تولید نانو الیاف به روش الکتروریسی

زهره جناب

نانو الیاف

به طورکلی الیاف از نظر ابعاد به ســه دسته الیاف معمولی، میکرونی و نانوالیاف طبقه‌بندی می‌شوند. الیاف میکرونی الیافی هستند که در آنها رشته‌ها کمتر از یک دنیر می‌باشد. الیاف با قطر کمتر از یک میکرومتر را نانوالیاف می‌نامند. امروزه به عنوان یکی از مهمترین محصولات فناوری‌های نانو در بسیاری از حوزه‌ها به ویژه در پوشــش‌های زخم، مهندسی بافت، حوزه‌های دارویی، صنایع نساجی، صنایع رنگ و پوشش، صنایع شیمیایی فناوری اطلاعات و ارتباطات، تولید و ذخیره‌سازی انرژی و نیز صنایع نانوکامپوزیت ، بهینه‌سازی مصرف انرژی پیل‌های خورشیدی، محیط زیست، نانوالیاف کربن، انواع حســگرهای زیستی و شیمیایی، حوزه‌های مرتبط با زیست فناوری کشاورزی و ... کاربردهای زیادی پیدا کرده است.

انواع نانوالیاف

با افزودن برخی تجهیزات به دستگاه‌های الکتروریسی نانو الیاف مختلفی را می‌توان تولید کرد که شامل:

۱- نانو الیاف آرایش‌یافته
۲- نانو الیاف بافته شده
۳- نانو الیاف هیبریدی دو یا چند جزیی
۴- نانو الیاف هسته-پوست
۵- نانو الیاف سرامیکی
۶- نانو الیاف توخالی
۷- نانو الیاف نواری شکل
۸- نانو الیاف متشکل از دانه‌های تسبیح
۹- نانو الیاف متخلخل

باتوجه به مواد سازنده اولیه نانوالیاف به چند دسته تقسیم می‌شوند:

۱- نانوالیاف پلیمری
۲- نانوالیاف کربنی
۳- نانوالیاف معدنی
۴- نانوالیاف کامپوزیتی

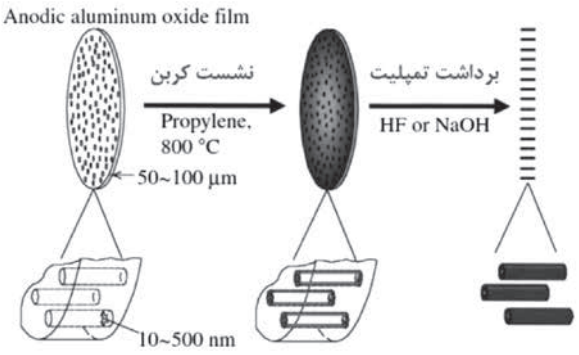
روش‌هایی برای تولید نانوالیاف

کشش

تکنیک کشش روشی ساده و کم هزینه برای تولید سیم‌های فوتونیکی است. اما به توزیع پایداری از حرارت در نقطه کشش نیاز دارد و طول سیم تولید شده در حد چند صد میکرومتر است. همزمان با کشش انعقاد هم رخ می‌دهد. مرحله انعقاد با خنک کردن یا تبخیر حلال صورت می‌پذیرد.

تولید از قالب

یکی از روش‌های موثردر تولید نانوالیاف یا نانولوله‌ها استفاده از تکنیک‌های پایه غشــایی است. در این روش‌ها یک قالب نانوساختار متخلخل به عنوان اسپینرت (ریسنده) یا قالب استفاده می‌شود. چون کانال‌ها ابعاد بسیار دقیق و منظمی دارند، قطر و نسبت منظر الیاف نسبت طول به قطر یا aspect ratio به خوبی قابل کنترل اســت. از مهم‌ترین ویژگی‌های این روش می‌توان به تولید نانوالیاف پلیمرهای هادی، فلزات، نیمه‌هادی‌ها و کربن اشاره کرد. ولی با استفاده از این روش نمی‌توان نانوالیاف پیوسته تولید کرد.



شکل ۱- تولید نانوالیاف کربنی با روش قالب

خودآرایی

مکانیزم اصلی خودآرایی نیروی‌های بین مولکولی است که واحدهای کوچک را در کنار یکدیگر قرار می‌دهد. اتصال هیدروژنی، پیوند یونی، الکترواستاتیک، آبگریزی و واندروالسی می‌توانند مولکول‌ها را به شکل الیاف در آورند. خودآرایی یکی از روش‌های تولید نانوساختارها با رویکرد پایین به بالا است. در این روش از مولکول‌ها و دسته‌های مولکولی به عنوان واحد سازنده ساختار بزرگتر استفاده می‌شود.

جدایش فازی

این روش که جزو روش‌های زمان بر محسوب می‌گردد با کاهش دمای محلول

پلیمری که از ترکیب یک ماده پلیمری با حلال مناسب بدست آمده اقدام به تولید ژل می‌شـــود. پس از تولیـــد ژل آن را درون حلال دیگری غوطه‌ور می‌کنند که سبب می‌شود ژل از حلال ابتدایی جدا شود و به این شکل بین دو فاز جدایش رخ می‌دهد. در حال حاضر استفاده از فرآیند الکتروریسی در تولید نانوالیاف نسبت به سایر روش‌ها برتری دارد. این روش در مقایسه با سایر روش‌ها ساده، کم هزینه، تکرارپذیر می‌باشد.

الکتروریسی

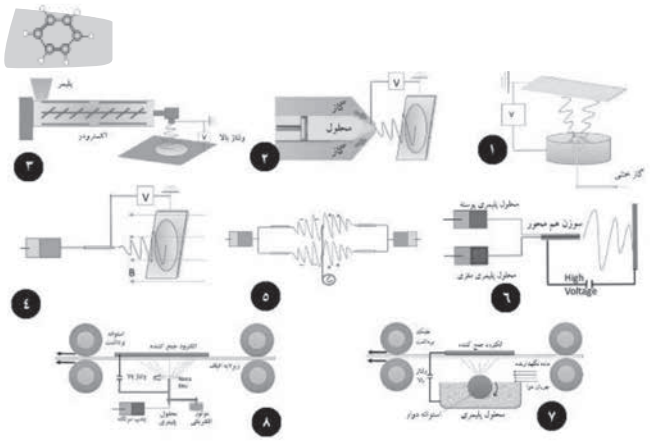
الکتروریسی بعنوان یک روش ساده و ارزان در تولید الیاف بسیار نازک از محلول پلیمری مطرح می‌باشد. روشی با نیروی محرکه الکترواستاتیکی برای تولید نانوالیاف است. نانوالیاف از محلول مایع یا مذاب پلیمری که از لوله موئین به منطقه با میدان الکتریکی بالا تغذیه می‌شود، تشکیل می‌شوند.

اندازه و ریزســـاختار نانوالیاف با متغیرهای عملیاتی متفاوتی کنترل می‌شود. این متغیرها، ویسکوزیته محلول، ولتاژ، نرخ تغذیه، هدایت محلول، فاصله هدف و لوله موئین و اندازه لوله هستند. نانوالیاف الکتروریسی شده معمولاً به صورت بی‌نظم یا جهت‌دار روی صفحه دوبعدی جمع آوری می‌شوند در شکل ۴ شماتیک فرایند الکتروریسی آورده شده است و در جداول ۱ و ۲ روش‌های تولید نانوالیاف با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

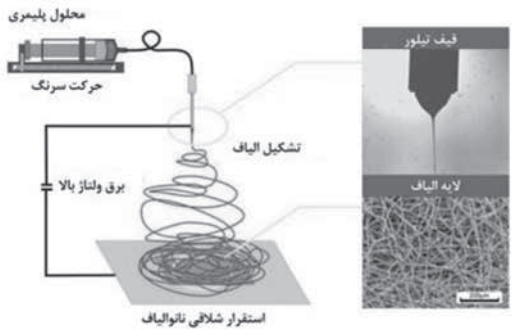
فرآیند الکتروریسی الیاف نازک و فوق نازک برای اولین بار در سال ۱۹۳۰ اختراع شد. رنکر و چان الیاف پلی‌آنیلین را از اسیدسولفوریک درون یک حمام انعقاد تهیه کردند. چان نیز برای اولین بار الیاف PAN را از طریق فرآیند الکتروریســـی تهیه نمود و سپس نانوالیاف کربنی را از طریق پیرولیز الیاف PAN تهیه نمود. به دلیل سطح ویژه ی بالای نانوالیاف بدست آمده از روش الکتروریسی می‌توان از آن‌ها به عنوان فیلتر و بافت در فرآیندهای مهندسی بافت استفاده کرد.

الکتروریسی روشی با نیروی محرکه الکترواستاتیکی برای تولید نانوالیاف است. نانوالیـــاف از محلول مایع یا مذاب پلیمـــری که از لوله موئین به منطقه با میدان الکتریکی بالا تغذیه می‌شود، تشکیل می‌شوند. زمانی که نیروهای الکترواستاتیکی بر تنش سطحی مایع غلبه می‌کنند، یک مخروط تیلور تشکیل می‌شود و یک جت باریک به ســـرعت به سمت هدف (جمع‌کننده) متصل به زمین و یا با بار مخالف شتاب می‌گیرد. ناپایداری در این جت موجب حرکت‌های ضربه‌ای شدید می‌شود که به تبع آن جت طویل و باریک شده و اجازه می‌دهد حلال تبخیر شود و یا مذاب سرد شود و نانوالیاف روی سطح هدف تشکیل شوند. بار الکتریکی جت، موجب خم شدن لیف می‌شود به طوری که با هر بار حلقه شدن، قطرش کاسته می‌شود.

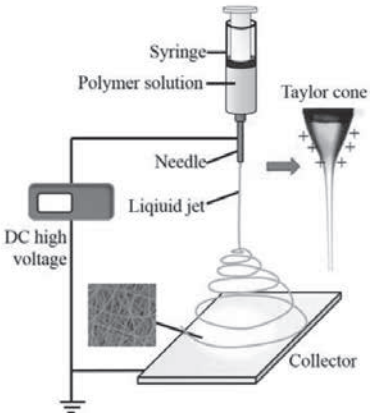
اندازه و ریزســـاختار نانوالیاف با متغیرهای عملیاتی متفاوتی کنترل می‌شود. این متغیرها، ویسکوزیته محلول، ولتاژ، نرخ تغذیه، هدایت محلول، فاصله هدف و لوله موئین و اندازه لوله هســـتند. روش الکتروریسی بسیار تطبیق‌پذیر بوده و محدوده وسیعی از مواد پلیمری با محدوده وسیعی از قطر الیاف (نانومتر تا چند میکرومتر)، با این روش تولید می‌شوند. انواع مختلفی از مولکول‌ها به راحتی می‌توانند برای تولید نانوالیاف عامل‌دار در فرایند شرکت داده شوند. نانوالیاف الکتروریسی شده معمولاً به صورت بی‌نظم یا جهت‌دار روی صفحه دوبعدی جمع‌آوری می‌شوند در شکل ۳ شماتیک فرایند الکتروریسی آورده شده است و در جداول ۱ و ۲ روش‌های تولید نانوالیاف با یکدیگر مقایسه شده‌اند.



شکل ۲ - تکنیک الکتروریسی



شکل ۳- تکنیک‌های مختلف الکتروریسی (حبابی، روکش گازی، مذاب، مغناطیسی، به هم پیوسته، پوسته و مغزی، بدون سوزن، سانتریفیوژی)



شکل ٤- تصویر شماتیک سیستم الکتروریسی

جدول ۱- مقایسه روش‌های مختلف ساخت نانوالیاف

فرآیند	پیشرفت فناوری	امکان صنعتی شدن	تکرار پذیری	سهولت	کنترل ابعاد الیاف
کشش	آزمایشگاهی	×	✓	✓	×
سنتز با شابلون	آزمایشگاهی	×	✓	✓	✓
جدایش فازی	آزمایشگاهی	×	✓	✓	×
خودآرایی	آزمایشگاهی	×	✓	×	×
الکتروریسی	آزمایشگاهی	✓	✓	✓	✓

جدول ۲- مزایا و معایب روش‌های مختلف ساخت نانوالیاف

فرآیند	مزایا	معایب
کشش	نیازمند کمترین تجهیزات ظیف وسیعی از مواد	ناپیوستگی فرآیند نرخ تولید پایین
سنتز یا شابلون	امکان ساخت الیاف با قطرهای مختلف توسط شابلون های مختلف	اتلاف مواد محدودیت چیدمان و ابعاد الیاف
جدایش فازی	نیازمند کمترین تجهیزات امکان تولید مستقیم نانوالیاف بدست آوردن خواص مکانیکی مطلوب با تنظیم غلظت پلیمر چیدمان ۳ بعدی منافذ	محدود به پلیمرهای خاص عدم کنترل چیدمان الیاف
خودآرایی	مناسب برای ساخت نانوالیاف با قطر کمتر چیدمان ۳ بعدی منافذ	پیچیدگی فرایند
الکتروریسی	امکان تولید نانوالیاف پیوسته، بلند و مقرون به صرفه	ناپایداری جت منافذ دو بعدی

انواع ماشین‌آلات الکتروریسی

دستگاه‌های صنعتی الکتروریسی با دو مکانیسم اصلی الکتروریسی نازلی و بدون نازل

قابلیت‌ها و مشخصات

انعطاف‌پذیری

توسط این دستگاه مشخصات مختلف نانوالیاف از جمله تخلخل، شکل، قطر و توانایی گره‌دارشدن می‌تواند کنترل شود. فرایند آسان و مقرون به صرفه است.

بسیاری از انواع پلیمرهای مختلف از جمله پلیمرهای مصنوعی، طبیعی و زیست تخریب‌پذیر و/یا پلیمر/کامپوزیت می‌تواند توسط این دستگاه به نانوالیاف تبدیل شوند.

کاربری آسان

پارامترهای الکتروریسی می‌توانند به راحتی توسط پانل کنترل شوند.

دستگاه آزمایشگاهی نازلدار بدون نازل سانتریفیوزی مذاب

مزایای استفاده از دستگاه الکتروریسی مذاب:

امکان الکتروریسی پلیمرهای فاقد حلال مناسب

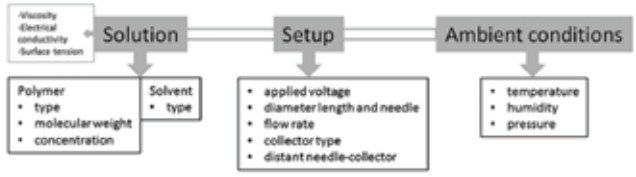
هزینه‌بری کمتر با توجه به امکان عدم استفاده از حلال دوستدار محیط‌زیست بودن

انواع روش‌های الکتروریسی

در حال حاضر، پژوهشگران درحیطه الکتروریسی بر دو زمینه الکتروریسی از محلول و الکتروریسی از مذاب تمرکز دارند.

پارامترهای موثر در الکتروریسی

مرفولوژی لیف مانند قطر آن و یکنواختی الیاف پلیمری الکتروریسی‌شده به پارامترهای زیادی بستگی دارد. این پارامترها به سه گروه پارامتر محلول پلیمری، پارامتر دستگاهی و پارامتر محیطی تقسیم می‌شوند (شکل ۵)



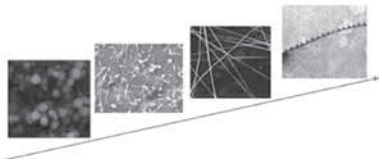
شکل ۵- شماتیک پارامترهای موثر بر فرایند الکتروریسی

پارامترهای محلول پلیمری

خواص محلول پلیمری اثر چشمگیری بر فرایند الکتروریسی و مرفولوژی الیاف تولید شده دارد. کشش سطحی به عنوان عامل مؤثر در تشکیل دانه‌ها در محور طولی الیاف نقش ایفا می‌کند.

غلظت

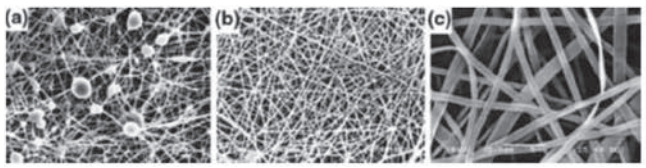
غلظت محلول پلیمری نقش موثری در تشکیل فیبر در فرایند الکتروریسی دارد. در یک غلظت مناسب نانوالیاف صاف و مستقیم تشکیل می‌شوند. در صورتی‌که غلظت بسیار زیاد باشد، به جای نانوالیاف، میکروربان‌های مارپیچ ایجاد خواهند شد.



شکل ٦- تصاویر محصولات حاصل از غلظت‌های متفاوت محلول الکتروریسی

وزن مولکولی

وزن مولکولی محلول پلیمری، تاثیر قابل توجهی بر مورفولوژی الیاف الکتروریسی شده ندارد. به طور کلی، وزن مولکولی محلول پلیمری بر گره‌خوردگی زنجیره‌های پلیمری تاثیر می‌گذارد که اصطلاحاً ویسکوزیته نامیده می‌شود.

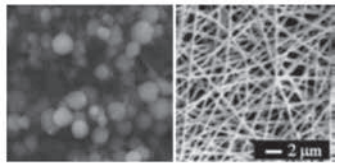


شکل ۷- تصاویری الیاف الکتروریسی‌شده از محلول‌های پلیمری با وزن مولکولی متفاوت

ویسکوزیته محلول

ویسکوزیته محلول نیز یک عامل کلیدی در تعیین مورفولوژی الیاف است. در

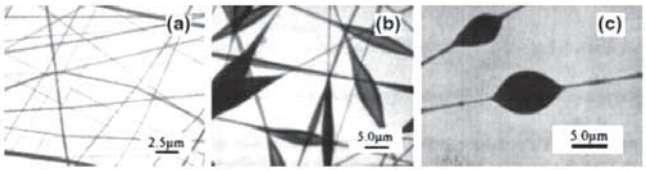
شرایطی که ویسکوزیته محلول بسیار کم باشد، امکان دستیابی به الیافی پیوسته و صاف وجود نخواهد داشت و در نقطه مقابل نیز ویسکوزیته بسیار بالای محلول نیز منجر به پرتاب شدید جت محلول می‌شود.



شکل ۸- تصاویر با ویسکوزیته‌های مختلف

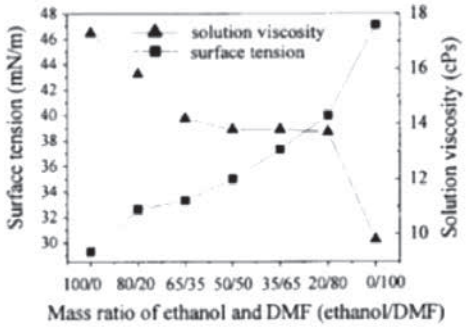
کشش سطحی

کشش سطحی که تابعی از ترکیب محلول پلیمری است عامل مهمی در الکتروریسی به شمار می‌رود. در سال ۲۰۰۴، Yang و Wang تاثیر کشش سطحی را بر مورفولوژی محصولات الکتروریسی‌شده از محلول PVP به عنوان مدل و اتانول، DMF و MC به عنوان حلال بررسی کردند. نتایج نشان داد که در یک غلظت ثابت، کاهش کشش سطحی در تبدیل دانه به الیاف مفید خواهد بود.



شکل ۹- تصاویر غلظت و اتانول

با افزودن پایدارکننده به محلول نیز می‌توان کشش سطحی را کاهش داد. افزودن پایدارکننده، بازدهی تولید الیاف یکنواخت را افزایش می‌دهد.



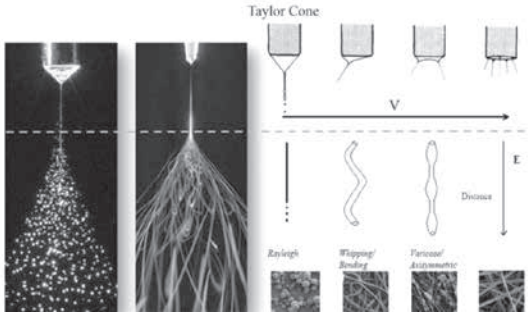
شکل ۱۰- تغییرات کشش سطحی و ویسکوزیته با کسر جرمی اتانول

رسانایی محلول

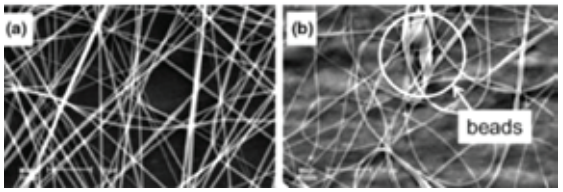
حداقل رسانایی الکتریکی در محلول برای الکتروریسی ضروری است و محلول‌های فاقد رسانایی نمی‌توانند الکتروریسی شوند رسانایی محلول اساساً تابع نوع پلیمر، نوع حلال و نمک است.

شرایط فرایند

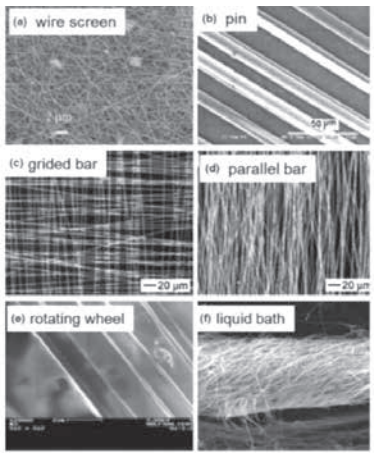
پارامترهای مهم دیگری که فرایند الکتروریسی را تحت تأثیر قرار می دهند، عبارتند از ولتاژ اعمالی، نرخ تغذیه، نوع جمع کننده و فاصله بین نوک سوزن و جمع کننده.



شکل ۱۱- تصویر شماتیک اثرات توامان ولتاژ و فاصله



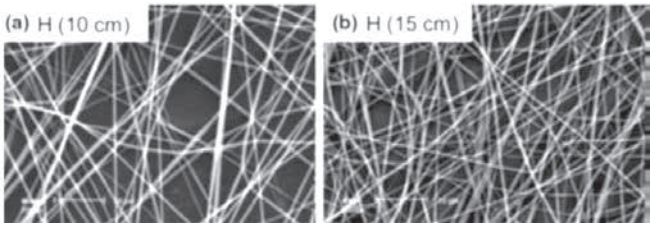
شکل ۱۲- تصاویر SEM نحوه تاثیر نرخ تغذیه بر مورفولوژی الیاف PSF الکتروریسی شده از محلول 20 PSF/DMAC% با اعمال ولتاژی معادل ۱۰ kV. نرخ تغذیه a و b به ترتیب، ۰،٤ و ۰،٦٦ ml/h است.



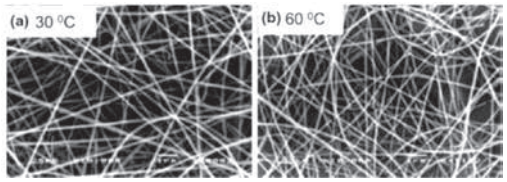
شکل ۱۳- تصاویر SEM محصولات الکتروریسی مختلف به دست‌آمده از جمع‌کننده‌های مختلف

پارامترهای محیطی

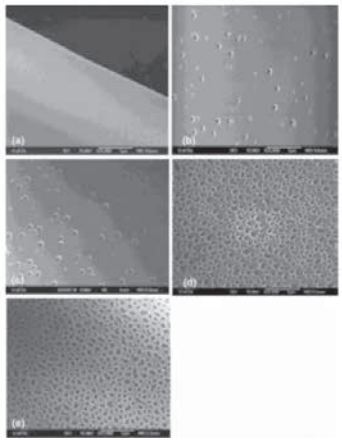
پارامترهای محیطی نظیر رطوبت و دما نیز قطر و مورفولوژی الیاف الکتروریسی را تحت تاثیر قرار می‌دهند.



شکل ١٤- تصاویر SEM الیاف PSF الکتروریسی شده از محلول 20 wt. PSF/DMAC% در ولتاژ kV با تغییر فاصله نوک از جمع‌کننده: a) ۱۰ و b) ۱۵ cm که به ترتیب، الیافی با قطر ۷۲ ±٤۳۸ و ۵۹ ± ۳٦۸ نانومتر تشکیل شدند



شکل ۱۵ - تصاویر SEM 6-32 الیاف-PA الکتروریسی شده در دماهای مختلف. دمای نمونه‌های A و B به ترتیب، ۳۰ و ۶۰ °C و قطر الیاف حاصل به ترتیب ۹۸ و ۹۰ nm است



شکل ۱۶ - تصاویر SEM موروفولوژی سطحی الیاف PS الکتروریسی شده در مقادیر متفاوت رطوبت محیطی:
a) ۲۵%، b) ۳۸-۳۱%، c) ۴۵-۴۰%، d) ۵۹-۵۰% و e) ۷۲-۶۰%

کاربرد نانوالیاف الکتروریسی شده

- کاربرد زیست پزشکی

- نانوالیاف الکتروریسی شده در مهندسی بافت بسیار مورد توجه هستند.

- شبکه های سه بعدی نانوالیاف حاوی پروتئین در داربستهای طبیعی برای رشد بافت مورد استفاده قرار می گیرند.

- الیاف الکتروریسی شده به عنوان پوشش دهنده زخم استفاده می شود.

- پوششهای متخلخل متشکل از ساختارهای لیفی، زخم را از نفوذ باکتری محافظت کرده و الگوی مناسبی را برای انتقال بخار تامین می کند.

- پوششهای غیربافتی الکتروریسی شده به واسطه مساحت سطح زیاد کاربرد بالقوه‌ای به عنوان محافظ یا حامل برای رسانش دارو دارند.

الیاف نانو الکتروریسی شده در پوشاک

کیت دستگاه الکتروبافی وسیله‌ای برای طراحی و ساخت پارچه‌های سه‌بعدی سفارشی است. هنگام کار با این دستگاه، به نخ، سوزن و یا دوخت نیازی نیست. کاربران تنها نیاز به داشتن اندکی مهارت CAD برای کشیدن الگوهایشان دارند و بقیه‌ی کار را دستگاه الکتروبافی انجام می‌دهد. در محصولات مدرن صنعت نساجی علاوه بر خصوصیات استحکامی روی خواص دیگری مانند جذب مواد، عبور یا دفع مواد نیز کار شده است. به چنین محصولاتی منسوجات هوشمند اطلاق می شود. خیلی از منسوجات هوشمند در انواع پوشاک استفاده می شوند و هدف آنها ایمنی یا بهداشت یا راحتی است. توسعه منسوجات هوشمند نظامی نیز بسیار مهم است.

لباس‌های ضد لک

با به کارگیری فناوری نانو در عملیات تولید یا تکمیل پارچه، قطرات مایع نمی‌توانند درون پارچه‌های مقاوم در برابر مایعات، نفوذ کنند مولکول‌های فراوانی شده با نانو نیز می‌توانند مایعات را جذب کرده یا حرکت داده، لک و آلودگی را دور کنند. این لباس های ضدّ لک خاصیت خودتمیز شوندگی دارند، ولی ساز و کارشان با پوشش های فوتوکاتالیســتی متفاوت است. در واقع در لباس ها آب گریزی افزون می شود و در پوشش های فوتوکاتالیستی آب دوستی افزایش می یابد. اساس کار لباس های ضد لک تغییر کشش سطحی است. نقش پوشش نانو در پوشاک با استفاده از پوشش های دافع آب و ضد لک با ثبات بالا قابل ارزیابی است. پایداری و کارایی این پوشش ها پس از بارها شستشو هنوز در پارچه مانده است.

لباس‌های خنک

راحتی الیاف مصنوعی خیلی جزیی اســت، زیرا رطوبت بدن را جذب نمی کنند و پخش کردن الکتریسته ساکن نیز برایشــان دشوار است. علیرغم این خواص برای ورزشــکاران لباس های فوق خنکی از پلی استر تولید شده است که تنها بر اســاس یک اختلاف ساده بین سطح الیاف در مجاورت پوست و سطح الیاف در طرف بیرونی لباس، بدن را خنک نگه می دارد. چارچوبی سه لایه از پارچه های الکترونیکی شامل اجزا، سیستم‌ها و کاربردها، می باشد:

- اجزا، عبارتند از اجزای الکترونیکی که می‌توانند به پارچه‌ها متصل شوند مانند کلیدها، آنتن‌ها و حسگرها

- سیستم‌ها، عبارتند از سیستم‌هایی که می‌توانند به پوشاک متصل شوند مانند شبکه حسگرها که در لباس جاسازی‌شده و فعالیت قلب را پایش می کنند.

- کاربردها، اهداف خاص کاربر یا بازار هستند مانند قابلیت دسترسی آسان به اطلاعات و سرگرمی‌ها در لباس‌های مد یا لباس‌های ورزشی) استفاده می‌شوند.

لباس های خود تمیزشونده

مواد خود تمیزشونده با الهام گیری از نیلوفر آبی مقدس آغاز شده است خصوصیت یک ماده آب گریز ذاتاً دافعه است

NANO – CARE محصولی است که بر روی منسوجات اعمال می‌گردد

پارچه های نخی ضد چروک و ضد لک

تولید پارچه هایی بر مبنای فناوری نانو که نسبت به آب چروک و تنش بسیار مقاومند، از دیگر دستاوردهای فناوری نانو در صنعت نساجی است .

لباس های اسکی و فناوری نانو

مهم ترین فاکتورهای یک لباس اســکی خوب این است که بدن را در سرمای یخبندان، گرم و در عین حال از تعرق جلوگیری نکند تا با کاهش دما بدن یخ نزند. امروزه با استفاده از فناوری نانو به بسیاری از خواص مطلوب این لباس ها دست یافته‌ایم. لباس‌های کوه‌نوردی بر خلاف ظاهر بسیار نازک و سبک عایق حرارتی بوده و ورزشکار را از سرما حفظ می‌کنند. این لباس بر پایه خواص ماده ای به نام diaplex تهیه می‌شود که از قابلیت حرکت میکروبراونی در ساختار خود استفاده می‌کند

کاربرد نانوذرات نقره

ذرات یــون نقره در مقیاس نانو (نانوذرات نقره یا همان nano silver) خواص ضد عفونی کننده یا آنتی‌باکتریال دارند. پوشش دادن الیاف پارچه‌ها با نانوذرات نقره موجب ایجاد خواص ضد عفونی کنندگی در پارچه‌ها می‌شود.