

مجموعه گزارش‌های صنعتی فناوری نانو • گزارش شماره ۱۱۹

کاربردهای نانومواد سلولز در صنایع مختلف

سال انتشار: ۱۳۹۴

ویرایش نخست



ستاد ویژه توسعه فناوری نانو

طراحی و اجرا:	توسعه فناوری مهر ویژن	تلفن:	۰۲۱-۶۳۱۰۰
نظارت:	داود قراپلو report@nano.ir	نمابر:	۰۲۱-۶۳۱۰۶۳۱۰
تهیه کننده:	مبنا پژوهان فناوری های نوین آتیه composite@nano.ir	پایگاه اینترنتی:	www.nano.ir
		صندوق پستی:	۱۴۵۶۵-۳۴۴

۳	مقدمه
۳	فناوری نانو
۳	نانومواد سلولز
۵	اهمیت، خواص و پتانسیل های کاربردی نانومواد سلولز
۵	کاربردهای نانومواد سلولز در صنایع مختلف
۶	حوزه خودرو
۷	حوزه هوافضا
۹	حوزه ساخت و ساز
۱۱	حوزه الکترونیک
۱۲	حوزه لوازم آرایشی، بهداشتی و محصولات مراقبت شخصی
۱۳	حوزه روکش و رنگ
۱۴	حوزه بسته بندی مواد غذایی
۱۵	حوزه مقوا و بسته بندی
۱۵	حوزه کاغذ و چاپ
۱۶	حوزه کامپوزیت/ پلیمر
۱۷	حوزه نفت و گاز
۱۸	حوزه نساجی و پوشاک
۱۹	حوزه پزشکی و دارویی
۲۰	حوزه محیط زیست
۲۰	حوزه مواد غذایی
۲۱	سیستم های ذخیره سازی انرژی
۲۱	سایر حوزه های کاربردی نانوسلولز
۲۱	تخمین هزینه ها و بازار فناوری
۲۳	نتیجه گیری

معضلات ناشی از مصرف بی‌رویه پلاستیک‌های معمولی و خطرات زیست‌محیطی آن، به طور جدی زندگی بشر و پیرامونش را تهدید می‌کند. پلاستیک‌های تخریب‌ناپذیر در محیط دریا و اقیانوس‌ها توسط جانداران دریایی بلعیده می‌شوند. همچنین این مواد حاوی مواد بسیار سمی از قبیل پلی کلرید بی‌فنیل^۱ و دی کلرودی‌فنیل تری کلرواتان^۲ با غلظت‌هایی در حد 10^4 - 10^3 مرتبه بالاتر از غلظت معمول آن‌ها در آب اقیانوس اند. این دو مورد، از مشکلات خاص این مواد مصنوعی هستند [۵-۱]. زیست‌پلاستیک‌ها معمولاً برحسب پلاستیک‌های ساخته‌شده از مواد تجدیدپذیر (مانند اتانول از نیشکر) و پلاستیک‌های زیست‌تخریب‌پذیر، طبقه‌بندی می‌شوند. بنابراین برای مقابله با مشکلات زیست‌محیطی مربوط به زیاله‌های پلاستیکی، باید بر روی توسعه پلاستیک‌های زیست‌تخریب‌پذیر سازگار با محیط زیست تمرکز نمود.

در سال‌های اخیر اقبال جامعه جهانی به توسعه زیست‌موادی کاملاً جدید و سازگارتر با محیط زیست، مانند نانومواد سلولزی، و جایگزینی پلاستیک‌های مبتنی بر نفت خام و مواد معدنی با این مواد تجدیدپذیر بوده است. این امر ارزش افزوده‌ای را برای الیاف چوبی فراهم می‌آورد. توسعه نانوالیاف سلولزی یا CNF^۳ در این راستا، سهم مهمی را دارا می‌باشد. در طول دهه گذشته، تعداد روبه‌رشدی از گروه‌ها، مؤسسات و شرکت‌های تحقیقاتی در سراسر جهان، در مورد تولید و کاربرد CNF در مقیاس بزرگ گزارش‌هایی را تهیه کرده‌اند. پیشرفت تحقیقات علمی و فنی، گسترش فعالیت‌های صنعتی و شروع ورود CNF به بازارهای جهانی، ما را بر آن داشت تا این گزارش را در مورد خواص کلیدی، قابلیت‌های نوآورانه و کاربردهای آینده نانومواد سلولزی در صنایع مختلف، تهیه و ارائه نماییم. امروزه نانوسلولز به عنوان کاندیدایی ایده‌آل در حوزه‌های کاربردی مختلف، به شکل گسترده‌ای مورد بررسی و تحقیق واقع شده است. افزودنی‌های استحکام‌بخش در کاغذسازی، عوامل تقویت‌کننده در نانو کامپوزیت‌ها، مواد و مصالح ساختمانی، لایه‌های نازک، بسته‌بندی‌های زیست‌تخریب‌پذیر، اجزاء پایدارکننده و غیره از جمله زمینه‌های کاربردی بالقوه این مواد هستند.

فناوری نانو

فناوری نانو عبارت است از درک و کنترل مواد در مقیاس نانومتری (در ابعاد تقریبی بین ۱ تا ۱۰۰ نانومتر)، که در آن مقیاس پدیده‌های منحصر به فرد، کاربردهای جدید را ممکن می‌سازد. در این مقیاس، مواد می‌توانند خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و زیستی غیر عادی از خود نشان دهند. به طور خلاصه فناوری نانو به معنی مهندسی نمودن مواد در ابعاد اتمی-مولکولی و ساخت موادی با خواص کاملاً متفاوت در ابعاد نانومتری است. نانومواد سلولزی نیز به دلیل خواص مناسبی که دارند، در این فناوری مورد توجه قرار گرفته‌اند.

نانومواد سلولزی

اگر یک ذره سلولزی دارای حداقل یک بعد در مقیاس نانومتری (۱ nm تا ۱۰۰ nm) باشد، به آن نانوذره سلولزی گفته می‌شود. دو بعد دیگر ذره می‌تواند از مقیاس نانومتری تا ده‌ها میکرومتر تغییر کنند. نانومواد سلولزی نیز، موادی در مقیاس نانومتری هستند. این مواد از درختان، گیاهان و جلبک‌ها مشتق شده و یا توسط باکتری‌ها و جانوران نیام‌دار^۴ تولید می‌شوند [۶]. ویژگی مهم نانومواد سلولزی این است که از منابع تجدیدپذیر و بسیار فراوان

به دست می‌آیند و بنابراین منابع استحصال آن‌ها از بین نمی‌رود و در صورت تحقق و گسترش کاربردهای آن‌ها، امکان تولید در سراسر جهان و در مقادیر بسیار زیاد (میلیون‌ها تن در سال) وجود دارد. از طرفی این نانومواد زیست‌تجزیه‌پذیر بوده و به همین دلیل محصولات حاوی آن‌ها، قابلیت بازیافت خواهند داشت. بنابراین، تولید و کاربرد نانومواد سلولزی به صورت بالقوه دارای مزایای زیست‌محیطی قابل توجهی است. منابع مختلف مواد اولیه و نیز روش‌های مختلف تولید، منجر به تولید نانومواد سلولز با مورفولوژی و خصوصیات متفاوت مانند طول، نسبت ابعاد، شاخه‌دار بودن و بلورینگی خواهد شد [۷]. محدوده وسیع خواص و مورفولوژی شناخته شده برای نانومواد سلولز، زمینه‌ساز انواع کاربردهای بالقوه آن در صنایع مختلف است.

نانومواد سلولز به سه گروه عمده شامل ۱) نانوفیبریل‌های سلولز^۵ (NFC یا CNF)، ۲) نانوبلورهای سلولز^۶ (CNC) یا سلولز نانوبلورین^۷ (NCC) و ۳) نانوسلولز با کتریایی^۸ (BNC) تقسیم‌بندی می‌شوند [۸]. گرچه، مانند برخی منابع، نانوکامپوزیت‌های مبتنی بر نانوسلولز را نیز می‌توان به عنوان دسته چهارم به شمار آورد. CNF به عنوان یک ماده طبیعی با عملکرد بالا در نظر گرفته می‌شود [۹-۱۱]. CNF دارای مزایای عمده‌ای در مقایسه با سایر زیست‌پلاستیک‌ها مانند مشتقات نشاسته، کیتوسان^۹ و همی سلولز^{۱۰} است. به همین علت از CNF به عنوان عامل تقویت‌کننده در زیست‌کامپوزیت‌ها و بسته‌بندی‌های سخت استفاده می‌شود. این امر ناشی از ناهمسانگردی^{۱۱}، مساحت سطح و مدول بالای نانوفیبریل‌های سلولز می‌باشد.

ساخت نانوسلولز، اولین بار توسط توریک^{۱۲} [۱۲] و هریک^{۱۳} [۱۳] و همکارانشان در شرکت آی‌تی‌تی رویونیر^{۱۴} در ایالات متحده آمریکا در اواخر دهه ۱۹۷۰ انجام شد. نانومواد سلولز را می‌توان با روش‌های پیش‌آماده‌سازی شیمیایی/آنزیمی و عملیات همگن‌سازی، از چوب و گیاهان جدا نمود [۱۲]. نانوسلولز را می‌توان با عبور دادن سوسپانسیون‌های الیاف سلولزی مبتنی بر چوب در طول دستگاه‌های مکانیکی مانند همگن‌سازهای فشار بالا یا آسیاب‌های بسیار بزرگ تولید نمود [۱۵، ۱۴، ۱۲]. در این عملیات مکانیکی، الیاف چوب ورقه‌ورقه شده و نانوفیبریل‌هایی با عرض تقریبی ۶۰-۲۰ نانومتر ایجاد می‌شود. نانوفیبریل‌های تولیدشده از این طریق، دارای نسبت ابعاد بالایی بوده و در آب خصوصیات ژل مانند همراه با خواص شبه‌پلاستیک و تیکستروپیک از خود نشان می‌دهند.

مشکل اصلی تولید تجاری نانوسلولز، مصرف بسیار بالای انرژی (تا مقداری متجاوز بر ۳۰۰۰۰ کیلووات‌ساعت/تن) است [۸]. گرچه اخیراً روش‌هایی برای کاهش مصرف انرژی در تولید نانوسلولز توسعه داده شده‌اند. این روش‌ها شامل پیش‌آماده‌سازی الیاف همراه با روش‌های مختلف آنزیمی، شیمیایی و فیزیکی قبل از همگن‌سازی می‌باشند. برخی روش‌ها مانند پیش‌آماده‌سازی آنزیمی [۱۴]، در کاهش مصرف انرژی به میزان ۹۸ درصد در طی همگن‌سازی، موفقیت‌آمیز بوده است. امروزه روش‌های پیش‌آماده‌سازی متعددی برای تسهیل ورقه‌ورقه‌شدن الیاف خمیر کاغذ مانند واردسازی بارهای الکتریکی به وسیله کربوکی متیل‌سازی^{۱۵} (وارد کردن گروه کربوکی متیل به درون ترکیب) [۱۶]، اکسیداسیون با TEMPO واسطه^{۱۶} [۱۸، ۱۷] و کاتیون‌رفتاری^{۱۷} (اعمال کاتیون معمولاً در یک حمام الکترولیتی) [۱۹، ۲۰] به کار برده می‌شوند.

نانوسلولز را می‌توان از الیاف بومی^{۱۸} نیز به وسیله آب‌کافت اسیدی به دست آورد که منجر به حصول نانوذرات بسیار بلورین و سخت (CNC یا NCC) می‌شود. این نانوذرات، از CNF به دست آمده از طریق همگن‌سازی، کوتاه‌تر (۱۰۰-۱۰۰۰ نانومتر) اند [۲۱]. نانوسلولز با کتریایی (BNC) به وسیله چندین گونه از باکتری‌های

تخمیری تشکیل می‌شود. در مقایسه با مواد CNF و CNC جداشده از منابع سلولز، BNC به عنوان یک غشاء سلولزی نسبتاً خالص و خیلی آبدار به وسیله ترکیبی از فرآیندهای آرایش یافتن زیستی، از منابع کربن با وزن مولکولی کم مانند دی-گلوکز^{۱۸} تولید می‌شود [۸]. برطرف کردن توده‌های زیستی اضافی از جنگل‌های از کنترل خارج شده و بسیار پوشیده و تبدیل آن‌ها به محصولاتی با ارزش بالاتر مانند نانوسلولز، برای محیط زیست و اقتصاد، یک موفقیت چشم‌گیر محسوب می‌شود.

اهمیت، خواص و پتانسیل‌های کاربردی نانومواد سلولز

نانومواد سلولز می‌توانند بسیاری از کاربردها و محصولات نوین را ایجاد کنند. تمامی شکل‌های نانومواد سلولز سبک‌وزن، مستحکم و سفت هستند. نانوسلولز از آرایه‌ای از بلورهای سوزنی شکل که به شکلی فشرده در کنار یکدیگر قرار گرفته‌اند، تشکیل شده است، بنابراین خواص مکانیکی عالی آن قابل توجه است. نانوسلولز تلفیقی



از خواص مناسب را در خود دارد. سفتی بالا (مدول کششی ۱۴۵-۲۹ GPa) [۲۲, ۲۳]، مقاومت کششی بالا (۷۵۰۰ MPa) [۲۴]، وزن مخصوص کم (دانشیه تقریبی $1/5 \text{ g/cm}^3$) و سطح ویژه بزرگ ($482 \text{ m}^2/\text{g}$) [۲۵] استعداد کاربردی زیادی در این ماده ایجاد کرده است. علاوه بر این، قیمت فعلی نانومواد سلولزی بسیار مناسب و در حدود ۴-۱۰ دلار به ازای هر کیلوگرم است. پیش‌بینی می‌شود که نانومواد سلولز، نسبت استحکام به وزن چشم‌گیری داشته باشند. مجموع این ویژگی‌ها منجر به جذابیت استفاده از این مواد در نزد مشتریان می‌شود [۶]. نانوبلورهای سلولز دارای خواص فوتونیک و پیزوالکتریک اند. با استفاده از نانوفیبریل‌های سلولز می‌توان هیدروژل‌ها و آئروژل‌های بسیار پایداری را ساخت. نانومواد سلولز اصلاح نشده تاکنون نگرانی‌های محیط‌زیستی، سلامتی و ایمنی (EHS)^{۱۹} کمتری را نسبت به دیگر مواد مشابه نشان داده‌اند [۷].

رایج‌ترین زمینه‌ها برای نشان‌دادن کاربردهای متنوع نانومواد سلولزی و فرصت‌های تجاری مربوط به آن‌ها، زمینه‌های کاربردی خودرو، هوافضا، ساخت‌وساز، الکترونیک، لوازم آرایشی و بهداشتی، پوشش و رنگ، بسته‌بندی مواد غذایی، مقوا و بسته‌بندی، کاغذهای خاص و نانو کامپوزیت‌ها است. در ادامه این گزارش، سعی می‌شود تا به طور مختصر هر یک از این حوزه‌ها بررسی شوند.

کاربردهای نانومواد سلولز در صنایع مختلف

در حال حاضر، نانومواد سلولز پتانسیل خیلی بالایی برای کاربرد در بسیاری از زمینه‌ها شامل الکترونیک (مانند صنایع الکترونیکی انعطاف‌پذیر و حسگرها)، ساخت‌وساز (مانند آئروژل‌ها، سیمان، بسته‌بندی (مانند مواد بسته‌بندی سبک‌وزن)، مواد غذایی (مانند افزودنی‌های غذایی)، پزشکی (مانند داربست بافت)، صنایع نفت

و گاز (مانند مواد افزودنی در حفاری نفت)، صنعت کاغذ و چاپ، انرژی، محصولات بهداشت و سلامت، قطعات خودرو (مانند تایر و سپر)، فناوری فضایی و دفاعی، روکش و رنگ، اصلاح‌کننده‌های رئولوژیکی و چسب از خود نشان داده‌اند. همچنین از نانوسلولز برای ساخت آتروژل‌های فوق جاذب^{۲۱}، اتومبیل‌های بسیار کارآمد از لحاظ مصرف سوخت^{۲۲} و سوخت‌های زیستی^{۲۳} نیز استفاده می‌شود. در شرکت‌های داروسازی نیز از نانوسلولز به عنوان ماده چسباننده در تولید قرص استفاده می‌شود. کاربردهای نانوسلولز در ساخت تامپون^{۲۴} و درمان پیشرفته زخم‌ها به تدریج در حال گسترش است. نقش حیاتی این نانومواد در محصولات فعلی مراقبت بهداشتی به سرعت رو به گسترش است. نانوسلولز به عنوان جایگزین مناسبی برای مواد گران قیمت مانند الیاف و نانولوله‌های کربنی مطرح شده است. در حالی که قیمت الیاف کربن به بیش از ۲۰ دلار به ازای هر کیلوگرم می‌رسد، نانوبلورهای سلولزی دارای قیمت ۱۰-۴ دلار به ازای هر کیلوگرم است. به همین سبب، نانومواد سلولزی برای کاربرد به عنوان تقویت کننده ساختار کامپوزیت‌های پلیمری سودمند هستند [۲۶].

حوزه خودرو

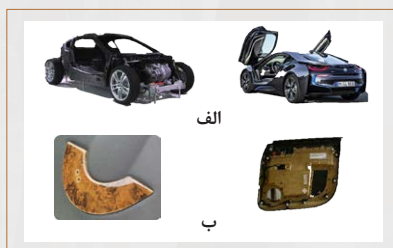
فناوری نانو و نانومواد برای صنعت خودرو بسیار با اهمیت است، چرا که همزمان با برآوردن نیازهای مشتری و لازمه‌های مشخص شده در استانداردها و مراجع ناظر، عملکرد اتومبیل‌ها را نیز بهبود می‌دهد. بر طبق آخرین ارزیابی انجام شده، قیمت محصولات مبتنی بر فناوری نانو که در صنعت اتومبیل در سال ۲۰۱۰ استفاده شده‌اند، تقریباً ۲۴۶ میلیون دلار بوده است و بر اساس تخمین‌ها این رقم تا پایان سال ۲۰۱۵ به بیش از ۸۸۸ میلیون دلار (محاسبه به صورت محافظه کارانه) و یا ۱۸۵۲ میلیون دلار (محاسبه به صورت خوش بینانه) خواهد رسید [۲۷]. مواد میکرومتری و نانومتری مبتنی بر سلولز به دلیل فراوانی میزان دسترسی آن‌ها، تجدیدپذیری، چگالی کم، ماهیت زیست محیطی بی خطر (غیر سمی بودن) و خواص مکانیکی برجسته [۳۵-۲۸]، در صنعت اتومبیل مورد توجه بسیاری قرار گرفته‌اند.

توسعه مواد سبک وزن یک هدف کلیدی برای صنعت خودرو است. صنعت خودرو به سوی استفاده از مواد سبک وزن و محکم به منظور افزایش رانندمان سوخت و وسایل نقلیه حرکت می‌کند. به همین دلیل است که سازندگان اتومبیل به دنبال مواد و شیوه‌های جدیدی برای ایمن ساختن اتومبیل و در عین حال سبک‌تر کردن وزن آن می‌باشند [۳۶]. به عنوان مثال، شرکت BMW یک بدنه کامل خودرو از جنس الیاف سبک وزن کربن،

پلاستیک تقویت شده همراه با برخی قسمت‌های داخلی ساخته شده از اجزاء چوبی توسعه داده است که در شکل ۱-الف نشان داده شده است. مثال دیگر شرکت Volvo است که به منظور کاهش وزن پنل‌ها، پنل داخلی درب را از کامپوزیت چوب/پلاستیک ساخته است که در شکل ۱-ب نشان داده شده است. بر طبق برآورد CAFE^{۲۵}، کاهش ۱۰ درصدی وزن یک خودرو می‌تواند مصرف سوخت آن را ۸-۶ درصد کاهش دهد [۳۷].

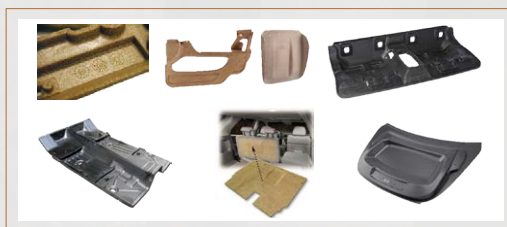


« شکل ۱. الف) خودرو
BMW مدل i8 از جنس
الیاف سبک وزن کربن و
پلاستیک تقویت شده ب)
قسمت های داخلی درب
خودرو VOLVO



از جمله کاربردهای نانومواد سلولز در حوزه خودرو می توان به کاربرد کامپوزیت ها و روکش های سطحی مبتنی بر نانومواد سلولز در اجزای بدنه، فضای داخلی و پنل های داخلی اتومبیل اشاره نمود. به دلیل پتانسیل مواد کامپوزیت های مبتنی بر نانومواد سلولز در کاهش وزن اجزاء ضمن حفظ استحکام، از آن ها در اجزاء بدنه اتومبیل استفاده می شود. همچنین در مورد فضای داخلی خودرو نیز مزیت استفاده از نانومواد سلولز این است که ظاهر و مقاومت سطح را در برابر سایش و خراش بهبود داده و ظاهری موزون و وزنی سبک را فراهم می سازد. از دیگر کاربردهای نانومواد سلولز در حوزه خودرو می توان به کاربرد آن ها در صندلی ها، کف اتاق^{۲۶}، روکش سقف، داشبورد، تایر، لامپ های جلو و سپر اتومبیل اشاره نمود. نمونه ای از این محصولات در شکل ۲ نشان داده شده است. کاربرد نانومواد سلولز، قابلیت بازیافت اجزاء اتومبیل را بهبود داده و قسمت هایی از اتومبیل که از مواد پایدار ساخته شده است را افزایش می دهد. همچنین نشان داده شده است که فوم های مبتنی بر نانوسلولز دارای سفتی استثنایی بوده و برای کاربرد به عنوان مواد ضربه گیر مناسب اند [۴۰-۳۸].

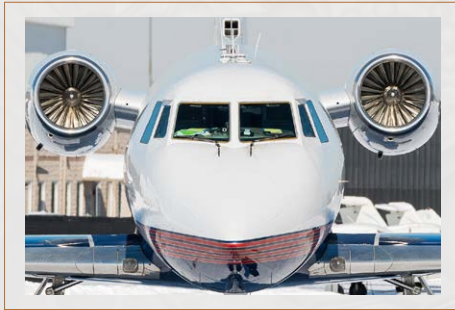
« شکل ۲. نمونه ای از
کاربردهای نانومواد سلولزی
در صنعت خودرو



حوزه هوافضا

به دلیل قابلیت نانو کامپوزیت ها در کاهش وزن، تلاش های زیادی برای کاربردی کردن و تجاری سازی آن ها در صنایعی مانند هوافضا در حال انجام است. با توجه به بحث پایداری، کاربرد ویژه قطعات نانو کامپوزیتی تقویت شده با مواد زیستی و روکش های نانو ساختار در حوزه های خودرو، هوافضا، ساخت و ساز، پزشکی و بسته بندی به سرعت در حال افزایش است. این نانو کامپوزیت های سبب با وجود چگالی کم، وزن سبک و هزینه بالقوه کم، استحکام مکانیکی بالایی را فراهم می آورند [۴۱]. از جمله خواص بهبود یافته توسط این نانو کامپوزیت ها می توان به پایداری ابعادی، استحکام ساختاری، مقاومت گرمایی، مقاومت شیمیایی، کاهش وزن و هدایت الکتریکی اشاره نمود. این کاربردها به دلیل شرایط لازم برای کارایی بالای مواد جدید در هوافضا،

در دسته‌های کاربردی با حجم کم قرار می‌گیرند، اما در زمانی طولانی‌تر احتمال می‌رود که نانو کامپوزیت‌های تقویت‌شده با نانوسلولز در کاربردهای گسترده‌تری مورد پذیرش قرار گیرند [۴۲].



علاوه بر ساختارهای هوایی، قطعات داخلی بسیاری نیز با استفاده از مواد سبک‌وزن برای صنایع هوایی طراحی شده‌اند. از این نانومواد در کاربردهای متداولی چون کاربرد در تخته‌های کف^{۲۷}، پوشش داخلی سقف^{۲۸}، پنل‌ها، پایه‌ها و دیگر اجزاء استفاده می‌شود، اما امروزه کاربرد نانو کامپوزیت‌ها در ساخت صندلی‌ها در کانون اصلی توجه قرار گرفته است [۴۳]. سبک‌سازی صندلی‌ها می‌تواند کاهش‌های عمده‌ای را در وزن هواپیما ایجاد

نماید. طراحی باریک صندلی‌ها نیز به مهندسان این اجازه را می‌دهد تا تعداد صندلی‌های هواپیما را هر چند جزئی افزایش دهند. استفاده از کامپوزیت‌ها در صندلی‌ها، روکش‌های سطحی اجزای بدنه، فضای داخلی و همچنین در قطعات گوناگونی مانند براکت‌ها^{۲۹}، گیره‌ها^{۳۰}، میزهای پذیرایی^{۳۱}، پایه‌ها^{۳۲} و دیگر ساختارها در حال افزایش است. با کاهش وزن هواپیما، بازده سوخت افزایش یافته و انتشار گازهای گلخانه‌ای نیز کاهش می‌یابد [۴۲]. همچنین ممکن است از اجزاء حاوی نانومواد سلولز، برای تهیه مواد سیم‌کشی و ساخت محفظه^{۳۳} ماهواره‌ها نیز استفاده شود. در این مورد، مزیت استفاده از نانومواد سلولزی، کاهش وزن، بهبود پایداری ابعادی و مقاومت حرارتی است.

به طریق مشابه با حوزه خودرو، کاربرد نانوسلولز در این صنعت نیز به دو دسته کاربرد در اجزاء ساختاری و اجزاء داخلی تقسیم‌بندی می‌شود. در دسته اجزاء ساختاری باید بیان نمود که سالیانه تقریباً ۱۵۰۰ هواپیمای تجاری ساخته می‌شود. اندازه کل بازار برای تمام کامپوزیت‌های ساختاری برابر ۸۸۰۰ تن است [۴۴]. از آنجایی که در چند سال اخیر شرایط اقتصادی بهبود یافته و برنامه‌های جدیدی نیز ایجاد شده‌اند، سازندگان اجزاء هواپیما، نرخ تولید کامپوزیت‌ها را با حفظ کیفیت آن‌ها به منظور برآورده ساختن نیازهای شرکت‌های هواپیمایی، افزایش داده‌اند. تقریباً ۶۵ درصد از کامپوزیت‌ها با استفاده از الیاف تقویت‌کننده ساخته می‌شوند که از این میان، میزان بالقوه بازار برای نانومواد سلولزی در حال حاضر ۵۷۵۰ تن است. کامپوزیت‌های تقویت‌شده با CNF به طور مستقیم با کامپوزیت‌های فوق مستحکم تقویت‌شده با الیاف کربن به منظور جایگزینی مستقیم ورقه‌های آلایژ آلومینیوم رقابت خواهند کرد، اما انتظار نمی‌رود که این مواد به طور کامل به بازار نفوذ داشته باشند. ممکن است میزان بازار از مقدار ۵۷۵ تن (میزان ۱۰ درصد نفوذ به بازار) تا ۲۹۰۰ تن (میزان ۵۰ درصد نفوذ به بازار) با مقدار تخمینی متوسط ۱۷۰۰ تن (میزان ۳۰ درصد نفوذ) در سال تغییر داشته باشد. در مورد اجزاء داخلی^{۳۴} OEM باید بیان نمود که تقریباً ۱۵۰۰۰ تن از مواد کامپوزیتی هم در هواپیماهای جدید و هم هواپیماهای بازسازی‌شده به منظور جایگزین کردن قطعات آلایژ آلومینیوم، استفاده می‌شوند. بازار ایجاد شده توسط بازسازی هواپیماها در حقیقت دو برابر بزرگتر از بازار هواپیماهای جدید است. به دلیل این که صنایع هوایی موجود می‌توانند از

این مواد بسیار سبک سود ببرند، بازار بالقوه نانومواد سلولزی ۹۸۰۰ تن است [۴۴]. کامپوزیت های تقویت شده با CNF به طور مستقیم با کامپوزیت های نسبتاً گران قیمت اما محکم تر تقویت شده با الیاف کربن رقابت خواهند نمود. نظر به این که هزینه قسمت های داخلی، نیروی محرکه بزرگتری نسبت به استحکام بسیار بالا است، به احتمال زیاد میزان نفوذ به بازار بالا خواهد بود. به عنوان نتیجه، تخمین زده می شود که میزان بازار از مقدار ۵ هزار تن (میزان ۵۰ درصد نفوذ به بازار) تا ۱۰ هزار تن (میزان ۱۰۰ درصد نفوذ) با مقدار تخمینی محتمل ۷ هزار تن (میزان ۷۵ درصد نفوذ) در سال تغییر داشته باشد [۴۵].

■ حوزه ساخت و ساز

فناوری نانو می تواند کاربردی بودن و دوام مواد ساختمانی از قبیل سیمان، عایق، پنجره ها و غیره را افزایش دهد. ورود نانومواد به صنعت ساخت و ساز



می تواند برخی ویژگی های ارزشمند چون خودتعمیر شوندگی، خود تمیز شوندگی، مقاومت در برابر آب و هوا و میکروب و همچنین رسانایی الکتریکی را افزایش داده و قابلیت کاهش آلودگی را به ساختمان ها و زیرساخت ها هدیه دهد. انتشارات تغییر دهنده آب و هوا ناشی از ساخت و ساز، حدود ۷۰ درصد کل انتشارات دی اکسید کربن جهان را تشکیل می دهند. از این رو، در حال حاضر بر روی بهره وری منابع مواد استفاده شده در بخش

ساختمان، تمرکز شده است. این امر به ویژه با در نظر گرفتن استانداردهای جدید در حال ظهور در بخش ساخت و ساز (CEN/TC 350) برای ساختمان های مقاوم در اتحادیه اروپا، مناسب است. با این حال، ممکن است کاربرد تقویت کننده های نانوسلولزی، در این زمینه یک تغییر اساسی ایجاد کند. این امر هنوز در مراحل ابتدایی خود قرار دارد، اما نسبت به تقویت کننده های لیفی بسیار امیدوار کننده تر می باشد.

■ سازه های چوبی و کامپوزیتی

به دلیل این که در صنایع ساختمان/ساخت و ساز، از دامنه وسیعی از مواد کامپوزیتی چوبی از جمله ورقه های الیافی، پل های ساختاری، محصولات چوبی مهندسی شده و غیره به طور سنتی استفاده می شود، توسعه مواد کامپوزیتی مبتنی بر چوب، یک بخش بزرگ محسوب شده و البته نسبتاً پیچیده است. نمونه ای از این محصولات در شکل ۳ نشان داده شده است. کاربردهای نانومواد سلولز در این حوزه شامل کاربرد کامپوزیت های مبتنی بر نانومواد سلولز، روکش های سطحی، مواد افزودنی در دیوارها، سطوح خودتعمیر شونده در ساختمان، بلوک های ساختمانی نانوسلولزی، اجزاء ساختاری مبتنی بر چوب، عایق های صوتی، فوم های نانو/هیدروژل ها، سیمان یا بتن است.

» شکل ۳. الف) محصولات
چوبی مهندسی شده، ب) الوار،
ج) کامپوزیت‌های چوب-پلیمر



■ عایق‌ها

در مورد عایق کاری و صدابندی^{۳۵} ساختمان‌ها، آئروژل‌های نانومواد سلولز ماده عایق بسیار نازکی را فراهم خواهند آورد. در طی سال‌های گذشته، پیشرفت‌هایی جهت ساخت مواد عایق کاری ارزان‌تر، نازک‌تر و دارای قابلیت تنفس بیشتر صورت گرفته است. البته هنوز ماده عایق کاری تمام عیاری پیدا نشده است، ولی آئروژل‌ها یکی از گزینه‌های برتر در این حوزه هستند [۴۶]. این مواد جدید در مقایسه با هرگونه مواد جامد متخلخل شناخته شده، دارای کمترین چگالی توده‌ای می‌باشند که این ویژگی یکی از خصوصیت‌های قابل توجه در مواد عایق کاری است. به دلیل این که از مقادیر کمی نانومواد سلولز در آئروژل‌ها استفاده می‌شود تا یک ماده عایق کاری عالی با ورودی‌های انرژی پایین^{۳۶} به دست آید، این حوزه از کاربردهای نانومواد سلولز در دسته‌های کاربردی با حجم کم قرار می‌گیرد. اندازه بازار کاربرد نانوسلولز در آئروژل‌ها به عنوان ماده عایق کاری از حداقل مقدار ۴۸ هزار تن (۲ درصد نفوذ) تا مقدار ۱۶۸ هزار تن (۷ درصد نفوذ) با مقدار تخمینی متوسط محافظه کارانه ۱۲۰ هزار تن (۵ درصد نفوذ) تغییر می‌کند [۴۵].

■ سیمان و بتن

از نانومواد سلولز برای تقویت سیمان و بتن پیش تنیده و پیش ساخته^{۳۷} به منظور افزایش چقرمگی و ماندگاری آن‌ها استفاده می‌شود. بتن خاصیت ترد و شکننده



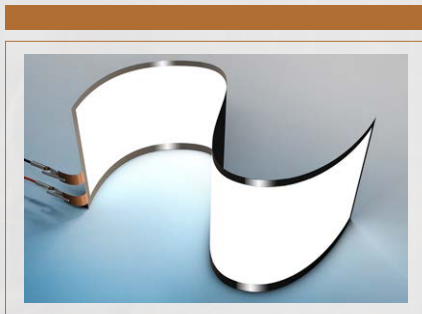
دارد و با استفاده از ترکیبی از نانومواد سلولزی و فیبریل‌های میکرومتری سلولز می‌توان چقرمگی آن را افزایش داد [۴۷]. این الیاف می‌توانند مزیت دیگر سیستم‌های تقویت کننده با فیبریل‌های میکرومتری و نانومتری را با هزینه بسیار کم‌تری ایجاد کنند. با یک تغییر جزئی در فرآوری و افزودن ۳ درصد فیبریل‌های میکرومتری و نانومتری به ترکیب، می‌توان انرژی شکست

ترکیب را نسبت به ماده تقویت نشده تا حدود بیش از ۵۰ درصد افزایش داد. مزایایی چون کاهش حجم سیمان مورد نیاز سبب پایین آمدن میزان مصالح و هزینه‌های کار شده و در نتیجه منجر به کاهش انتشار گاز گلخانه‌ای مربوطه می‌شود. افزودن مقدار بسیار جزئی ۰/۵ درصد وزنی یا ۳ درصد حجمی تقویت کننده نانومواد سلولزی، در بهبود مقاومت سختی شکاف در بتن بهینه است [۴۸]. بازار جهانی نانومواد سلولزی مورد استفاده در سیمان از صفر تا ۸/۲۵ میلیون تن متریک (۵۰ درصد نفوذ به بازار) با مقدار تخمینی متوسط ۴/۱۳ میلیون تن متریک (۲۵ درصد نفوذ به بازار) تغییر می‌کند.

اجزای ساختاری ساختمان

در مورد دیوارهای تیغه‌ای و سایر اجزاء ساختاری، توانایی نانومواد سلولز در بهبود نسبت استحکام به وزن و افزایش مقاومت در برابر آب، مزیت اصلی خواهد بود. از نانومواد سلولزی می‌توان به عنوان روکش محافظ تخته‌های گچی دیوارها نیز استفاده نمود. کاربرد نانومواد سلولزی در روکش دیوارها سبب مستحکم‌تر شدن و سبک‌تر شدن دیوارهای تیغه‌ای و افزایش مقاومت آن‌ها در برابر آب می‌شود که در نتیجه در برابر افزایش و تغییر شکل قالب نیز مقاومت پیدا می‌کند [۴۹]. سبک‌وزن شدن می‌تواند انرژی چرخه حیات و اثرات موادی مصالح ساختمانی را کاهش داده و به عنوان مثال امتیازهایی سبز را برای ساختمان در راه رسیدن به تأییدیه LEED^{۳۸} به ارمغان آورد. اندازه بازار کاربرد نانوسلولز به عنوان روکش محافظ بر روی تخته‌های گچی دیوارها از حداقل مقدار ۵/۵ هزار تن (۲۵ درصد نفوذ) تا حداکثر مقدار ۱۶/۵ هزار تن (۷۵ درصد نفوذ) با مقدار تخمینی متوسط ۱۱ هزار تن (۵۰ درصد نفوذ) در سال تغییر می‌کند [۴۵].

حوزه الکترونیک



در زمان‌های نه چندان دور، تصور این که گروهی از مردم با کامپیوترهای کوچک در جیب‌شان قدم بزنند و بتوانند با هر شخصی در سراسر کره زمین فوراً از طریق لمس کردن صفحه نمایشگر آن‌ها ارتباط برقرار کنند، مشکل بود. به طور مشابه، تصور این موضوع که فناوری‌های حیرت‌انگیز به کجا پیش می‌روند نیز سخت است. تاکنون اکثر وسایل الکترونیکی سفت و سخت بودند و پوشش‌های شیشه‌ای داشتند. هم اکنون ترقی دادن

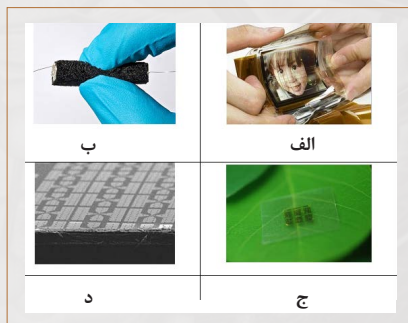
وسایل الکترونیکی از طریق انعطاف‌پذیر ساختن آن‌ها جذابیت‌های زیادی را در این زمینه ایجاد کرده است. در این راستا نانومواد سلولز نقش شایانی دارند. در مقیاس نانومتر، چوب به‌طور باورنکردنی مستحکم، سبک‌وزن و شفاف است که تمامی این مشخصه‌ها می‌توانند برای وسایل الکترونیکی سودمند باشند.

کاربردهای نانومواد سلولز در صنعت الکترونیک شامل مواد و کامپوزیت‌های مبتنی بر نانومواد سلولز برای استفاده به عنوان زیرلایه در مدارهای مجتمع، صنایع الکترونیکی انعطاف‌پذیر، اتاقک‌ها و اجزاء الکترونیکی است. صنایع الکترونیکی انعطاف‌پذیر شامل نمایشگرها، کارت‌های هوشمند، سلول‌های خورشیدی، برچسب‌های فرکانس رادیویی، ایمپلنت‌ها و کامپیوترهای پوشیدنی است. همچنین از نانوسلولز برای ساخت وسایل بیوالکترونیکی مبتنی بر سلولز شامل زیست‌حسگرها (ساختارهایی برای تثبیت بیولوژیکی^{۳۹})، انواع حسگرهای شیمیایی، گازی، حسگرهای با حساسیت بالا، حسگرهای نشان‌دهنده آلودگی و حسگر تغییر شکل (نانوسلولز رسانا) استفاده می‌شود. از دیگر کاربردهای نانومواد سلولز در حوزه الکترونیک می‌توان به کاربرد نانوسلولز در ساخت ورقه‌ها و پلیمرهای الکتروفعال^{۴۰} (با قابلیت کاربرد در پوست‌های هوشمند، میکرو ربات‌های حشره‌ای، اشیاء پرنده، سامانه‌های میکرو الکترومکانیکی، کاغذ دیواری هوشمند و غیره)،

LEDهای آلی یا OLEDها، ادوات فتوولتائیک، فیلم‌های فتونیک، مواد کارکردی^{۴۱}، مواد ساختاری هوشمند، دی‌الکتریک‌های مورد استفاده در ابرخازن‌ها، خازن‌های با مساحت سطح زیاد، باتری‌ها با چگالی توان بالا، فعال‌کننده‌های ایمن از لحاظ محیط‌زیستی^{۴۲}، فیلم‌های مورد استفاده در باتری‌های لیتیومی و صفحه نمایش‌های لمسی و همچنین کاربرد در حفاظ‌های الکترومغناطیسی (سلولز عامل دار شده) اشاره نمود. در شکل ۴ تعدادی از این کاربردها نشان داده شده است.

توسعه این کاربردها ناشی از توانایی نانومواد سلولز در ساخت محصولات بسیار پایدار و نیز دفع سازگار با محیط‌زیست محصولات استفاده‌شده یا غیر قابل استفاده، از طریق بازیافت یا بهبود زیست‌تخریب‌پذیری این محصولات است. اختلاط نانومواد زیست‌تجزیه‌پذیر سلولز، تولید لوازم الکترونیکی قابل بازیافت را ممکن می‌سازد. از این رو، ممکن است که نانومواد سلولز اثرات زیست‌محیطی را از طریق مهیا نمودن قابلیت بازیافت برای بسیاری از محصولات کاهش دهند.

» شکل ۴. الف) صفحه نمایشگر انعطاف‌پذیر، ب) باتری الاستیک و اسفنج مانند، ج) تراشه کامپیوتری ساخته شده از نانوفیبریل سلولز، د) ترانزیستور نانوسلولزی.



■ حوزه لوازم آرایشی، بهداشتی و محصولات مراقبت شخصی

نانومواد سلولزی قابلیت استفاده در لوازم آرایشی و بهداشتی (به طور مثال محصولات مورد استفاده برای موها، مژه‌ها، ابروها یا ناخن‌ها) به عنوان یک عامل مرطوب‌کننده و یا یک اصلاح‌کننده رئولوژی غیر آلرژی‌زا را دارد [۵۰]. تقاضای محصولات طبیعی و نیز رنگ‌دهنده‌های با کارایی بالا، نیاز به این محصولات را افزایش می‌دهد. از جمله کاربردهای دیگر نانومواد سلولز در حوزه لوازم آرایشی و بهداشتی می‌توان به کاربرد افزودنی‌های نانوسلولزی به عنوان مواد امولسیون‌کننده، کازمسوتیکال^{۴۳} (لوازم آرایشی و بهداشتی با مزایای دارویی یا پزشکی، مانند مرطوب‌کننده‌های بهبودیافته) و آنتی‌اکسیدان‌ها اشاره نمود. این گونه کاربردهای نانومواد سلولزی به دلیل ماهیت غیر سمی و غیر آلرژی‌زای آن‌ها است. این حوزه از کاربردهای نانومواد سلولزی در دسته‌های کاربردی نوین با حجم کم قرار می‌گیرند [۴۵].

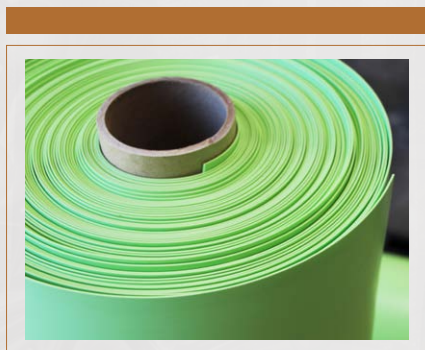
از جمله کاربردهای نانومواد سلولزی در محصولات مراقبت شخصی می‌توان به کاربرد آن‌ها در کرم‌های ضد آفتاب، محصولات بهداشتی، جاذب‌ها و پوشک‌ها اشاره نمود. خاصیت فوق‌العاده نانومواد سلولزی در جذب آب، سبب شده است که از آن‌ها به عنوان یک پرکننده ایده‌آل زیست‌تجزیه‌پذیر جاذب آب در انواع پوشک‌ها

استفاده شود [۵۱]. احتمال می‌رود که در این بازار، نیاز زیادی به محصولات جایگزین سبک‌تر، نازک‌تر و طبیعی باشد. در مقایسه با خاکچال کردن یا سوزاندن این محصولات، قابلیت تبدیل به کود کردن (کمپوست کردن) آن‌ها می‌تواند اثرات مصرفی آن‌ها را کاهش دهد.

میزان بازار برای انواع پوشک‌های یک‌بار مصرف برابر ۹۸ هزار میلیون واحد در سال [۵۲] یا ۲/۸ میلیون تن مواد جاذب است. نانومواد سلولزی طبیعتاً جاذب بوده و می‌توانند چندین برابر وزن خودشان آب را نگه دارند و بنابراین می‌توانند جایگزین مواد جاذب در این محصولات شوند. محدوده پذیرش نانومواد سلولزی در این حوزه در ایالات متحده آمریکا از مقدار ۴۲۰ هزار تن (میزان ۱۵ درصد نفوذ به بازار) تا ۱/۴ میلیون تن (میزان ۵۰ درصد نفوذ) با مقدار متوسط ۷۰۰ هزار تن (میزان ۲۵ درصد نفوذ) تخمین زده می‌شود [۴۵].

■ حوزه روکش و رنگ

خواص ورق پایه مواد کاغذ یا مقوا از لحاظ کیفیت روکش‌دهی، دارای اهمیت زیادی می‌باشند. ورق پایه کاغذ، یک ماده بسیار متخلخل با همواری و تخلخل متغیر است و این خواص به متغیرهای بسیاری از قبیل

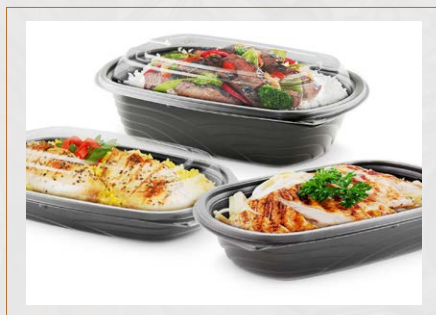


نوع لیف و عملیات، مقدار پرکننده، شرایط شکل‌گیری، فشردن مرطوب و پیش غلطک‌رانی^{۴۴} بستگی دارند. بر اساس خواص ورق پایه، مشخصات رئولوژیکی رنگ روکش و روش کاربرد رنگ، خواص نگهداری^{۴۵} رنگ روکش و خواص روکش‌نهایی تغییر خواهند کرد [۵۳]. کاربردهای نانومواد سلولز در این حوزه شامل کاربرد مواد افزودنی نانوسلولزی برای بهبود خصوصیات رنگ‌ها و روکش‌ها (جلا و اورتان‌ها)، کاربرد به عنوان اصلاح‌کننده رئولوژی، استفاده در

ساخت روکش‌های مقاوم در برابر خراش، روکش‌های ضد رسوب^{۴۶} و روکش‌های بسته‌بندی است. با افزودن نانوبلورهای سلولز (CNCs) می‌توان رئولوژی محیط‌های مختلف (مایعات، مذاب‌های پلیمری، مخلوط‌های دارای ذرات) را تغییر داد. نانوسلولز می‌تواند ویسکوزیته رنگ‌ها و روکش‌ها را اصلاح کند. افزودن ۲ درصد وزنی نانومواد سلولز ویسکوزیته و خصوصیات جریانی رنگ را افزایش می‌دهد [۵۴]. یک گروه فنلاندی، ماندگاری یک روکش رنگ را با استفاده از نانومواد سلولزی به عنوان یک افزودنی در رنگ‌ها و روغن جلاهای پلی‌یورتانی مبتنی بر آب، بهبود داده‌اند [۵۵]. بر طبق این تحقیق، نانومواد سلولزی ماندگاری پرداخت رنگ و روغن را بهبود داده و رنگ‌ها و روغن جلاها را از فرسایش ایجاد شده توسط تشعشع UV محافظت می‌کند. در کاربردهای صنعتی بسیاری از قبیل رنگ، روکش، چسب و لاک^{۴۷} از نانوسلولز به عنوان یک اصلاح‌کننده رئولوژی مواد استفاده می‌شود. این کاربردها به توانایی نانومواد سلولز در تحت تأثیر قرار دادن ویسکوزیته و خصوصیات کاربردی آن‌ها متکی می‌باشند. پیش‌بینی می‌شود که اندازه کل بازار بالقوه نانومواد سلولز در این حوزه ۴۸ هزار تن باشد.

■ حوزه بسته‌بندی مواد غذایی

از آنجایی که کاغذ نمی‌تواند خواص سدی مورد نیاز لازم در برابر اکسیژن و بخار آب را برای بسیاری از غذاهای



مختلف فراهم کند، از ورقه‌های پلاستیکی به تنهایی یا همراه با کاغذ یا مقوا منطبق شده بر آن، برای بسته‌بندی مرسوم مواد غذایی استفاده می‌شود. جایگزینی لایه‌های نازک/روکش‌های مبتنی بر مواد نفتی، یک چالش فنی عمده است. انواع کاربردهای فنی اعم از بسته‌بندی مواد غذایی و آشامیدنی تا صنایع انعطاف‌پذیر الکترونیکی و پیل‌های سوختی، نیازمند مواد سدگازی ارزان و خیلی انعطاف‌پذیر با عملکرد بالا می‌باشند [۵۶]. حفاظت سدی بالا در برابر

اکسیژن و بخار آب، مقاومت در برابر بو و روغن/چربی و نیز استحکام مکانیکی و انعطاف‌پذیری، مثال‌هایی از خصوصیات مهم هدف برای لایه‌های نازک بسته‌بندی مواد غذایی، لمینت‌ها و/یا روکش‌ها به منظور جلوگیری از تجزیه مواد غذایی/آشامیدنی و افزایش عمر مفید این محصولات، است.

نانومواد سلولزی همانند اکثر پلیمرها با پایه‌زیستی، خواص سد اکسیژنی خوبی را دارا می‌باشند [۵۹-۵۷]. این خصوصیات نانوسلولز، ناشی از بلورینگی و چگالی انرژی هم‌چسبی بالای آن است. به همین دلیل نانومواد سلولزی برای کاربردهای بسته‌بندی مورد توجه بسیاری قرار گرفته‌اند [۶۱ و ۶۰]. در حالت خشک (رطوبت نسبی صفر درصد)، نانوسلولز دارای پایین‌ترین نفوذپذیری اکسیژن در مقایسه با تمام مواد آلی بررسی شده است [۶۲]. از طرفی عملکرد نانوسلولز شدیداً به وسیله خواص نم‌گیری^{۴۸} (توانایی در جذب و نگهداری مولکول‌های آب) و جذب رطوبت، محدود شده و در رطوبت‌های نسبی بالاتر، وضعیت موانع نانوسلولزی وخیم‌تر می‌شود. برای مقابله با این مشکل، می‌توان به‌طور معمول از طریق ترکیب نانورس با لایه‌های نازک CNF خالص، نرخ انتقال اکسیژن را تا ده برابر کاهش داد.

کاربردهای نانومواد سلولز در حوزه بسته‌بندی مواد غذایی شامل کاربرد مواد و روکش‌های نانومواد سلولز به عنوان موانع، حسگر، پرکننده و یا اصلاح‌کننده‌های رئولوژیکی (در مورد فرآوری و ظاهر بسته‌بندی) است. نانومواد سلولز دارای خواص پیزوالکتریک اند و می‌توانند اصلاح سطحی شوند تا شرایط محتویات بسته‌بندی (به عنوان مثال خراب‌شدگی) را نشان دهند. همچنین از نانومواد سلولز در ساخت روکش‌های خوراکی، روکش بسته‌بندی و بسته‌بندی‌های نفوذناپذیر در برابر گازها استفاده می‌شود. این کاربرد، از توانایی نانومواد سلولز در فراهم آوردن یک سد بخار نشأت می‌گیرد که در نتیجه آن، تازگی بهبود یافته و بو نیز کاهش می‌یابد. علاوه بر این، نانومواد سلولز به عنوان ماده‌ای عایق برای مواد غذایی و آشامیدنی، در ساخت کاغذ برچسب مات یا برچسب‌های هوشمند، ساخت پلاستیک‌های مهندسی، پلاستیک‌ها و کامپوزیت‌های تقویت‌شده، زیست‌پلاستیک‌ها، مواد بسته‌بندی زیست‌تخریب‌پذیر و تجدیدپذیر، بسته‌بندی مبتنی بر الیاف و بسته‌بندی ایمن (تمپر پروف)^{۴۹} کاربرد دارند.

■ حوزه مقوا و بسته‌بندی

در این حوزه می‌توان به کاربرد نانومواد سلولزی در ساخت روکش مقوا، کاربرد به عنوان پرکننده در ساخت



مقوا و کاربرد در آثروژل‌های مبتنی بر سلولز به عنوان مواد ضربه گیر^{۵۰} در لایه‌های بسته‌بندی اشاره نمود. کاربرد نانومواد سلولز، سبب بهبود نسبت استحکام به وزن و دستیابی به محصولات نهایی سبک‌تر می‌شود. از جمله کاربردهای CNF در حوزه مقوا می‌توان کاربرد به عنوان افزایش‌دهنده استحکام در جهت Z^{۵۱} در مواد مقوا، مخصوصاً زمانی که از الیاف توده‌ای، مانند خمیر کاغذ شیمیایی ترمومکانیکی (CTMP)^{۵۲} یا الیاف حجیم استفاده می‌شود، اشاره نمود.

در فرآیند ساخت مقوا، نانومواد سلولزی کاربردهای بالقوه‌ای در بهبود استحکام و خصوصیات وزنی از خود نشان داده‌اند. انتظار می‌رود که کاربرد نانومواد سلولزی به عنوان پرکننده، بتواند قدرت پیوند بین الیاف را افزایش دهد. بنابراین با وجود استفاده از مقدار کم خمیر سلولز، نانومواد سلولز دارای تأثیر تقویت‌کنندگی خوبی بر مواد کاغذی اند [۶۳]. در نتیجه با داشتن یک بسته‌بندی سبک‌وزن‌تر، هزینه و مصرف سوخت مربوط به حمل و نقل نیز کاهش می‌یابد. اندازه بازار کاربرد نانومواد سلولز در روکش‌دهی مقوا ممکن است از مقدار ۸۵۵ هزار تن (۱۵ درصد نفوذ) تا ۱/۴۲۵ میلیون تن (۲۵ درصد نفوذ) با مقدار تخمینی متوسط ۱/۱۴ میلیون تن (۲۰ درصد نفوذ) در سال تغییر داشته باشد. همچنین اندازه بازار کاربرد نانومواد سلولزی به عنوان پرکننده در بسته‌بندی مقوایی نیز از حداقل مقدار ۳۱۰ هزار تن (۱۵ درصد نفوذ) تا ۷۲۴ هزار تن (۳۵ درصد نفوذ) با مقدار تخمینی متوسط ۵۱۷ هزار تن (۲۵ درصد نفوذ) در سال تغییر می‌کند [۴۵].

در حوزه روکش بسته‌بندی، انتظار می‌رود که نانومواد سلولزی به عنوان یک مانع در انواع کاغذهای ضد گریس و نیز به عنوان یک افزودنی با انتهای مرطوب در تسهیل نگهداری افزودنی‌ها مفید واقع شوند. همچنین نانومواد سلولزی باعث افزایش استحکام خشک و مرطوب انواع کالاهای کاغذی و محصولات مقوایی می‌شود [۶۴]. علاوه بر این، افزودن CNF به روکش‌ها، سبب بهبود چسبندگی جوهر به سطح و ایجاد کاغذهایی بسیار نازک و سبک می‌شود.

■ حوزه کاغذ و چاپ

مدت زمان زیادی است که آشکار شده است، مواد ریز ایجاد شده در طی کوبیدن و پالایش خمیرهای کاغذ، توانایی قابل توجهی در افزایش استحکام کاغذ دارند. این مواد ریز اغلب اوقات خاکه^{۵۳} یا کریل^{۵۴} نامیده می‌شوند. این مواد شامل فیبریل‌های سلولزی با ناهمسان‌گردی خیلی بالا و عرض معمولی ۱-۱/۱ میکرومتر اند. مواد ریز از انواع مختلف و قسمت‌های مختلف الیاف به دست می‌آیند و همچنین در تجهیزات مختلف کوبیدن نیز تولید می‌شوند. مفهوم خاکه‌ها، یک مفهوم گسترده و پیچیده در ساخت کاغذ است. پهنای خاکه حداقل

یک مرتبه از پهنای نانومواد سلولزی بزرگ‌تر است.

گزارش‌های نسبتاً معدودی در مورد تأثیرات نانوسلولز بر روی مواد کاغذ/مقوا^{۵۵} در مقالات وجود دارد [۶۵-۶۹]. مشخص شده است که CNF دارای اثرات تقویت استحکام بهتری نسبت به مواد ریز، اساساً به دلیل ناهمسان‌گردی عالی و مدول استحکام بالاتر، است. شرط لازم برای کاربرد موفقیت‌آمیز نانوسلولز، توانایی تسلط یافتن بر شیمی کاغذ است. به عبارتی باید بتوان نگهداری، شکل‌گیری و آب‌گیری آن را به اندازه کافی کنترل نمود. استحکام سطح کاغذ را می‌توان با کاربرد نانوسلولز، به دلیل خصوصیات عالی تثبیت سطح آن، بر روی کاغذهای چاپ بهبود داد.

از جمله کاربردهای نانومواد سلولز در صنعت کاغذ و چاپ می‌توان به استفاده از نانومواد سلولز در کاربردهای سطحی و پرکننده‌ها، کاغذ خاص، روکش کاغذ، لمینت و صفحه، کاربرد نانوبلورهای سلولز (CNC) در چاپ امنیتی و سه‌بعدی و کاربرد نانوسلولز در ساخت محصولات کاغذی ضد میکروبی اشاره نمود. با کاربرد نانومواد سلولز می‌توان خصوصیات سطحی محصول از قبیل صافی و چاپ‌پذیری را بهبود داد. همچنین نانومواد سلولز می‌توانند



استحکام را بهبود بخشیده و وزن پایه (گرماتر) محصول نهایی را کاهش دهند. نانومواد سلولز در مقایسه با نشاسته‌ها از این جهت که استحکام شبکه‌ای-مرطوب^{۵۶} بالاتری ایجاد می‌کنند، دارای مزیت ویژه‌ای هستند [۷۰]. کاربرد نانومواد سلولز ممکن است هزینه‌های تولید را کاهش دهد.

تحقیقات نشان می‌دهد که افزودن ۲ تا ۱۰ درصد CNF به عنوان پرکننده به کاغذ، به طور قابل توجهی کاغذ را از ۵۰ تا ۹۰ درصد تقویت و مستحکم خواهد کرد [۷۱]. اندازه بازار کاربرد نانوسلولز به عنوان پرکننده در کاغذ از مقدار ۳۱۰ هزار تن (۱۵ درصد نفوذ) تا ۷۲۴ هزار تن (۳۵ درصد نفوذ) با مقدار تخمینی متوسط ۵۱۷ هزار تن (۲۵ درصد نفوذ) در سال تغییر می‌کند [۴۵]. تولید سالانه کاغذ روکش شده در ایالات متحده آمریکا ۳۴ میلیون تن است [۷۲]. میزان ارزیابی شده بازار کاربرد نانوسلولز در روکش‌دهی کاغذ از مقدار ۳۵۱ هزار تن (۱۵ درصد نفوذ) تا ۵۸۵ هزار تن (۲۵ درصد نفوذ) با مقدار تخمینی متوسط ۴۶۸ هزار تن (۲۰ درصد نفوذ) در سال تغییر می‌کند [۴۵].

■ حوزه کامپوزیت/پلیمر

علاقه زیادی در کاربرد مواد مشتق‌شده از چوب در کامپوزیت‌ها، به دلیل فراوانی طبیعی و هزینه کم آن‌ها وجود دارد، اما این زمینه هنوز در مراحل مقدماتی خود قرار دارد. در حال حاضر، کامپوزیت‌های چوب-پلاستیک^{۵۷} (WPCs) دارای بازار ثابتی هستند. به منظور کاهش هزینه‌ها از الیاف چوبی استفاده می‌شود. عملکرد الیاف چوبی در این کامپوزیت‌ها بسیار شبیه به یک ماده پرکننده است. WPCها دارای انعطاف‌پذیری طراحی



و مقاومت بیشتر در برابر رطوبت نسبت به چوب‌اند [۷۳]. معمولاً از WPC ها در مصالح کف، حصارکشی، مبلمان، اسباب و وسایل و همچنین در پنل های خودرو استفاده می شود. کاربرد آن ها در بخش هایی است که هنگام کار، تنش های بالایی متحمل نشوند [۷۴]. از نانو مواد سلولز برای تولید نانو کامپوزیت ها، ساخت مواد و کامپوزیت های پلی اتیلن ترفتالات (PET) برای بطری ها استفاده می شود. از نانو مواد سلولز به عنوان تقویت کننده های

کامپوزیت یا پلیمر، پرکننده یا الیاف (تقویت کننده های کم هزینه) نیز استفاده می شود. در این حوزه، نانو مواد سلولز طیف وسیعی از ویژگی های امکان پذیر دارای ارزش افزوده از جمله استحکام بهبود یافته، سبک وزن بودن، حافظه شکلی و قدرت جذب آب را فراهم می کنند. نانو مواد سلولز می توانند جایگزین مواد افزودنی مبتنی بر نفت شوند و در نتیجه پایداری مواد کامپوزیتی را افزایش دهند. همچنین به دلیل این که نانو مواد سلولز زیست تجزیه پذیراند، کاربرد آن ها موجب می شود تا محصولات حاوی این مواد، قابلیت بازیافت داشته باشند. برای مثال، نانوبلورهای سلولز (CNC) و نانوفیبریل های سلولز (CNF) می توانند با پلی لاکتیک اسید (PLA) ترکیب شوند تا یک کامپوزیت زیست تجزیه پذیر تقویت شده با الیاف با منبع کاملاً زیستی به وجود آورند. خواص مکانیکی و نوری نانو مواد سلولزی سبب شده است تا ماده قابل توجهی برای تقویت کردن پلاستیک ها باشند. به عنوان مثال نانو مواد سلولزی عملکرد رزین های گرماسخت^{۵۸}، ماتریس های مبتنی بر نشاسته، پروتئین سبوس، لاکتکس و پلی (لاکتید) را بهبود می بخشد [۷۵]. کاربردهای کامپوزیتی آن ها ممکن است به عنوان روکش و لایه، رنگ، فوم و یا لایه های بسته بندی باشد. CNC را می توان طوری هم تراز نمود تا خواص نوری تنظیم پذیری شامل تغییر رنگ شفافیت^{۵۹} را به وجود آورد.

حوزه نفت و گاز

از جمله کاربردهای نانو مواد سلولز در صنایع نفت و گاز می توان به کاربرد آن ها در حفاری نفت (مواد افزودنی در سیالات حفاری)، پاک سازی نفت، ژل های جاذب نفت (آتروژل ها) و بازیابی نفت و گاز اشاره نمود. نانو مواد سلولز، کربن را جدا می کنند. این نانو مواد می توانند جانشینی برای محصولات مشتق شده از سوخت های فسیلی در کاربردهای مختلف باشند.

نمونه جدیدی از یک ماده اسفنج مانند از طریق ترسیب سیلان های^{۶۰} آب گریز بر روی آتروژل های بسیار متخلخل نانو مواد سلولز به منظور جداسازی مخلوط مایعات آب و نفت تهیه شده است. برای تهیه آن، ابتدا به وسیله خشکاندن انجمادی^{۶۱} محلولی آبی حاوی نانو مواد سلولز، آتروژل بسیار متخلخل (بیش از ۹۹ درصد) نانو مواد سلولز با انعطاف پذیری ساختاری و استحکام بالا شکل می گیرد. آتروژل های سبک وزن آب گریز قادر هستند تا مواد نفتی را از آب به صورت گزینشی جذب نمایند. ظرفیت جذب آتروژل ها حدود ۴۵ برابر



وزن خودشان در نفت است. همچنین می‌توان آتروژل را از نفت تخلیه کرده و سپس از آن برای چرخه جذب مجدد، دوباره استفاده نمود [۷۶، ۷۷].

همچنین از نانومواد سلولزی می‌توان به عنوان سیال شکافنده^{۶۲} در کاربردهای بازیابی نفت استفاده نمود [۷۸]. آتروژل‌ها اسفنج‌های فوق سبک هستند که می‌توانند به طور مؤثری تمام انواع مواد نفتی و حلال‌های ریخته شده را از قبیل مایعات استخراج گاز^{۶۳} تمیز نمایند. نفت

جذب شده توسط آتروژل‌ها برای استفاده قابل بازیابی است. آتروژل‌ها بسیار سبک‌وزن هستند و تقریباً از ۹۶ درصد هوا، ۲ درصد پلیمر و ۲ درصد نانومواد سلولزی تشکیل شده‌اند. از لحاظ شیمیایی این ترکیب عالی است، زیرا که آتروژل‌های ساخته شده با نانومواد سلولز آب‌گریز بوده و مواد نفتی را جذب می‌کنند. اندازه فعلی بازار برای آتروژل‌ها در این صنایع ۶۰۸ هزار تن است. همچنین ممکن است آتروژل‌های نانومواد سلولز جایگزین بسیار خوبی برای آتروژل‌های سیلیکا در صنایع نفت و گاز باشند. آتروژل‌های نانومواد سلولز دارای عملکرد مساوی یا بهتر با هزینه کمتر نسبت به آتروژل‌های نانومواد سیلیکا هستند. با داشتن این مزایای مشخص، انتظار می‌رود که درصد نسبتاً بزرگی از پذیرش نانومواد سلولز در بازار آتروژل قرار داشته باشد. اندازه بازار آتروژل در این حوزه از حداقل مقدار ۱۵۰ هزار تن (۲۵ درصد نفوذ) تا حداکثر ۴۵۰ هزار تن (۷۵ درصد نفوذ) با مقدار تخمینی متوسط ۳۰۰ هزار تن (۵۰ درصد نفوذ) متغیر است [۴۵]. با وجود توسعه کاربردهای دیگر نانومواد سلولزی در این حوزه مانند کاربرد آن‌ها به عنوان اصلاح‌کننده ویسکوزیته، باید توجه داشت که این ارزیابی‌ها بدون در نظر گرفتن این کاربردها است.

■ حوزه نساجی و پوشاک

مدت زمان زیادی است که از سلولز برای ساخت منسوجات مختلف استفاده می‌شود. برای مثال ریون از خمیر کاغذ یا سلولز ساخته می‌شود. اما اخیراً محققان یک نوع از نانومواد سلولز را توسعه داده‌اند که بسیار فرآیندپذیر است [۷۹]. با تولید این نانومواد، مهندسان قادر خواهند بود تا از موادی محکم‌تر، سبک‌تر و بسیار بادوام برای ساخت پوشاک در صنعت نساجی استفاده کنند. با توسعه روش‌های الکتروریسی به منظور تولید الیاف پیوسته، می‌توان پارچه‌های کامپوزیتی نانوسلولز را نیز توسعه داد [۸۰]. حرکت به سوی کاربرد مواد بسیار طبیعی در منسوجات، یک عامل تحریک‌کننده برای مصرف‌کننده است. این نانومواد زیست‌تجزیه‌پذیر می‌توانند اثرات دفع محصولات نساجی را که امروزه تشکیل‌دهنده ۵ درصد پسماندهای جامد شهری هستند، کاهش دهند. از جمله کاربردهای نانومواد سلولز در صنعت نساجی می‌توان به کاربرد در تولید نانوالیاف و نانوذرات (تکمیل منسوجات)، منسوجات بی‌بافت، منسوجات پزشکی (زخم‌پوش‌ها)، منسوجات ضد لکه، منسوجات خودتمیزشونده، ساخت الیاف مرکب پلیمری طبیعی/استتزی و کاربرد نانوسلولز در فرآیند ذوب‌ریسی برای

بهبود خواص رنگ‌رزی و استحکام الیاف اشاره نمود.

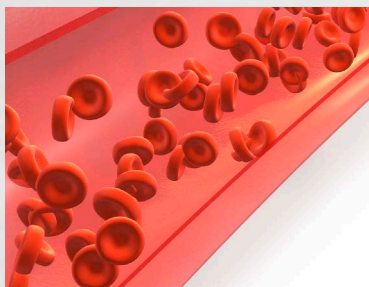


پیش‌بینی می‌شود که در ایالات متحده آمریکا، نرخ نفوذ نانومواد سلولزی به بازار در این حوزه، در محدوده‌ای بین مقدار ۲۷۵ هزار تن (میزان نفوذ ۲۵ درصد) تا ۸۲۵ هزار تن (میزان نفوذ ۷۵ درصد) با مقدار تخمینی محافظه کارانه متوسط ۵۵۰ هزار تن (میزان نفوذ ۵۰ درصد) متغیر باشد [۴۵]. باید توجه داشت که در صورت در نظر گرفتن کاربردهای خاص از قبیل

کاربردهای نظامی، کالاهای ورزشی، البسه با مد روز^{۶۴}، پرده و صنایع مبلمان به دلیل خصوصیات استحکام و نوری خوب نانومواد سلولز، سهم بازار افزایش خواهد یافت. با این حال این حوزه نیز در دسته‌های کاربردی با حجم کم قرار می‌گیرد.

■ حوزه پزشکی و دارویی

کاربردهای نانومواد سلولز در حوزه پزشکی شامل کاربرد آن‌ها در داربست بافت^{۶۵} (داربست زیستی مورد



استفاده در مهندسی بافت)، غشاهای درمان زخم، ساخت زخم‌پوش‌ها، پوست مصنوعی و غضروف^{۶۶}، رگ‌های جایگزین^{۶۷}، نانوالیاف مصنوعی، دارورسانی (سیستم‌های خود نانوامولسیون‌شونده برای انتقال دارو^{۶۸} SNEDDSها)، اکسیپنت^{۶۹} (ماده‌ای که برای جذب یا رقیق‌سازی مواد دارویی به کار برده می‌شود)، تصویربرداری زیستی (بهره‌گیری از خواص نوری نانوسلولز)، درمان سرطان، رهایش کنترل‌شده دارو، سرمایه‌های دندان‌سازی، کاربرد به عنوان عوامل کنتراست MRI و IR، کاربرد به منظور

رفتارهای فوق گرمایی و کاربرد به عنوان دارو احیاءکننده^{۷۰} است. در این حوزه به عنوان مثال، نانوالیاف مصنوعی کاربردهای فراوانی دارند. چند نمونه از این کاربردها شامل تحویل دارو و ژن، رگ‌های خونی مصنوعی، اندام‌های مصنوعی و ماسک‌های صورت است.

ممکن است از حامل‌های نانوسلولزی دارو برای مبارزه با انواع مختلف بیماری‌های ایجادکننده باکتری‌های مقاوم به آنتی‌بیوتیک، استفاده شود. در این نوآوری‌ها، زیست‌سازگاری و زیست‌تجزیه‌پذیری نانوسلولز از جمله عوامل محرک برای استفاده از نانوسلولز در دارورسانی و رسانش مواد دارویی می‌باشند [۸۱]. همچنین

پیشنهاد شده است که از پودر نانومواد سلولز به عنوان اکسیپنت در ترکیبات دارویی استفاده شود.

■ حوزه محیط‌زیست

در این حوزه می‌توان به کاربرد نانوسلولز در تصفیه آب و هوا (غشاءهای نانو ساختار)، تصفیه فاضلاب، ساخت کاتالیست‌های محیط‌زیستی و فعال‌کننده‌های ایمن از لحاظ محیط‌زیست اشاره کرد. برخی از محققان پیشنهاد کرده‌اند که برای زدودن آلاینده‌ها از هوا و آب می‌توان از ذرات آئروژل در صافی‌ها استفاده نمود. پیش



از این نیز از سلولز برای تصفیه ذرات ریز در آزمایش استاندارد پاک‌سازی آب و جمع‌آوری ذرات از هوا استفاده شده است. برای مثال، صافی‌های آب اغلب متکی بر کربن فعال جهت جذب ناخالصی‌های شیمیایی هستند. این‌ها فقط یک صافی ذغال‌جویی جذب‌کننده با کمی بار الکتریکی مثبت جهت جذب یون‌های منفی در مواد شیمیایی مضراند. چنین صافی‌هایی خیلی خوب کار می‌کنند و آزمایشات نشان داده‌اند که آئروژل‌ها

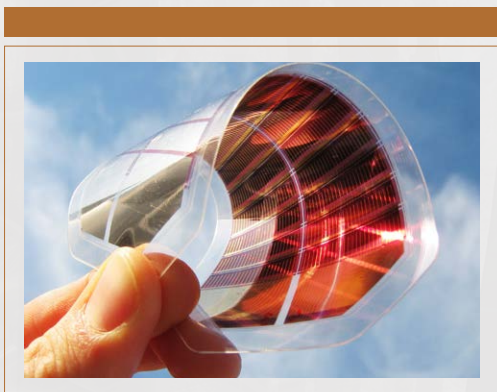
می‌توانند ۱۳۰ مرتبه بیشتر از کربن فعال آلاینده‌ها را جذب کنند [۸۲]. ممکن است در آینده آئروژل‌ها هم بتوانند از ریزش‌های سمی مایعات جلوگیری کرده و هم در زمانی که ریزش اتفاق می‌افتد، به پاک‌سازی آن‌ها کمک کنند. نانوسلولز جاذب بسیار خوبی است که می‌تواند در زدودن گزینشی آلاینده‌ها مورد استفاده قرار گیرد.

علاوه بر این شرکت‌ها در حال طراحی، توسعه و بهینه‌سازی فوم‌ها، صافی‌ها، غشاءها و مواد جاذب نوین با پایه زیستی با گزینش‌پذیری ویژه و بالا با استفاده از ترکیبات نانومواد سلولز و نانوکیتین^{۸۱} برای تصفیه آب صنعتی نامتمرکز و تصفیه آب خانگی هستند. یک شرکت سوئدی یک شیوه نوین برای تصفیه آب توسعه داده است. در این روش، ترکیب فرآیند تصفیه فیزیکی با فرآیند جذب سطحی توانایی نانومواد سلولز و یا نانوکیتین را برای جذب سطحی گزینشی، ذخیره‌سازی و دفع سطحی آلاینده‌ها از آب صنعتی و آب آشامیدنی با عبور از یک غشاء نفوذپذیر و بسیار متخلخل نشان می‌دهد [۸۳].

■ حوزه مواد غذایی

در این حوزه از نانومواد سلولز به عنوان مکمل غذایی (برای تثبیت امولسیون‌ها)، اصلاح‌کننده‌های ویسکوزیته (در بحث فرآوری مواد غذایی)، کاهش‌دهنده کلسترول (همانند سلولز باکتریایی^{۸۲}) و مواد افزودنی تیکسوتروپ^{۸۳} استفاده می‌شود. علاوه بر این از نانومواد سلولز در ساخت بسته‌بندی‌های زیست‌تخریب‌پذیر، کاتالیست‌های فرآوری مواد غذایی، حسگرهای آنالیز ایمنی و کیفیت مواد غذایی و در ساخت قارچ‌کش‌ها استفاده می‌شود.

■ سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی



در این حوزه می‌توان به کاربرد نانوسلولز در ساخت کلکتورهای الکترومغناطیسی خورشیدی نانوآنتن^{۶۴} (NECs)، پنل‌های خورشیدی انعطاف‌پذیر، کاتالیست‌های پیل سوختی، الکترودهای باتری، فتوکاتالیست‌های تولید هیدروژن، سلول‌های خورشیدی Paint-on، سلول‌های خورشیدی حساس شده به رنگ‌دانه^{۶۵} (DSSC) و سوخت‌های زیستی پیشرفته اشاره نمود. همچنین کاربرد نانوسلولز باعث بهبود بازده تبدیل انرژی در سلول‌های خورشیدی لایه نازک می‌شود.

■ سایر حوزه‌های کاربردی نانوسلولز

از جمله کاربردهای دیگر نانومواد سلولزی می‌توان به کاربرد نانوسلولز در ساخت وسایل ورزشی و اسباب‌بازی، چسب چوب، کاتالیست‌های صنعتی، لایه‌های پلیمری شفاف و رسانا، کاربردهای دما بالا در الاستومرها، کاربرد به منظور اصلاح رئولوژی مواد در کاربردهای دما بالا، کاربرد در مواد ساختمانی سلولزی^{۶۶} و شیشه‌های بالستیک ساختمانی^{۶۷}، مواد کارکردی با عملکرد بالا، سیستم‌های تقویت‌کننده آب‌گریز و کاربرد به عنوان تغلیظ‌کننده و یک امولسیون پایدار ابعادی اشاره نمود.

تخمین هزینه‌ها و بازار فناوری

بزرگ‌ترین بازارهای بالقوه نانومواد سلولزی در اروپا، بازارهای کاغذ/مقوا (۹۴ میلیون تن) و پلاستیک (۴۷ میلیون تن) می‌باشند. انتظار می‌رود که نانومواد سلولزی در هر دو بازار تأثیر عمده‌ای داشته باشند. بزرگ‌ترین بخش پلاستیک‌ها، بخش بسته‌بندی (۳۹/۴ درصد) و پس از آن بخش ساختمان و ساخت‌وساز (۲۰/۵ درصد) و سپس بخش خودرو (۸/۳ درصد) است [۸۴]. بخش ساختمان/ساخت‌وساز، تاکنون بزرگ‌ترین بخش زیست‌مواد جهان را به دلیل استفاده از اجزاء ساختاری مبتنی بر چوب، تشکیل داده است. پلاستیک‌ها دارای محدوده کاربردی وسیعی در بخش ساختمان می‌باشند و همان‌طور که اشاره شد، این بخش، دومین مصرف‌کننده بزرگ پلاستیک‌ها است.

تا به حال، ایالات متحده آمریکا منابعی را برای درک و توسعه برنامه‌های کاربردی نانومواد سلولزی، سرمایه‌گذاری کرده است. همچنین فناوری‌هایی با ظرفیت تولید در مقیاس پایلوت برای ساخت و تولید آن‌ها توسعه داده است. در حال حاضر ایالات متحده آمریکا دارای حدود ۷۵۱ میلیون هکتار جنگل است که ۴۴ درصد از آن‌ها توسط دولت‌های فدرال، ایالتی یا محلی مدیریت می‌شوند [۶]. صنعت محصولات جنگل،

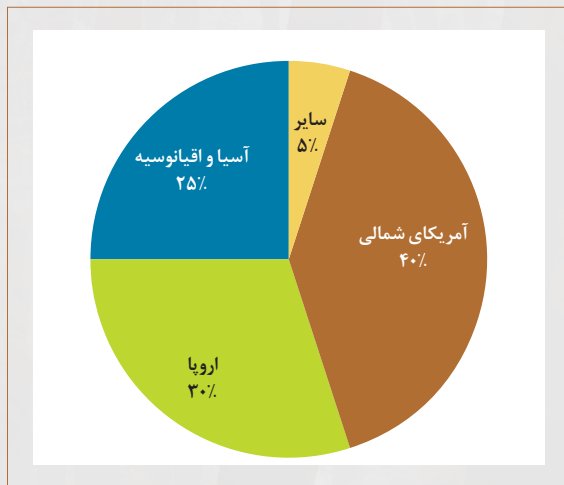


چوب را از جنگل‌ها به دست آورده و آن را به مقادیر زیادی الوار، کامپوزیت‌های چوب، خمیر کاغذ و محصولات کاغذی تبدیل می‌کند. در حال حاضر زیرساخت لازم برای حمایت از تولید نانومواد سلولز از جنگل در مقیاس بزرگ وجود دارد [۷]. توسعه موفقیت‌آمیز محصولات فعال‌شده با نانومواد سلولز، امکان تولید یک محصول نو ظهور با اهمیت را فراهم خواهد ساخت. تجاری‌سازی نانومواد سلولز برای صنعت کاغذ، به تنهایی می‌تواند به اندازه ۴۲۵۰۰۰ شغل جدید مستقیم و غیرمستقیم، تا سال ۲۰۲۰ در ایالات متحده به وجود آورد. با این حال،

تجاری‌سازی نانومواد سلولز در ایالات متحده به آرامی پیش می‌رود. از سال ۲۰۰۹، شرکت خدمات جنگل USDA^{۷۸}، در حدود ۲۰ میلیون دلار در بخش R&D نانومواد سلولز سرمایه‌گذاری کرده است که این مبلغ کسر کوچکی از ۶۸۰ میلیون دلار خرج‌شده در بخش R&D نانومواد سلولز، توسط دولت‌های سرتاسر جهان است [۶].

حد اقل و حداکثر حجم تولید جهانی نانوسلولز در سال ۲۰۱۴ به ترتیب ۴۰۰ تن و ۱۳۵۰ تن است و پیش‌بینی می‌شود که نانوسلولز در ۵ تا ۱۰ سال آینده تبدیل به یک محصول با حجم تولیدی بسیار بالایی شود [۸۵]. بر اساس پیش‌بینی‌های انجام شده، ارزش بازار انواع نانومواد سلولزی از ۲۵۰ میلیون دلار در سال ۲۰۱۴ با نرخ رشد ترکیبی سالیانه برابر با ۱۹ درصد تا سال ۲۰۱۹ به حدود ۶۰۰ میلیون دلار می‌رسد. متخصصان، نیروی محرکه رشد در این بازار را تقاضای پیشرفت در تکنولوژی‌های مورد استفاده در محصولات صنعتی توسط مصرف‌کننده‌نهایی دانسته‌اند. نابسامانی‌های شدید در بهای مواد نفتی و میزان بالای انرژی مورد نیاز برای تولید پلیمرهای سنتزی و مواد شیمیایی در این رویکرد به سمت نانوسلولز موثر هستند. سرمایه‌گذاری‌های خصوصی و دولتی در ایالات متحده آمریکا، اروپا و ژاپن نیز در این رشد تاثیرگذار هستند.

بزرگترین بازار نانوسلولز متعلق به آمریکای شمالی است و به نظر می‌رسد تا سال ۲۰۱۹ این روند حفظ شود. زیرا در این منطقه رشد فناوری بسیار زیاد بوده و صنایع سلامت و بهداشت توسعه زیادی پیدا کرده‌اند. همچنین اصرار بسیار زیادی بر توسعه بسته‌بندی‌های زیست‌تخریب‌پذیر وجود دارد. بعد از آمریکای شمالی، اتحادیه اروپا دومین بازار برای این محصولات به شمار می‌آیند. رشد این بازار در آسیا بسیار پایدار است اما هم‌اکنون حجم این بازار از آمریکای شمالی و اروپا کمتر است. همچنین محوریت تولید این محصولات نیز ایالات متحده آمریکا و اتحادیه اروپا است. سهم پیش‌بینی شده این مناطق از بازار نانوسلولز در سال ۲۰۱۹ در شکل ۵ نشان داده شده است [۸۶].



» شکل ۵. سهم پیش‌بینی شده از بازار نانوسلولز برای مناطق مختلف در سال ۲۰۱۹ میلادی [۸۶]

نتیجه‌گیری

نانو مواد سلولزی می‌توانند عملکرد بسیاری از محصولات را بهبود داده و همچنین گزینه بسیار مناسبی برای جایگزینی مواد غیر تجدیدپذیر با سلولوز (فراوان‌ترین ماده آلی در روی زمین) باشند. همچنین این نانو مواد نوین، امکان ساخت محصولات جدید متعددی را فراهم می‌کنند. از جمله محصولاتی که می‌توان از نانو مواد سلولزی در آن‌ها استفاده نمود، می‌توان به محصولات متداول مشتق از چوب (به عنوان مثال کاغذ و بسته‌بندی)، محصولات غیرمتداول (به عنوان مثال سیمان و بتن پیش ساخته) و همچنین محصولات جدید (به عنوان مثال لوازم الکترونیکی انعطاف پذیر) اشاره نمود. در دهه گذشته، تعداد زیادی از گروه‌ها، مؤسسات و شرکت‌های تحقیقاتی در مورد کاربرد CNF در مقیاس بزرگ گزارش کرده‌اند. افزودنی‌های استحکام بخش در کاغذسازی، عوامل تقویت کننده در نانو کامپوزیت‌ها، مواد و مصالح ساختمانی، لایه‌های نازک و موانع زیست تخریب پذیر برای بسته‌بندی و ده‌ها کاربرد دیگر، از جمله زمینه‌های کاربردی بالقوه نانو مواد سلولوز هستند. در برخی از کاربردها مانند کاربردهای تخصصی گران قیمت (به عنوان مثال اکسپنت دارویی)، ممکن است از مقادیر نسبتاً کمی نانو مواد سلولزی استفاده شود، در حالی که کاربردهای دیگر (به عنوان مثال پل‌های در و قسمت‌های داخلی خودرو) از مقادیر بیشتری نانو مواد سلولزی استفاده می‌کنند. کاربردهای جدید این پتانسیل را دارند که با گذشت زمان به بخش‌های قابل توجهی از کاربردهای نانو مواد سلولزی تبدیل شده و بازار خوبی را نیز ایجاد نمایند. در حال حاضر محصولات جدید توسعه یافته در مراکز تحقیقاتی در سرتاسر جهان، می‌توانند به بازارهای بزرگ تری از نانو مواد سلولزی منتج شوند. بازارهای مبتنی بر فناوری نانو و نانو سلولز به‌طور پیوسته در حال توسعه و تکامل هستند. هم‌زمان با پیشرفت بازارهای آن‌ها، تخمین‌های بازار نیز تغییر خواهند کرد.

پی‌نوشت‌ها

- ۱ Polychlorinated biphenyl
- ۲ Dichlorodiphenyltrichloroethane
- ۳ Cellulose Nanofibers (CNF)
- ۴ Tunicates
- ۵ Nanofibrillated cellulose or Cellulose Nanofiber
- ۶ Cellulose nanocrystals (CNC)
- ۷ Nanocrystalline cellulose (NCC)
- ۸ Bacterial nanocellulose (BNC)
- ۹ Chitosan
- ۱۰ Hemicelluloses
- ۱۱ Anisotropy
- ۱۲ Turbak
- ۱۳ Herrick
- ۱۴ ITT Rayonier
- ۱۵ Carboxymethylation
- ۱۶ TEMPO-mediated oxidation, TEMPO(2,2,6,6-tetramethylpiperidin-1-yl) oxidanyl)
- ۱۷ Cationisation
- ۱۸ Native fibres
- ۱۹ d-glucose
- ۲۰ Environmental, health, and safety (EHS)
- ۲۱ Ultra-absorbent
- ۲۲ Fuel efficient
- ۲۳ Biofuel
- ۲۴ Tampon
- ۲۵ Corporate Average Fuel Economy (CAFE)
- ۲۶ Floor mat
- ۲۷ Floorboard
- ۲۸ Ceiling
- ۲۹ Bracket
- ۳۰ Clip
- ۳۱ Tray
- ۳۲ Plinth
- ۳۳ Housing
- ۳۴ Original equipment manufacturer
- ۳۵ Soundproofing
- ۳۶ Low energy inputs
- ۳۷ Pre-stressed and pre-cast concrete
- ۳۸ Leadership in Energy & Environmental Design
- ۳۹ Biological immobilization
- ۴۰ Electro-active paper (EAPap), electro-active polymer (EAP)
- ۴۱ Functional material
- ۴۲ Environmentally "safe" actuators
- ۴۳ Cosmeceuticals
- ۴۴ Precalendering
- ۴۵ Holdout
- ۴۶ Antifouling
- ۴۷ Lacquers
- ۴۸ Hygroscopic
- ۴۹ Tamperproof packaging
- ۵۰ Cushioning
- ۵۱ Z-strength enhancer
- ۵۲ Chemithermomechanical pulp (CTMP)
- ۵۳ Fines
- ۵۴ Crill
- ۵۵ Paper/board
- ۵۶ Wet-web
- ۵۷ Wood-plastic composites (WPCs)
- ۵۸ Thermosetting
- ۵۹ Transparency color changes
- ۶۰ Silanes

- ۶۱ Freeze-drying
- ۶۲ Fracturing fluid
- ۶۳ Gas fracking liquids
- ۶۴ High-Fashion
- ۶۵ Scaffold
- ۶۶ Cartilage
- ۶۷ Vessel substitutes
- ۶۸ Self-nanoemulsifying drug delivery systems (SNEDDS)
- ۶۹ Excipient
- ۷۰ Regenerative medicine
- ۷۱ Nano-chitin
- ۷۲ Bacterial cellulose
- ۷۳ Thixotropic
- ۷۴ Nanoantenna solar electromagnetic collectors (NECs)
- ۷۵ Dye sensitized solar cells
- ۷۶ Period cellular structural materials
- ۷۷ Structural ballistic glasses
- ۷۸ U.S. Department of Agriculture (USDA)

مراجع

- ۱ European Commission 2011, European commission (DG environment), plastic waste in the environment - final report. Paris: BIO Intelligence Service.
- ۲ Rochman CM, Browne MA, Halpern BS, Hentschel BR, HohE, Karpanagioti HK, Rios-Mendoza LM, Takada H, Teh S, Thompson RC. 2013. Classify plastic waste as hazardous. Nature. 494:169–171.
- ۳ Browne MA. 2008. Ingested microscopic plastic translocates to the circulatory system of the mussel, *Mytilus edulis*. EnviroSci Technol. 42:5026–5031.
- ۴ Uhrin AV, Schellinger J. 2011. Marine debris impacts to tidal fringing marsh in North – Carolina. J Mat Pollut Bull 62:2605–2611.
- ۵ Hirai H, Takada H, Ogata Y, Yamashita R, Mizukawa K, Saha Kwan C, Moore C, Gray H, Laursen D, Zettler ER, et al. 2011. Organic micropollutants in marine plastics debris from the open ocean and remote and urban beaches. MarPollut Bull. 62:1683–1692.
- ۶ Erickson, Britt E., “Transforming Nanocellulose.” Chemical & Engineering News, June 9, 2014, Vol. 92, 23, pp. 26–27.
- ۷ reland, Sean, Phil Jones, Robert J. Moon, Ted Wegner, and World Nieh. 2014. “Cellulose Nanomaterials: Technical State of Art.” PowerPoint presentation at NNI and USDA-Forest Service Workshop on Cellulose Nanomaterials, p4, Washington, DC, May 2014.
- ۸ Klemm, Dieter, et al. Nanocellulose: A new family of Nature-based materials. Angewandte Chemie International Edition. June 6, 2011, Vol. 50, 24, pp. 5438–5466.

- ۹ Eichhorn SJ, Dufresne A, Aranguren M, Marcovich NE, Capadona JR, Rowan SJ, Weder C, Thielemans W, Roman M, Renneckar S, et al. 2010. Review: current international research into cellulose nanofibres and nanocomposites. *J Mater Sci*. 45:1–33.
- ۱۰ Siró I, Plackett D. 2010. Microfibrillated cellulose and new nanocomposite materials: a review. *Cellulose*. 17:459–494
- ۱۱ Lavoine N, Desloges I, Dufresne A, Bras J. 2012. Microfibrillated cellulose - its barrier properties and applications in cellulosic materials: a review. *Carbohydr Polym*. 90:735–764. Inc.
- ۱۲ Turbak AF, Snyder FW, Sandberg KR. 1983. Microfibrillated cellulose, a new cellulose product: properties, uses and commercial potential. *J Appl Polym Sci Appl Polym Symp*. 37:815–827.
- ۱۳ Herrick FW, Casebier RL, Hamilton JK, Sandberg KR. 1983. Microfibrillated cellulose: morphology and accessibility. *J Appl Polym Sci Symp*. 37:797–813.
- ۱۴ Pääkkö M, Ankerfors M, Kosonen H, Nykänen A, Ahola S, Österberg M, Ruokolainen J, Laine J, Larsson PT, Ikkala O, Lindström T. 2007. Enzymatic hydrolysis combined with mechanical shearing and high-pressure homogenization for nanoscale cellulose fibrils and strong, gels. *Biomacromolecules*. 8:1934–1941.
- ۱۵ Uetani K, Yano H. 2011. Nanofibrillation of wood pulp using a high-speed blender. *Biomacromolecules*. 12:348–353.
- ۱۶ Wågberg L, Decher G, Norgren M, Lindström T, Ankerfors M, Axnaes K. 2008. The build-up of polyelectrolyte multilayers of microfibrillated cellulose and cationic polyelectrolytes. *Langmuir*. 24:784–795.
- ۱۷ Saito T, Kimura T, Nishiyama Y, Isogai A. 2007. Cellulose nanofibers prepared by TEMPO-mediated oxidation of native cellulose. *Biomacromolecules*. 8:2485–2491.
- ۱۸ Saito T, Nishiyama Y, Putaux JL, Vignon M, Isogai A. 2006. Homogenous suspensions of individualized microfibrils from TEMPO-catalyzed oxidation of native cellulose. *Biomacromolecules*. 7:1687–1691.
- ۱۹ Aulin C, Johansson E, Wågberg L, Lindström T. 2010. Self organized films from cellulose I nanofibrils using the layer-by-layer technique. *Biomacromolecules*. 11:872–882.
- ۲۰ Iszewska A, Eronen P, Johansson L-S, Malho JM, Ankerfors M, Lindström T, Ruokolainen J, Laine J, Österberg M. 2011. The behaviour of cationic cellulose in aqueous media. *Cellulose*. 18:1213–1226.
- ۲۱ Edgar CD, Gray DG. 2003. Smooth model cellulose I surfaces from nanocrystal suspensions. *Cellulose*. 10:299–306.
- ۲۲ Iwamoto S, Kai W, Isogai A, Iwata T. 2009. Elastic modulus of single cellulose microfibrils from tunicate measured by atomic force microscopy.

Biomacromolecules. 10:2571–2576.

۲۳ Tanpichai S, Quero F, Nogi M, Yano H, Young RJ, Lindström T, Sampson WW, Eichhorn SJ. 2012. Effective young's modulus of bacterial and microfibrillated cellulose fibrils in fibrous networks. Biomacromolecules. 13:1340–1349.

۲۴ Iiff Eberle Soydan Ozcan , "Nanocellulose Reinforced Polymers, Cellulosic Nanomaterials Workshop," Washington, DC, 21 May 2014.

۲۵ ehaqui H, Zhou Q, Ikkala O, Berglund LA. 2011. Strong and tough cellulose nanopaper with high specific surface area and porosity. Biomacromolecules. 12:3638–3644.

۲۶ Ted Wegner, seminar at Oak Ridge National Laboratory, Nov 2012.

۲۷ Nanotechnology and Nanomaterials in the Automotive Industry: Applications, Products, World Market, Companies and Revenues. Retrieved from Future Markets Inc.: http://www.futuremarketsinc.com/index.php?option=com_content&view=article&id=47,the-world-market-for-corroion&catid=1&Itemid=54, 2011, February.

۲۸ Kiziltas A., Nazari B., Gardner D.J. and Bousfield D.W., "Polyamide 6-Cellulose Composites: Effect of Cellulose Composition on Melt Rheology and Crystallization Behaviour," Polymer Engineering and Science DOI 10.1002/pen.23603, 2013.

۲۹ Ozen E, Kiziltas A. Erbas Kiziltas E. and Gardner D.J. Natural fiber blend-nylon 6

composites. Polymer Composites, 34:544-553 (2013).

۳۰ A. Kiziltas, Microcrystalline cellulose-filled engineering thermoplastic composites., Master of Science Thesis, University of Maine, Orono, Maine, USA, pp. 1-135 (2009).

۳۱ Kiziltas A., Gardner D.J., Han Y. and Yang H.-S. Thermal properties of microcrystalline cellulose (MCC)-filled PET-PTT blend polymer composites. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 103: 163-170 (2011).

۳۲ Kiziltas A., Gardner D.J., Han Y. and Yang H.-S. Dynamic mechanical behavior and thermal properties of microcrystalline cellulose (MCC)-filled Nylon 6 composites. Thermochimica Acta 519: 38-43 (2011).

۳۳ Kiziltas A. and Gardner D.J. Utilization of Carpet Waste as Matrix in Natural Fiber-Filled Engineering Thermoplastic Composites for Automotive Applications. Proceedings of SPE Automotive Composites Conference & Exhibition (ACCE) September 11-13, 2012 Troy MI.

۳۴ Ozen E, Kiziltas A. Erbas Kiziltas E. and Gardner D.J. Natural Fiber Blends Filled Engineering Thermoplastic Composites for Automobile Industry. Proceedings of SPE Automotive Composites Conference & Exhibition (ACCE) September 11-13, 2012 Troy, MI.

۳۵ Azizi Samir MA, Alloin F, Dufresne A. "Review of recent research into cellulosic whiskers, their properties and their

application in nanocomposite field." *Biomacromolecules*, 6 (2) 612-626 (2005).

۲۶ Vehicle Weight Reduction and Safety Concerns for meeting CAFE Standards. Retrieved from Flex Form Technologies: <http://www.naturalfibersforautomotive.com/?p=84> (May 2013).

۲۷ Huigin W. 2011 engineering plastics sector to see increase of 10.93%. Retrieved from China Economic Net: http://en.ce.cn/Insight/201202/01/t20120201_23034917.shtml.

۲۸ ääkkö M, Vapaavuori J, Silvennoinen R, Kosonen H, Ankerfors M, Lindström T, Berglund L, Ikkala O. 2008. Long and entangled native cellulose I nanofibers allow flexible aerogels and hierarchically templates for functionalities. *Soft Matter*. 4:2492-2499.

۲۹ Ikkala O, Ras RHA, Houbenov N, Roukolainen J, Pääkkö M, Laine J, Leskelä M, Berglund LA, Lindström T, ten Brinke G, et al. 2009. Solid state nanofibers based on self-assemblies: From cleaving to self-assemblies to multilevel hierarchical constructs. *Faraday Discuss (Soft Nanotechnol)*. 143:95-107.

۳۰ Aulin C, Netrval J, Wågberg L, Lindström T. 2010. Aerogels from nanofibrillated cellulose with tunable oleophobicity. *Soft Matter*. 6:3298-3305.

۳۱ "FMI, The Global Market for Nanocellulose to 2017, Future Markets Inc. Technology Report No. 60, Second Edition, 2012, p. 38".

۳۲ JO ANNE SHATKIN, THEODORE H.

WEGNER, E.M. (TED) BILEK, and JOHN COWIE, "Market projections of cellulose nanomaterial-enabled products– Part 1: Applications," *TAPPI JOURNAL*, vol. VOL. 13 NO. 5, MAY 2014.

۳۳ Red, C., "Composites in Aircraft Interiors, 2012-2022," *Composites World*, 2012. Available [Online] <http://www.compositesworld.com/articles/composites-in-aircraft-interiors-2012-2022> [20May2014].

۳۴ C. Red, "Composites in aircraft interiors, 2012-2022." *High Performance Composites*, <http://www.compositesworld.com/articles/composites-in-aircraft-interiors-2012-2022> [11 June 2014], September 2012.

۳۵ JOHN COWIE, E.M. (TED) BILEK, THEODORE H. WEGNER, AND JO ANNE SHATKIN, "Market projections of cellulose nanomaterial-enabled products-Part 2: Volume estimates," *TAPPI JOURNAL*, VOL. 13 NO. 6, JUNE 2014.

۳۶ FPL, "Forest Products Laboratory: Restoring America's Forests Through the Wise Use of Wood," *USDA Forest Products Laboratory*, Madison, WI, USA, January 2013, p. 13.

۳۷ Ardanuy, M., Claramunt, J., Arévalo, R., et al., *BioResources* 7(3): 3883(2012).

۳۸ Stephenson, K.M., "Characterizing the behavior and properties of nano cellulose reinforced ultra high performance concrete," *Ph.D. dissertation*, University of Maine, Orono, ME, USA, 2011.

- ۴۹ Harlin, A., "Research highlights in industrial biomaterials 2009–2012, VTT Research Highlights 5," VTT Technical Research Centre of Finland, Espoo, Finland, ISBN 978-951-38-7967-9, 2013, Available [Online] http://www.vtt.fi/files/download/scientific_reports/IndBioMat_research_highlights_2009_2012.pdf [21 May 2014].
- ۵۰ Williamson, W., "Nanocellulose On the cusp of commercialization?" ipw, 10-11/2012, p. 31, Available [Online] http://www.celluforce.com/upload/IPW_Nanocellulose_Final_131.pdf [21 May 2014].
- ۵۱ Larsson, K., Berglund, L.A., Ankerfors, M., et al., *J. Appl. Polym. Sci.* 125(3): 2460 (2012).
- ۵۲ Richer, C., "The diaper industry in the next 25 years, Insight, Available [Online] <http://www.disposablediaper.net/files/Diapernextyears.ppt> [11 June 2014], 2005.
- ۵۳ Kjellgren H, Engström G. 2006. Influence of base paper on the barrier properties of chitosan-coated papers. *Nordic Pulp Pap Res J.* 21:685–689.
- ۵۴ Forsström, U., "From nanocellulose science toward applications: Status update from Finland," *Int Conf. Nanotechnol. Renewable Mater.*, TAPPI PRESS, Atlanta, GA, USA, 2012. Session 24.
- ۵۵ VTT, "Innovation and Competitiveness from Nanocellulose," VTT Technical Research Centre of Finland, Espoo, Finland, 2011, Available [Online] <http://www.vtt.fi/news/2011/01192011nano.jsp?lang=en> [21 May 2014].
- ۵۶ Yang H-Y, Bolling L, Priolo MA, Grunlan JC. 2013. Super gas barrier and selectivity of graphene oxide-polymer multilayer thin films. *Adv Mater.* 25:503–508.
- ۵۷ Fukuzimi H, Saito T, Iwata T, Kumamoto Y, Isogai A. 2009. Transparent and high gas barrier films of cellulose nanofibers prepared by TEMPO-mediated oxidation. *Biomacromolecules.* 10:162–165.
- ۵۸ Syverud K, Stenius P. 2009. Strength and barrier properties of MFC films. *Cellulose.* 16:75–85.
- ۵۹ Aulin C, Gällstedt M, Lindström T. 2010. Oxygen and barrier properties of microfibrillated cellulose films. *Cellulose.* 17:559–574.
- ۶۰ Miller KS, Krochta JM. 1997. Oxygen and aroma barrier properties of edible films: a review. *Trends Food Sci Tech.* 8:228–237.
- ۶۱ Lange J, Wyser Y. 2003. Recent innovations in barrier technologies for plastic packaging—a review. *Packag Technol Sci.* 16:149–158.
- ۶۲ Lindström T, Ankerfors M, Aulin C. 2013. Nanofibrillated cellulose (NFC) – an emerging material for large-scale applications. Paper presented at: NanoTech, May 2013; Washington, DC.
- ۶۳ AF&PA, "Nanotechnology for the Forest Products Industry, Vision and

Technology Roadmap, American Forest & Paper Association, Agenda 2020 Technology Alliance, and Georgia Institute of Technology (IPST), 2004.

۶۳ Aulin, C., Gällstedt, M., and Lindström, T., Cellulose 17(3): 559(2010).

۶۵ Ahola S, Österberg M, Laine J. 2008. Cellulose nanofibrils adsorption with poly(amideamine) epichlorohydrin studied by QCM-D and application as a paper strength additive. Cellulose. 15:303–314.

۶۶ Eriksen Ö, Syverud K, Gregerson Ö. 2008. The use of microfibrillated cellulose produced from kraft pulp as strength enhancer in TMP paper. Nord Pulp Pap Res J. 23:299–304.

۶۷ Schlosser H. 2008. Nano Disperse Cellulose und Nano Fibrillierte Cellulose- neue Produkte fuer die herstellung und Veredelung von Papier und Karton. [Nano disperse cellulose and nano-fibrillated cellulose - new products for the manufacturing and refining, of paper and cardboard]. Wochenbl Papierfabr. 6:1–11. German.

۶۸ Taipale T, Österberg M, Nykänen A, Ruokolainen J, Laine J. 2010. Effect of microfibrillated cellulose and fines on the drainage of kraft pulp suspension and paper strength. Cellulose. 17:1005–1020.

۶۹ Johansson C, Bras J, Mondragon I, Nechita P, Plackett D, Simon P, Svetec DG, Virtanen S, Baschetti MG, Breen C, et al. 2012. Renewable fibres and bio-based materials for packaging applications

- a review of recent developments. BioResources. 7:2506–2552.

۷۰ Van de Ven TGM. 2008. Capillary forces in wet paper. Ind Eng Chem. 47:7250–7256.

۷۱ Berglund, L.A., and Peijs, T., MRS Bull. 35(3): 201(2010).

۷۲ AF&PA, "2011 Statistical Summary, Paper, Paperboard, Pulp, American Forest & Paper Association, Washington, DC, USA, 2012, pp. 3-19.

۷۳ Klyosov AA. 2007. Wood-plastic composites. Hoboken (NJ): Wiley.

۷۴ Mohanty AK, Misra M, Drzal LT. 2005. Natural fibers, biopolymers and biocomposites. Boca Raton (FL): CRC Press, Taylor and Francis Group; p. 875.

۷۵ Yu, L., et al., Prog. Polym. Sci. 31(6): 576(2006).

۷۶ Cervin, N., Aulin, C., Larsson, P., et al., Cellulose (London) 19(2):401(2012).

۷۷ Korhonen, J.T., Kettunen, M., Ras, R.H., et al., ACS Appl. Mater. Interfaces 3(6): 1813(2011).

۷۸ A. T. J.-E. S. J. e. a. Laukkanen. U.S. pat. Patent 20130035263, Feb. 7, 2013.

۷۹ Lyne, B., "Market Prospects for NanoCellulose," The Royal Institute of Technology, Alberta Biomaterials Development Centre, Edmonton, AB, Canada, February 2013.

۸۰ Moon, R., Beck, S., and Rudie, A., In Production and Applications of Cellulose Nanomaterials, Chap. 1, pp. 9-12, TAPPI PRESS, Atlanta, GA, USA, 2013.

^{۸۱} Kolakovic, R., Peltonen, L., Laaksonen, T., et al., AAPS PharmSciTech 12(4):1366(2011).

^{۸۲} Lerner, E.J., "Less is more with aerogels: A laboratory curiosity develops practical uses," The Industrial Physicist, 10(5): 26(2004), Available [Online] <http://www.aip.org/tip/INPHFA/vol-10/iss-5/p26.pdf> [21 May 2014].

^{۸۳} Mathew, A., "Functional membranes/filters with anti/low-fouling surfaces for water purification through selective adsorption on biobased nanocrystals and fibrils," NANOSELECT, Lulea Tekniska Universitet, University Campus, Porsoen, Lullea, Sweden, 2012.

^{۸۴} Plastics 2012. The facts 2012 – Plastic Europe and polyolefins moulding, thin wall packaging. Stenungsund (Sweden):Borealis.

^{۸۵} THE GLOBAL MARKET, Forecast from 2010 to 2025 ,Production volumes, prices, future projections and end user markets, "NANOMATERIALS FUTURE MARKETS", EDITION 1 ,MARCH 2015 £200, <http://www.futuremarketsinc.com>.

^{۸۶} <http://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/nano-cellulose-market-56392090.html>.

مجموعه نرم افزارهای «نانو و صنعت»

مجموعه نرم افزارهای نانو و صنعت با هدف معرفی کاربردهای فناوری نانو در بخش ها و صنایع مختلف طراحی و منتشر شده است. در این نرم افزار اطلاعاتی مفید و کاربردی در قالب فیلم مستند، مقاله، کتاب الکترونیکی و مصاحبه با کارشناسان، در اختیار فعالان صنعتی کشور و علاقمندان به فناوری نانو قرار داده شده است. تاکنون شش عنوان از مجموعه نرم افزارهای نانو و صنعت با موضوع کاربردهای فناوری نانو در صنایع «نفت»، «خودرو»، «نساجی»، «ساخت و ساز»، «بهداشت و سلامت» و «کشاورزی»، ارائه شده است.

مرکز پخش: ۶۶۸۷۱۲۵۹ – www.nanosun.ir



از مجموعه گزارش‌های صنعتی فناوری نانو منتشر شده است



■ کاربردهای فناوری نانو در خنک کاری قسمت‌های مختلف نیروگاه

■ کاربرد فناوری نانو در روش فیلتراسیون اسمز معکوس

■ درخت‌سان: نانوحاملی در عرصه سلامت

■ فناوری‌های نوین در استفاده از آب‌های تخریب شده به عنوان منبع آب مصرفی صنایع مختلف

■ مدخل هوا-نانو الیاف

■ رنگ‌های محافظ در برابر امواج الکترومغناطیس

■ کاربرد فناوری نانو در رنگ‌ها و پوشش‌های آب‌گریز

■ کاربرد فناوری نانو در رنگ‌های آنتی‌فولینگ

■ کاربرد نانورنگ‌ها، نانوپوشش‌ها و سازه‌های ضدحریق در صنعت ساختمان

■ کاربرد سامانه‌های رنگ‌سنجی مبتنی بر اسپکترو فتومتری در صنایع رنگ

■ نانوحسگرهای تشخیص تهدیدات بیولوژیکی

■ نانوحسگرهای تشخیص سرطان

■ کاربرد فناوری نانو در صنعت کفپوش‌های نساجی

■ کاربرد فناوری نانو در صنعت ترانزیستور و مدارهای مجتمع

■ پوشش‌ها، کفپوش‌ها و سازه‌های مقاوم در برابر لغزش

■ بررسی و کاربرد نانوفوتوکاتالیست‌ها در حوزه‌های مختلف

■ کاربرد فناوری نانو در روش فیلتراسیون اسمز مستقیم

■ آزمایشگاه روی تراشه

■ کاربرد نانولوله‌های کربنی در فلزات

■ نانو حسگرهای مورد استفاده در صنایع غذایی و آشامیدنی

■ فولادهای نانوساختار

■ فناوری نانو و محیط‌های کنترل شده کشت (CEA)

■ نانوحسگرهای تشخیص سموم کشاورزی

■ کاربرد فناوری نانو در شیشه‌های هوشمند (۱)

■ نانوآفت‌کش و اثر آن در کنترل آفات

■ کاربرد فناوری نانو در صنعت مفره

■ کاربردهای فناوری نانو در صنایع غذایی

■ کاربرد فناوری نانو در روغن‌های روان‌کننده

■ نانو افزودنی‌های سوخت

■ کاربرد نانوالیاف در کشاورزی

■ کاربرد فناوری نانو در سیمان و سیال حفاری

■ کاربرد نانوساختارها در فناوری‌های جداسازی غشایی

■ نانوفیلترهای لیفی

■ فناوری‌های نوین در مدیریت و افزایش بهره‌وری آب در نیروگاه‌های گرمایی

■ فولاد نانوساختار Sandvik Nano flex

■ کاربرد فناوری نانو در صنعت سیم و کابل

■ کاربرد فناوری نانو در صنعت دیودهای نورافشان LED

■ کاربردهای فناوری نانو در تولید انرژی الکتریکی

■ کاربردهای نانومواد سلولز در صنعت خودرو

■ کاربرد نانوکامپوزیت‌های پلیمری در صنعت خودرو

■ کاربرد فناوری نانو در پوشاک

■ کاربرد فناوری نانو در رنگرزی منسوجات

■ کاربرد فناوری نانو در منسوجات ورزشی / بیرونی

■ کاربرد فناوری نانو در تولید منسوجات خود تمیزشونده

■ سلول‌های خورشیدی رنگ‌دانه‌ای

■ نانوحسگرهای پایش آلودگی ذرات معلق در هوا

■ نانوحسگرهای تشخیص دهنده پاتوژن‌های میکروبی

■ در مواد غذایی

■ کاربردهای فناوری نانو در چاه ارت

■ کاربرد نانوحسگرها در تشخیص و کنترل رطوبت خاک