراهم گردد. در واقع نکته مهم در تمام این فرآیندها، اصلاح فصل مشترک بین پلیمر و نانوذره می باشد. استفاده از فرایندهای سطحی سبب توزیع یکنواخت فاز تقویت کننده در بستر پلیمری شده، افزایش مدول و استحکام نانوکامپوزیت را به دنبال خواهد داشت [۷].

۲- سلولز

سلولز فراوان ترین بیوپلیمر بر روی کره زمین می باشد. این بیوپلیمر مهمترین ترکیب ساختار دیواره سلول گیاهی است. سلولز یک هوموپلی ساکارید تشکیل شده از واحدهای β -D- گلوکوپیرانوزی است که با پیوندهای گلوکوزیدی (۴→۱) به یکدیگر متصل شده اند. مولکول های سلولز کاملاً خطی هستند و تمایل شدیدی به تشکیل پیوندهای هیدروژنی بین مولکولی دارند. در نتیجه، دسته هایی از مولکول های سلولز کنار یکدیگر مجتمع شده و ریز لیفچه ها را



شکل ۱) سلولز از دیواره سلولی گیاه تا پیوندهای گلیکوزیدی

الیاف سلولز و تعریف ارائه شده از ذرات نانو که ویژگی اصلی این ذرات را، داشتن اندازه‌ای کمتر از ۱۰۰ نانومتر در یکی از ابعاد معرفی نموده، می‌توان میکروفیبریل‌های سلولز را بعنوان نانوفایبرهای سلولزی مورد بررسی قرار داد (جنوبی و همکاران، ۱۳۸۹). اولین بار اصطلاح میکروفیبر (میکروالیاف) نانوسلولز توسط توربک، سنایدر و سندبرگ در اواخر دهه ۱۹۷۰ به کار گرفته شد. این ترکیب ژل ماندنی بود که از خمیرچوب در دمای بالا و فشار زیاد ایجاد می‌شد. اصطلاح MFC برای اولین بار در اوایل دهه ۱۹۸۰ ظهور کرد، و تعدادی از اختراعات ثبت شده روی این ترکیب نانوسلولزی جدید به نام ریونیر معرفی گردید. در کارهای بعد، هریک پودر خشک این ژل را تهیه کردند [۱۰].

۱-۴- ذرات سلولز

سلولز میکروکریستالی (MCC): سلولز میکروکریستالی در سطح تجاری قابل دسترسی است و کاربردهایی در داروسازی و صنایع غذایی دارد. سلولز میکروکریستالی بوسیله هیدرولیز اسیدی الیاف چوب و خنثی‌سازی یا قلیا آماده می‌شود. این ذرات متخلخل قطر ۱۰-۱۵ میکرومتر و مقدار فراوانی سلولز دارند. بلورینگی این ذرات زیاد است و متشکل از دستجات متعدد میکروفیبریل‌های سلولز هستند. دستجات میکروفیبریلی سلولز میکروکریستالی پیوندهای هیدروژنی مستحکمی دارند. معمولاً برای استفاده سلولز میکروکریستالی در کامپوزیت‌ها ذرات آن شکسته می‌شود تا کوچک‌تر شوند. اندازه این ذرات ۱۰-۱ میکرون و میله مانند هستند.

سلولز میکروفیبریل شده (MFC): سلولز میکروفیبریل شده از طریق پالایش مکانیکی شدید خمیر چوب یا الیاف گیاهی تولید می‌شود. این ماده بعنوان عامل غلظت‌ساز در صنایع غذایی و آرایشی استفاده می‌شود. ذرات سلولز میکروفیبریل شده شامل فیبریل‌های ابتدائی هستند که هر کدام حاوی ۳۶ زنجیره سلولزی مرتب شده در ساختار کریستالی هستند. ضریب ظاهری بالایی دارند (۱۰۰-۱۰ نانومتر پهنا و ۰/۵-۱ میکرومتر طول). این ذرات تقریباً ۱۰۰ درصد سلولز دارند و نواحی آمورف و کریستالی و در آن‌ها دیده می‌شود. سلولز نانوفیبریل شده (NFC): ذرات سلولز نانوفیبریل شده فیبریل‌های سلولزی ظریف‌تری هستند. فرایند بیوسنتز سلولز نانوفیبریل شده یادآور فیبریل‌های اولیه چوب و گیاهان هستند آنها متشکل از ۳۶ زنجیره سلولزی در ساختار کریستالی هستند وسط مقطع مربع شکل، ضریب ظاهری بالا (۲۰-۴۰ نانومتر پهنا و ۵۰۰-۲۰۰ نانومتر طول) و تقریباً ۱۰۰ درصد سلولزی هستند و نواحی آمورف و کریستالی و در آن‌ها دیده می‌شود. تفاوت سلولز نانوفیبریل

تشکیل می‌دهند. در ریز لیفچه‌ها نواحی بسیار منظم (بلوری) و نواحی نسبتاً نامنظم (آمورف) متناوباً در مجاورت یکدیگر قرار دارند. از تجمع ریز لیفچه‌ها، لیفچه و از تجمع لیفچه‌ها، لیف سلولزی تشکیل می‌شود. بر اثر همین ساختار لیفی و پیوندهای هیدروژنی محکم، سلولز از مقاومت کششی بالایی برخوردار است و در اغلب حلال‌ها نامحلول است (میره‌کی ۱۳۸۹). واحد سازنده سلولز خام (سلولز I) شامل چهار جزء گلوکوزیدی است. در ریز لیفچه‌های سلولز خام، همه زنجیرها در جهت یکسانی توجیه شده‌اند و به بیان دیگر، زنجیرها با یکدیگر موازی هستند. سلولز بازسازی شده (سلولز II) دارای زنجیرهای ناموازی است. پیوندهای هیدروژنی سلولز II از سلولز I بیشتر است، در نتیجه از نظر ترمودینامیکی پایدارتر از سلولز I است. مقدار سلولز در بافت‌های مختلف متفاوت است. این مقدار در پنبه ۹۸ درصد، در الیاف رامی ۷۵ درصد و در چوب این مقدار به ۴۰ تا ۵۰ درصد می‌رسد [شکل ۱].

۳- ساختمان شیمیایی سلولز

در مولکول سلولز هر جزء گلوکوزیدی نسبت به همسایگانش چرخش ۱۸۰ درجه‌ای دارد. ضمن برقراری اتصال بین دو مولکول گلوکز از OH متصل به کربن شماره ۴ یک مولکول و OH کربن شماره ۱ مولکول بعدی، یک مولکول آب جدا می‌شود و پل اکسیژنی برقرار می‌شود. از سوی دیگر، در مولکول سلولز امکان برقراری پیوندهای هیدروژنی نیز وجود دارد. پیوستن دو مولکول D- β گلوکز موجب تشکیل یک مولکول سلوبیوز می‌شود. دیواره سلول‌های گیاهی در حکم یک ماده نانوکامپوزیتی است که شامل ریزلیفچه‌های سلولزی محکم در ماده زمینه‌ای از پلیمرهای طبیعی شامل لیگنین و همی سلولز است. مدول یانگ دیواره سلول به عواملی نظیر نسبت حجمی سلولز، متوسط زاویه ریزلیفچه‌ای و جهت بارگذاری بستگی دارد [۲].

۴- نانو سلولز و انواع آن

اجزاء تشکیل دهنده مواد لیگنوسلولزی از جمله چوب شامل سلولز، همی‌سلولز و لیگنین می‌باشد. سلولز از یک پلیمر خطی، مرکب از نواحی کریستالی و آمورف تشکیل گردیده، در حالیکه همی سلولز و لیگنین از ساختاری کاملاً آمورف برخوردار هستند. درعین حال دیواره سلولی الیاف سلولزی شامل واحدهای ساختاری پایه ای به نام میکروفیبریل است که این میکروفیبریل‌ها بطور متوسط از قطری بین ۳۰ تا ۱۰۰ نانومتر و طولی برابر با چند میکرومتر برخوردار هستند. بنابراین با توجه مشخصات ذکر شده در مورد



جدول ۱) انواع نانو سلولز [۱۵]

نانوسلولز	مشابه	منابع	روش تولید
سلولز میکرو فیبریل شده	نانو/ میکرو فیبریل و نانوسلولز فیبریل شده	چوب، چغندر قند، سیب زمینی، کنف و کتان	لایه لایه شدگی خمیر چوب با فشار مکانیکی قبل و یا بعد از فرآوری شیمیایی یا آنزیمی قطر: ۵-۶۰ نانومتر و طول چند میکرومتر
سلولز نانوکریستالی	میکروسلولزهای سلولز میله مانند، کریستال منفرد کوچک	چوب، پنبه، کتان، کاه گندم، پوست، درخت توت، سلولز جلبک و باکتری-ها	قطر: ۵-۷۰ نانومتر و طول ۲۵۰-۱۰۰۰ نانومتر (سلولز گیاهی) و ۱۰۰ نانومتر تا چند میکرومتر (سلولز جلبک و باکتری)
نانوسلولز باکتریایی	سلولز میکروبی و بیوسلولز	قندها و الکل های با وزن مولکولی پایین	سنتز باکتریایی قطر: ۲۰-۱۰۰ نانومتر و با شبکه های مختلف نانوالیاف

کاهش می یابد. بر همین اساس در حال حاضر روش مکانیکی کمتر مورد توجه محققین قرار می گیرد.

۵-۲- روش شیمیایی- مکانیکی

در این روش ابتدا ماده سلولزی در طی فرآیند شیمیایی تبدیل به خمیر شده و طی آن فیبرهای تشکیل دهنده آن تفکیک می شوند و سپس فیبرهای حاصله تحت فرآیند پالایش با فشار بالا قرار می گیرند. استفاده از پالایش تحت فشار بالا با هدف جداسازی همزمان نانوفایبرها از دیواره های اولیه و ثانویه فیبرها صورت می گیرد. در این روش نانوفایبرها با کمترین آسیب به زنجیره سلولزی در دیواره های اولیه و ثانویه جدا می شوند. قطر نانو فایبرهای حاصل از این روش در حدود ۵ تا ۶۰ نانومتر بوده و مقاومت مکانیکی آنها بالاتر از مقاومت مکانیکی الیاف حاصل از روش مکانیکی است.

۵-۳- روش آنزیمی

در این روش برای جداسازی نانوفایبرها از فرآیندهای آنزیمی بهره گرفته می شود که طی آن آنزیم ها ضمن جداسازی نانوفایبرها از دیواره سلولی، قادر به حذف نواحی آمورف از زنجیره نانوفایبر نیز می شوند. این روش ضمن ساده تر بودن از دو روش قبلی سازگاری زیادی با محیط زیست دارد و درعین حال نانوفایبرهای حاصل از آن در مقایسه با دو روش قبل از قطر کمتری برخوردار هستند. اما سرعت فرآیند در این روش کندتر و مدت زمان انجام فرآیند به مراتب طولانی تر از روش های پیش گفته است. در هر حال باید توجه داشت که درجه پلیمریزاسیون، مرفولوژی و ضریب قطر به طول نانوفایبرها، با توجه به نوع مواد اولیه و نیز روش جداسازی نانوفایبرها متغیر خواهد بود. به عبارت دیگر، خواص فیزیکی و شیمیایی نانوفایبرها ارتباط مستقیمی با ماده اولیه مورد استفاده و تکنیک جدا سازی دارد (جنوبی و همکاران، ۱۳۸۹). در دنیا نانوسلولز به روش های مختلف دیگری نیز تولید می شود که روش های تولید آن بصورت خلاصه در جدول ۲ آمده است.

شده و سلولز میکرو فیبریل شده در فرایندهای جداسازی الیاف است. ذرات تولید شده سلولز نانوفیبریل شده از سلولز میکرو فیبریل شده کوچکتر است. سلولز نانوکریستالی (CNC): سلولز نانوکریستالی ذراتی میله ای شکل یا کریستالی هستند که در اثر هیدرولیز اسیدی چوب، گیاهان چوبی، سلولز میکروکریستالی، سلولز نانوفیبریل شده و سلولز میکرو فیبریل شده بدست می آید. این ذرات کریستالی ضریب ظاهری بالایی دارند (۳-۵) نانومتر در پهنا و ۵۰-۵۰۰ نانومتر طول) و ۱۰۰ درصد سلولزی هستند. حدود ۵۴-۸۸ درصد ساختار آن کریستالی است. ذرات سلولز نانوکریستالی شباهت زیادی به ویسکر دارند زیرا در اثر هیدرولیز اسیدی نوک این ذرات شکلی بسیار نازک و باریک می شود (جدول ۲و۱) [۱۱].

۵-۴ روش تهیه نانوفایبرها

تحقیقات مختلفی به منظور جداسازی نانوفایبرها از دیواره سلولی الیاف لیگنوسلولزی انجام گرفته است. نانوفایبرها با سه روش متفاوت از دیواره سلولی الیاف جدا می شوند که عبارتند از:

- روش مکانیکی
- روش شیمیایی- مکانیکی
- روش آنزیمی

۵-۱- روش مکانیکی

در این روش الیاف سلولزی در ریفایبر پالایش شده و نانوفایبرها از دیواره سلولی جدا می شوند. نانوفایبرهای حاصل از این روش به طور متوسط دارای قطری در حدود ۲۰ تا ۹۰ نانومتر و طولی در حدود چند میکرون هستند. اگر چه این روش نیاز به امکانات ساده تر و کمتری دارد، اما باید توجه داشت که اولاً قطر ذرات حاصل از این روش، اندکی بزرگتر از قطر ذرات حاصله از روش شیمیایی - مکانیکی است و ثانیاً بر اثر آسیب رسیدن به زنجیره سلولزی نانوفایبرها در طی عملیات پالایش، مقاومت مکانیکی نانوفایبرهای حاصله

جدول ۲) روش‌های تهیه نانوسلولزها [۱۶]

روش‌ها	انواع
روش مکانیکی	تغییر و تبدیلات طی واکنش مکانیکی-شیمیایی و تشکیل ماکرورادیکال‌ها، پیشرفت واکنش و پایداری ماکرورادیکال‌ها تا بازترکیب آنها
	خرد کردن
روش فیزیکی	امواج فراصوت
	میکرو ویو
روش شیمیایی	تجزیه فیبرهای سلولزی تا مقیاس نانو
	جدا سازی نانوفیبرهای سلولزی در مخلوطی از گازها به علت دهیدروژنه شدن، دپلمره شدن و تخریب زنجیره گلیکوزیدی
روش بیولوژیکی	استفاده از اسیدهای معدنی مانند اسید سولفوریک، هیدروکلریک و اسید فسفریک که موجب جدا سازی میکرو/ نانوفیبرها با درجه بالایی از بلورینگی با برطرف کردن نواحی آمورفی مواد خام سلولزی
	هیدرولیز اسیدی
روش ترکیبی	به کار بردن عمل قلیایی متفاوت (محلول قلیایی پراکسید، قلیایی پراکسید- اسی هیدروکلریک، محلول ۵ درصد وزنی پتاسیم هیدروکسید و ۱۸ درصد وزنی پتاسیم هیدروکسید) برای بدست آوردن فیبرسلولزی با قطر متوسط ۳-۵ نانومتر
	هیدرولیز بازی
روش ترکیبی	تورم فیبرهای سلولزی در یک سیستم حلال (N,N دی متیل استامید و لیتیم کلراید) تا جدا سازی نانوفیبرهای سلولزی در فیبرهای نازک
	عملکرد حلال آلی
روش ترکیبی	حل شدن سلولز با مایعات یونی آبدوست مانند: ۱- بوتیل- ۳- متیل ایمیدازولیوم کلرید و ۱- آلیل- ۳- متیل ایمیدازولیوم کلرید
	عملکرد مایعات یونی
عمل آنزیمی مواد سلولزی و تخریب ساختار اولیه و اجزاء سلولزی مثل لیگنین در حضور میکروارگانیزم‌ها (قارچ و باکتری)	
ترکیبی از روش‌های شیمیایی و تصفیه مکانیکی و هم‌ژنه کردن و فشردن مواد خیس شده با آب در حضور نیترژن مایع تا بدست آوردن فیبرهای سلولزی	

۶- بحث و نتیجه‌گیری

نانوسلولز به عنوان یک ماده تقویت کننده برای کامپوزیت‌ها روز به روز برای محققین علوم کامپوزیت جذاب‌تر می‌شود. استفاده از نانورشته‌های سلولزی به عنوان تقویت کننده در سیستم‌های پلیمری زیست تخریب پذیر، رشته جدیدی در فناوری نانو محسوب می‌شود. به دلیل خواص بسیار مطلوب نانوسلولز در تقویت نانوکامپوزیت‌ها، ویژگی‌های مطلوب آن در زیر آمده است: فیبرهای سلولز دسته‌هایی از میکروفیبریل‌ها (فیبریل‌های ابتدایی) بوده که در آن مولکول‌های سلولز به صورت طولی توسط پیوندهای هیدروژنی بین گروه‌های هیدروکسیل‌شان به هم وصل شده‌اند. میکروفیبریل‌ها شامل نواحی تک کریستالی سلولز بوده که به نواحی آمورف متصل شده‌اند. هر فیبریل ۱۰۰-۵ نانومتر قطر و طولی در حدود چند صد نانومتر تا چندین میکرومتر دارد. به دلیل دارا بودن آرایش کریستالی، رشته‌های سلولز مدول بالایی داشته و به عنوان مواد تقویت کننده مورد استفاده قرار می‌گیرند [۴]. نانورشته‌های سلولز به دلیل تجدیدپذیری، ویژگی‌های مکانیکی مطلوب، ناحیه سطح مخصوص بالا، سبکی وزن، مقاومت بالا، دانسیته کم و مقاومت مخصوص و سختی و

همچنین خصوصیت کاهش شدت صوت و طبیعت غیر ساینده (زبری سطح) (وانگ و همکاران، ۲۰۰۶) بسیار مورد توجه محققین است. نانوبلور سلولز ارزان و سازگار با طبیعت بوده، ظریب لاغری (نسبت طول به عرض) در آن بالا [۱۴]، و بسته به ماده‌ای که از آن بدست می‌آید، این نسبت از ۳۰ تا ۱۵۰ متغیر است. مقاومت حرارتی و شیمیایی بالایی دارد و حلال‌های کمی می‌تواند آن را حل کند. در زنجیره سلولز دو انتهای کاهنده و ناکاهنده وجود دارد. اطراف زنجیره سلولز پر از اتم‌های هیدروژن و گروه‌های هیدروکسیل است که همین امر موجب فعالیت شیمیایی سطحی بالا می‌گردد. از آنجایی که خصوصیات مکانیکی کامپوزیت‌ها بسیار به درجه کریستالینی پرکننده‌های سلولزی بستگی دارد، جدا سازی لیگنین، همی سلولز و بخش‌های آمورف بدون اینکه ساختار بلوری دستخوش تغییر شود، برای حفظ مقاومت‌های نانوبلور سلولز و نانوکامپوزیت تقویت شده با آن ضروری است [۱۵]. مدول الاستیک نانورشته‌های سلولز ۱۶۷،۵ گیگا پاسکال و افزودن آن به پلیمر باعث بهبود قابل توجهی در ویژگی‌های نانوکامپوزیت‌ها (ویژگی‌های مکانیکی، بازدارندگی نسبت به گازها و حتی افزایش زیست تخریب پذیری نانوکامپوزیت‌ها) نسبت به پلیمر خالص و یا میکرو و ماکروکامپوزیت‌ها می‌شود [۴].



۷- منابع

10. Lu, J., Wang, T., and Drzal, L. T. 2008. Preparation and properties of microfibrillated cellulose polyvinyl alcohol composite materials. *Composite Part A*. 39: 746-738.
11. Turbek, A. F., Snyder, F.W., and Sandberg, K.R. 2010. Microfibrillated cellulose, a new cellulose product: Properties, uses and commercial potential. *Applied Polymer Symposia*. 37: 815-827.
12. Moon, R. Martini, A. Nairn, J. Simonsen, J and Youngblood, J. 2010. Cellulose Nanomaterials review: structure, properties and Nanocomposites. *Chemistry*. 40: 3941-3994.
13. Persin, M. S., Habibi, Y. Zoppe, J. O., Pawlak, J. J., and Rojas, O. J. 2010. Nanofiber Composites of Polyvinyl Alcohol and Cellulose Nanocrystals: Manufacture and Characterization. *Biomacromolecules*. 11: 674-681.
14. Singh RP, Zhang M, and Chan, D. 2002. Toughening of a brittle thermosetting polymer: effects of reinforcement particle size and volume fraction. *J. Mater. Sci*. 37: 781-788
15. Wang, S., Cheng, Q., Rials, T. and Lee, S. 2006. Cellulose Microfibril/Nanofibril and Its Nanocompsites. *The 8th Pacific Rim Bio-Based Composites Symposium*, 301- 308.
16. Klemm, D., Krame, F., Moritz, S., Lindstrom, T., Ankerfors, M., Gray, D., and Dorris, A. 2011. A New Family of Nature-Based Materials. *Angewandte Chemie*. 50:5438-5466.
17. Frone, N. A., Panaitescu, D. M., and Donescu, D. 2011. Some Aspects Concerning the Isolation of Cellulose Micro-and Nano-Fibers. *UPB Scientific Bulletin*, 73: 133-152
۱. روحانی، م. ابراهیمی، ق. ک. ع. ن. دوفرن، ا. و بلقاسم، م. ن. ۱۳۸۸. ساخت و ارزیابی ویژگی‌های مکانیکی- دینامیکی و گرمایی نانوجندسازهای کریستال سلولز-PVA. نشریه جنگل و فراورده‌های چوب، مجله منابع طبیعی، دوره ۶۲، شماره ۳، ۲۴۵-۲۵۹.
۲. شیخ‌نظری، س. ۱۳۹۰. بررسی ساخت بیوکامپوزیت سلولز باکتری / سیلیکا. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان دانشکده جنگلداری و فناوری چوب، ۶۸ ص.
۳. یحیی، م. خزاعیان، ا. مشکور، م. ۱۳۹۲. بررسی خواص نانوکامپوزیت پلی‌وینیل‌الکل-نانوسلولز. همایش ملی علوم و فناوری نانو.
۴. نوشیروانی، ن. ۱۳۸۹. بررسی ویژگی‌های فیزیکی بیونانوکامپوزیت‌های نشاسته - پلی وینیل الکل حاوی نانوکریستال سلولز و نانورس. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده کشاورزی گروه علوم و صنایع غذایی دانشگاه تبریز.
۵. یوسفی، ح. و مشکور، م. ۱۳۸۷. نانوبلور سلولز منبعی تجدید شونده و ارزان برای تولید نانو کامپوزیت. ماهنامه فناوری نانو، شماره ۱۳۱، ۳۵۰-۳۴۵.
۶. حاتم، ا.، باریکانی، م. و سید محقق، س. م. ۱۳۹۰. نانوکریستال‌های سلولز؛ بررسی ساختار، خواص و کاربرد. ماهنامه فناوری نانو، شماره ۱۷۰، ۲۹-۲۴.
۷. کریم‌زاده، فتح‌اله، قاسمعلی، احسان و سالمی‌زاده، سامان. ۱۳۹۱. نانومواد؛ خواص، تولید و کاربرد. انتشارات جهاد دانشگاهی. ۲۶۰ ص
8. Yang, F., Ou, Y., and Yu, ZH. 1998. Polyamide /silica Nanocomposites prepared by in situ polymerization. *Applied Polymer Science*. 69: 355-361
9. Lu, J., Wang, T., and Drzal, L. T. 2008. Preparation and properties of microfibrillated cellulose polyvinyl alcohol composite materials. *Composites Part A*, 39, 738-746 .