

## واژه‌های کلیدی:

الکتروریسی  
نانوالیاف پلیمر  
ریسندگی  
ریخت شناسی  
غشا

# فرایند الکتروریسی نانوالیاف پلیمری

فاطمه رفیع منزلت\*، محبوبه جعفری

اصفهان، دانشگاه اصفهان، دانشکده شیمی، گروه شیمی پلیمر

## چکیده ...

امروزه الیافی با قطر کمتر از ۱۰۰ نانومتر به عنوان نانوالیاف تعریف می‌شوند. نانوالیاف می‌توانند از پلیمرهای مختلف و نانو کامپوزیت‌های مرتبط ساخته شوند. الیاف پلیمری در ابعاد نانومتری خواص شگفت‌انگیز فیزیکی و شیمیایی منحصر به فردی نشان می‌دهند. نانوالیاف پلیمری به دلیل کاربردهای فراوان و ویژگی‌های خاصی که در این ابعاد پیدا می‌کنند، مورد توجه صنایع مختلف قرار گرفته‌اند. از جمله کاربردهای آن‌ها می‌توان کاربردهای پزشکی و تصفیه را نام برد. از این رو تولید نانوالیاف پلیمری با استفاده از روش نسبتاً ساده و کارآمد، بسیار مفید خواهد بود. نانوالیاف و ساختارهای نانو حفره‌های که بطور طبیعی در بدن انسان وجود دارند باعث شده تا تحقیق وسیع در این زمینه با جدیت بیشتر دنبال شود. مورد دیگری که باعث افزایش بررسی در این زمینه شده است امکان اصلاح سطوح پلیمری به وسیله مولکول‌هایی با عملکرد دلخواه است. یکی از مهم‌ترین روش‌های تهیه نانوالیاف پلیمری، الکتروریسی است. محصول الکتروریسی نمود گونه‌ای از نانوالیاف است که لایه نازکی روی صفحه فلزی جمع‌کننده طی فرایند الکتروریسی بوجود می‌آورد. در واقع این لایه از انجماد یا انجماد ناقص جت روی صفحه‌های دو بعدی حاصل می‌شود. به دلیل این که این لایه در زیر میکروسکوپ الکترونی ساختار مشبک دارد به آن مش نانوالیاف یا شبکه نانوالیاف گفته می‌شود. در مقاله حاضر در مورد روش الکتروریسی، اجزای آن، اهمیت و کاربرد نانوالیاف، برخی خواص اصلی نانوالیاف و روش‌های بررسی این خواص، اطلاعات مختصر و مفیدی ارائه شده است.

\*پست الکترونیکی مسئول مکاتبات:

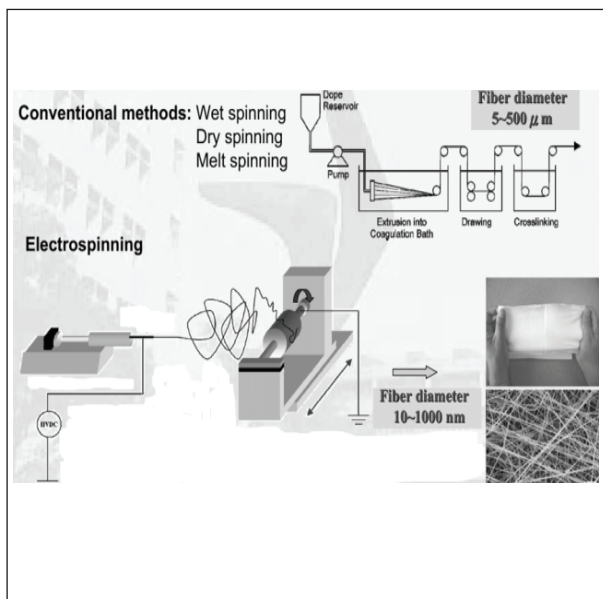
Frafiemanzelat@sci.ui.ac.ir

## ۱ مقدمه

## ۲ اصول بنیادی فرایند الکترورسی

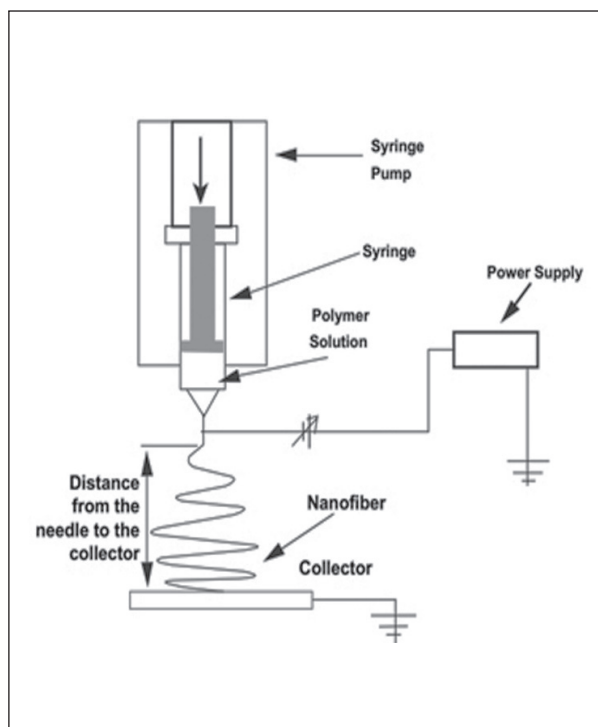
فرایند تولید نانوالیاف از جت باردار شده الکتریکی محلول پلیمری یا پلیمر مذاب را الکترورسی می‌گویند. اساس فرایند الکترورسی، کشش سیال پلیمری است. این روش قابل استفاده برای گستره وسیعی از محلول‌های پلیمری است. در اثر اعمال ولتاژ به اندازه کافی بالا در حدود ۱۰ تا ۳۰ کیلوولت، بارهای الکتریکی به درون سیال نفوذ می‌کنند. وقتی که بارهای درون سیال به مقدار بحرانی رسیدند جت سیال از ریزقطره تشکیل می‌شود. زمانی که بار جت به اندازه‌ای شد که بتواند بر کشش سطحی خود غلبه کند، به شکل مخروط تیلور فوران خواهد کرد [۳]. درهم رفتگی زنجیره‌های پلیمری در داخل محلول، مانع فروپاشی جت الکترورسی در اثر چرخش در میدان الکتریکی می‌شود. این امر موجب پیوسته بودن جت محلول می‌شود. در طی این فرایند، حین حرکت سریع جت الکترورسی به سمت جمع‌کننده، حلال از آن خارج می‌شود. وقتی که قسمت عمده حلال تبخیر شد جت به سمت ناحیه با ولتاژ کمتر که غالباً جمع‌کننده‌ای متصل به قطب منفی است حرکت خواهد کرد [۳ و ۴].

فاصله بین افشانک و جمع‌کننده معمولاً ۵ تا ۳۰ سانتیمتر است. اگر حرارتی برای نگهداشتن پلیمر در حالت مایع نیاز نباشد، فرایند می‌تواند در دمای اتاق انجام شود [۵]. فرایند الکترورسی در شکل ۲ نشان داده شده است:



شکل ۲ فرایند الکترورسی

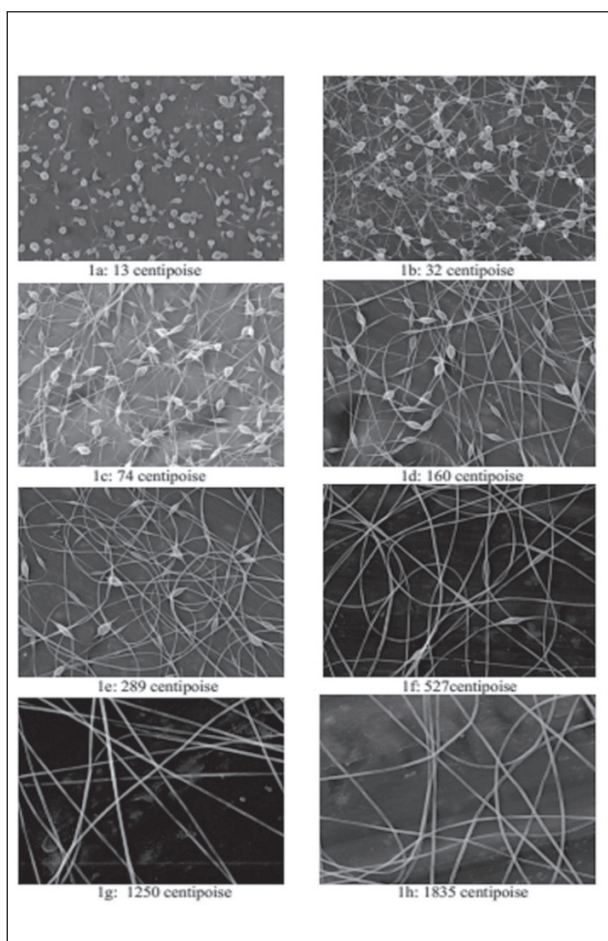
نانوالیاف دارای خصوصیات منحصربه‌فردی هستند که آنها را از سایر ساختارهای یک بعدی متمایز می‌کند. نانوالیاف می‌توانند از پلیمرهای مختلف و نانوکامپوزیت‌های مرتبط ساخته شوند. الیاف پلیمری در ابعاد نانومتری خواص شگفت‌انگیز فیزیکی و شیمیایی منحصربه‌فردی نشان می‌دهند. این خواص قابلیت استفاده از نانوالیاف پلیمری را در فضاهای فوق‌العاده کوچک فراهم می‌کند. نانوالیاف مساحت سطح وسیعی در مقایسه با حجم‌شان دارند، که این سطح برای فناوری‌های جدید بسیار مناسب است و نیز سرعت واکنش‌های شیمیایی با افزایش مساحت سطح افزایش می‌یابد. چگالی پایین و نسبت سطح به جرم بالا و اندازه کوچک حفرات، آنها را برای گستره وسیعی از کاربردها مناسب کرده است [۱]. نانوالیاف رشته به هم پیوسته‌ای هستند که طی فرایند الکترورسی تشکیل می‌شوند. Formhal در سال ۱۹۳۴ فرایند الکترورسی را به ثبت رساند. اجزای دستگاه الکترورسی شامل منبع تغذیه DC تأمین‌کننده ولتاژ در محدوده ۵ تا ۳۰ کیلوولت، افشانک برای خروج محلول پلیمری و صفحه جمع‌کننده است [۲]. شکل ۱ نمایی از دستگاه الکترورسی را نشان می‌دهد:



شکل ۱ نمایی از دستگاه الکترورسی

است. در واقع برهم کنش میان مولکول‌های پلیمر و حلال بیشتر است. بنابراین زمانی که محلول تحت تأثیر بارهای الکتریکی کشیده می‌شود مولکول‌های حلال تمایل به گسترش یافتن در میان مولکول‌های درهم‌رفته پلیمری را دارند، در نتیجه گرایش مولکول‌های حلال، به گرد هم آمدن در اثر کشش سطحی کاهش خواهد یافت و الیاف با قطر یکنواختی تشکیل می‌شوند [۲ و ۶].

همان‌طور که در شکل ۳ دیده می‌شود از ۱a تا ۱h همزمان با افزایش گرانشی، تغییر جزئی در شکل گلوله‌ها به وجود می‌آید و از شکل کروی به شبه‌مخروطی تبدیل شده در نهایت به شکل لیف هموار در می‌آیند.



شکل ۳ تغییرات ظاهری نانوالیاف با افزایش گرانشی

در شکل A۴ در گرانشی بالا، مولکول‌های حلال در بین مولکول‌های درهم‌رفته پلیمری گسترش یافته‌اند. در شکل B۴ در گرانشی پایین، مولکول‌های حلال به دلیل کشش سطحی تمایل به تجمع دارند و گلوله شده‌اند.

خواص الیاف نهایی بستگی به نوع پلیمر و شرایط عملیاتی دارد. قطر الیاف تولید شده به روش الکتروریسی، باید زیر ۱۰۰ نانومتر باشد.

روش الکتروریسی در مقایسه با روش‌های معمول ریسندگی خشک، ریسندگی تر و ریسندگی مذاب، الیافی با قطر کمتر و نانومتری ایجاد می‌کند [۶]. مهمترین شرایط فرایند الکتروریسی به شرح زیر است [۳ و ۵]:

- برای حل کردن پلیمر باید حلال مناسب انتخاب شود.  
 - فشار بخار حلال که تعیین کننده سرعت تبخیر آن است، باید به گونه‌ای باشد که در مدت زمانی که الیاف به جمع کننده می‌رسند حلال کاملاً تبخیر شده و از پلیمر جدا شود. باید توجه داشت که تبخیر حلال با سرعت زیاد اتفاق نیافتد؛ زیرا سبب سخت شدن الیاف قبل از رسیدن به ابعاد نانومتری می‌شود.

- گرانشی و کشش سطحی حلال نباید آنقدر زیاد باشد که مانع تشکیل جت شود و نباید آنقدر کم باشد تا محلول پلیمری به راحتی از افشانک سرریز شود.

- منبع تغذیه باید به اندازه کافی توان داشته باشد تا بر نیروی گرانشی و کشش سطحی محلول‌های پلیمری غلبه کند و جت را به وجود آورد.

- اگر فاصله بین افشانک و صفحه جمع کننده خیلی کم باشد، موجب ایجاد اتصال کوتاه میان دو الکترود می‌شود. این فاصله باید به اندازه‌ای باشد تا امکان تبخیر کامل حلال قبل از قرار گرفتن روی جمع کننده فراهم شود.

### ۳ عوامل موثر بر ریخت‌شناسی الیاف

عوامل متعددی بر ریخت‌شناسی الیاف الکتروریسی شده از محلول پلیمری موثر است. به برخی از آن‌ها در زیر اشاره شده است:

#### ۱-۳ وزن مولکولی و گرانشی محلول پلیمری

وزن مولکولی نشان دهنده طول زنجیر پلیمر است و بر گرانشی محلول اثر می‌گذارد.

در گرانشی‌های پایین، الیاف قرار گرفته روی صفحه جمع کننده، دارای ذرات گلوله مانند هستند. در این حالت میزان درهم‌رفتگی زنجیره‌ای پلیمری کمتر است. کشش سطحی تأثیر زیادی بر جت الکتروریسی دارد. مولکول‌های حلال به دلیل کشش سطحی تمایل بیشتری به تجمع و تبدیل شدن به شکل کروی را دارند. در گرانشی‌های بالا، میزان درهم‌رفتگی زنجیره‌ای پلیمری در محلول بیشتر

تولید می‌شود. این پدیده ممکن است ناشی از گرانیروی کمتر محلول و حلالیت بیشتر پلیمر در حلال باشد که اجازه کشش بیشتری به محلول می‌دهد. با گرانیروی کمتر یا سیالیت بیشتر مولکول‌های پلیمر ناشی از افزایش دما، نیروهای کولمبیک قادرند نیروی کششی بیشتری به محلول وارد کنند، بنابراین الیاف حاصل دارای قطر کوچک‌تری هستند [۲].

### ۳-۴ اثر جمع کننده

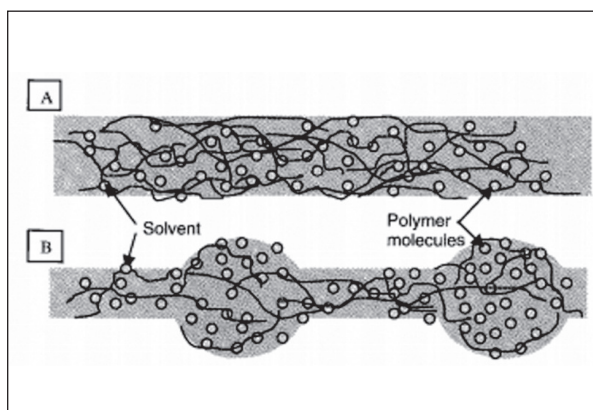
جمع کننده‌ها به دو شکل متحرک و ثابت هستند. جمع کننده‌ی مدور برای جمع‌آوری الیاف بصورت منظم است و به خشک شدن الیاف کمک بیشتری می‌کند و این به عنوان مزیت شمرده می‌شود. مثلاً DMF نقطه جوش بالایی دارد و وقتی الیاف جمع‌آوری می‌شوند باعث ایجاد رطوبت در آنها می‌شود. جمع کننده دوار، زمان بیشتری برای تبخیر حلال ایجاد می‌کند و میزان تبخیر را افزایش می‌دهد. این جمع کننده، زمانی که به الیاف مجزا نیاز باشد باعث بهبود ریخت‌شناسی الیاف می‌شود [۹].

### ۳-۵ فاصله بین افشانک تا جمع کننده

فاصله بین افشانک تا جمع کننده بر زمان پرواز و شدت میدان تأثیر مستقیم دارد. با کاهش فاصله، شدت میدان افزایش پیدا می‌کند و موجب افزایش شتاب در حرکت جت می‌شود. در این شرایط ممکن است زمانی که جت به جمع کننده می‌رسد زمان کافی برای تبخیر حلال نبوده، حلال اضافی موجود در الیاف سبب ادغام الیاف در یکدیگر شود. کاهش فاصله، به طور همزمان افزایش ولتاژ و افزایش شدت میدان را در پی دارد. اگر شدت میدان بسیار زیاد باشد، افزایش ناپایداری جت را به دنبال دارد که به تشکیل گلوله‌ها کمک می‌کند. اگر فاصله به گونه‌ای باشد که شدت میدان در حالت بهینه قرار گیرد، گلوله‌های کم‌تری تشکیل می‌شود. زیرا میدان الکترواستاتیکی، نیروی کششی مناسبی را به جت وارد خواهد کرد. افزایش فاصله، زمان بیشتری را برای پرواز ایجاد می‌کند که باعث می‌شود محلول قبل از تشکیل روی جمع کننده، بیشتر کشیده شود و این منجر به کاهش قطر متوسط الیاف می‌شود [۱۰].

### ۳-۶ شرایط محیط

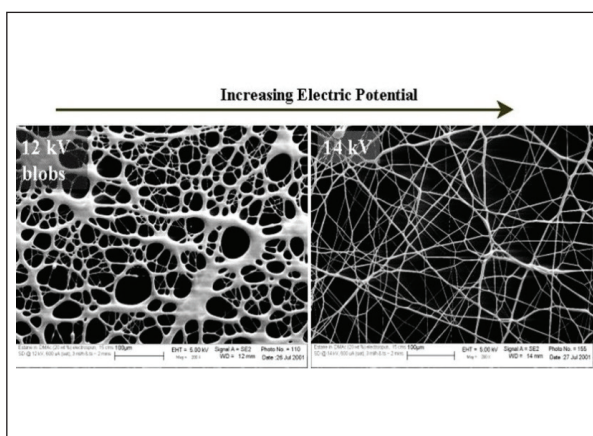
شرایط محیط مانند میزان رطوبت ممکن است بر فرایند الکتروریسی اثرگذار باشد. در شکل ۶ مشاهده می‌شود که



شکل ۴ مقایسه برهم‌کنش مولکول‌های پلیمری با حلال در گرانیروی‌های مختلف

### ۳-۲ ولتاژ منبع تغذیه

ولتاژ بالا، بارهای الکتریکی لازم را وارد محلول می‌کند. این بارها میدان الکتریکی خارجی را ایجاد می‌کنند. در این حالت محلول آویزان از نوک سوزن در هنگام شروع فوران، به شکل مخروط تیلور تبدیل می‌شود. در اکثر موارد ولتاژ بالاتر موجب کشش بیشتر محلول می‌شود و به دنبال آن میدان قوی‌تری را ایجاد می‌کند که این موارد در کاهش قطر الیاف موثر است و به تبخیر سریع‌تر حلال و خشک شدن الیاف کمک می‌کند. اما در عمل در ولتاژهای بالا (بالاتر از ولتاژ بحرانی) گرایش بیشتری برای تشکیل گلوله‌ها وجود دارد (شکل ۵) [۷ و ۸].



شکل ۵ تأثیر افزایش ولتاژ بر ریخت‌شناسی نانوالیاف

### ۳-۳ دمای محلول پلیمری

دمای محلول علاوه بر افزایش نرخ تبخیر بر کاهش گرانیروی محلول پلیمری نیز اثرگذار است. در صورتی که پلیمر در دمای بالا الکتروریسی شود، الیاف با قطر یکنواخت‌تری

با افزایش رطوبت، خلل و فرج بیشتر می‌شود.

## ۵ مشخصات اصلی لایه‌های نانوالیاف

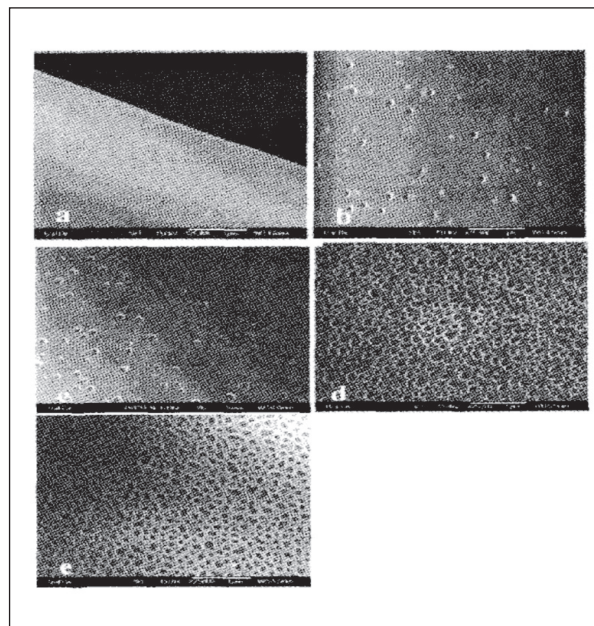
مشخصات اساسی لایه‌های نانوالیاف عبارتند از:

### ۵-۱ ریخت‌شناسی

قطر متوسط الیاف، خلل و فرج سطح لیف و لایه‌های نانوالیاف و خاصیت آبریزی نانوالیاف و لایه آن، وابسته به ریخت‌شناسی آن‌ها است. ریخت‌شناسی نانوالیاف الکتروریسی شده را می‌توان به وسیله میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) مورد بررسی قرار داد. AFM وسیله‌ای مفید برای بررسی حفرات با اندازه‌های متفاوت در سطح الیاف است. مزیت AFM نسبت به SEM این است که با آن می‌توان عمق حفرات را اندازه‌گیری کرد. از تجزیه و تحلیل تصاویر SEM فقط اطلاعات مربوط به اندازه و توزیع حفرات حاصل می‌شود. ساختارهای متشکل از الیاف الکتروریسی شده خاصیت آبریزی لایه را به طور بارزی افزایش می‌دهند و خاصیت آبریزی فوق‌العاده‌ای را در پارچه‌های پلیمری ایجاد می‌کنند. با روش‌های اصلاح سطح می‌توان خاصیت آبریزی را کاهش داد و سطحی آبدوست تهیه کرد. با استفاده از عملیات هوا پلاسما می‌توان زاویه تماس سطح را کاهش داد. طی عملیات پلاسما، گروه‌های قطبی شیمیایی وارد سطح بافت می‌شوند. در نتیجه انرژی سطحی پلیمر افزایش یافته، به دنبال آن زاویه سطح تماس کاهش می‌یابد [۵].

### ۵-۲ ساختار مولکولی

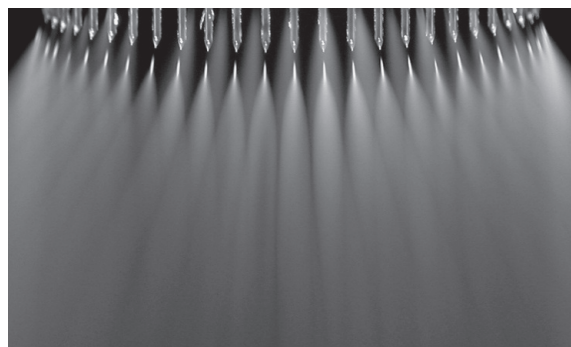
ساختار مولکولی نانولیف بر رفتار مکانیکی، گرمایی و نوری لایه‌های نانوالیاف تأثیرگذار است. عملیات شیمیایی لایه‌های نانوالیاف بعد از ریسندگی، تغییرات مطلوبی در ساختار شیمیایی مولکول‌های پلیمر پدید می‌آورد. ساختار بلوری نانوالیاف پلیمری الکتروریسی شده با استفاده از تفرق اشعه ایکس (XRD)، کالریمتری تفاضلی روبشی (DSC) و میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) مطالعه می‌شود. درباره تأثیر سرعت جمع‌کننده بر بلورینگی نانوالیاف می‌توان گفت اگر سرعت گردش غلتک یا صفحه جمع‌کننده زیاد باشد، جت‌های پلیمری تحت کشش بیشتری قرار گرفته در نتیجه امکان منظم‌تر شدن ساختار، بیشتر می‌شود. نانوالیاف جمع‌آوری شده روی صفحه‌ای با سرعت چرخش زیاد در مقایسه با نانوالیاف جمع‌آوری شده روی



شکل ۶ تأثیر افزایش رطوبت بر ریخت‌شناسی الیاف (از a تا e رطوبت بیشتر شده)

## ۴ الکتروریسی چند افشانه‌ای

از معایب روش الکتروریسی، سرعت تولید بسیار کم آن است. برای اینکه روش الکتروریسی تجاری شود باید نرخ تولید الیاف بیش از این باشد. برای حصول این امر، از الکتروریسی چند افشانه‌ای برای افزایش سرعت تولید، با حفظ یکنواختی کلی بافت نانوالیاف به طور همزمان استفاده می‌شود. در این روش، از چند سوزن یا افشانک برای الکتروریسی استفاده می‌شود. با استفاده از چند سوزن، باید پایداری جت مورد سنجش قرار گیرد تا بارهایی که توسط هر جت حمل می‌شود منجر به تخریب میدان الکتریکی نشود و جت‌های دیگر را متأثر نکند. [۱۰].



شکل ۷ روش الکتروریسی چند افشانه‌ای

صفحه‌ای با سرعت گردش کم، پیک محسوس تری را در XRD از خود به نمایش می‌گذارند [۵].

### ۳-۵ خواص مکانیکی

خواص مکانیکی نانوالیاف در کاربردهایی از قبیل جداسازی با غشا، بافت‌های مصنوعی، لباس‌های ایمنی و حسگرهای گازی و ... بسیار با اهمیت است. برای بررسی طول عمر و دوام مواد در چنین کاربردهایی، می‌بایست خواص مکانیکی لایه نانوالیاف و لیف منفرد نیز بررسی شود. برای آزمایش مکانیکی لایه‌های نانوالیاف، از روش آزمایش استحکام کششی متداول استفاده می‌شود. اما آزمایش کردن لیف منفرد به دانش بیشتری نیاز دارد زیرا تهیه نمونه و مشخصه‌یابی آن دشوار است. سه دستگاه که قادرند استحکام کششی و خواص خمشی نانوالیاف منفرد را بسنجند عبارتند از:

(۱) روش ستون نگهدارنده آزاد یا مستقل از یک طرف

(۲) AFM براساس سامانه نانو فرورفتگی

(۳) آزمایشگر استحکام کششی در مقیاس نانو [۸]

### ۶ بهبود نانوالیاف به منظور کاربردی ساختن آن‌ها

غالباً نانوالیاف از لحاظ شیمیایی خنثی بوده، دارای قابلیت ویژه‌ای نیستند. کاربردی کردن نانوالیاف نیازمند انجام عملیات خاصی روی آن‌ها است. در این قسمت اصول روش‌های اصلاح سطحی پلیمر برای کاربردی ساختن نانوالیاف که تاکنون مورد استفاده قرار گرفته یا ممکن است در آینده مورد استفاده قرار گیرد، معرفی خواهند شد.

### ۶-۱ پوشش دهی فیزیکی یا مخلوط کردن

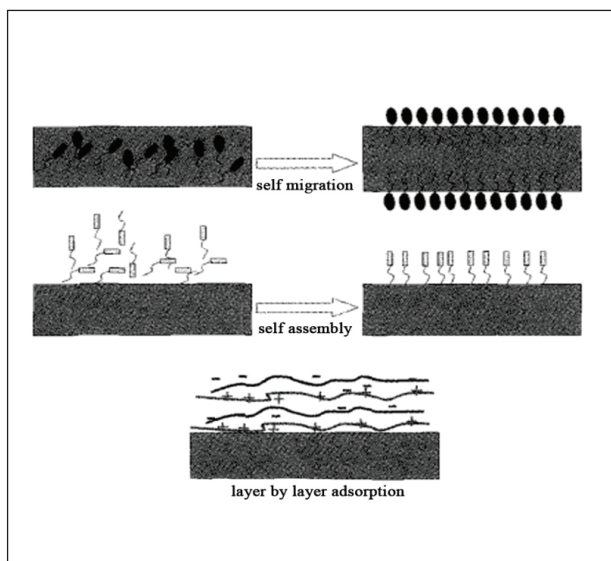
اساس این روش قرار گرفتن گروه‌های عاملی شیمیایی روی سطح است که به سه طریق انجام می‌شود:

(۱) مهاجرت خودبه‌خودی

(۲) خودآرایی

(۳) لایه به لایه

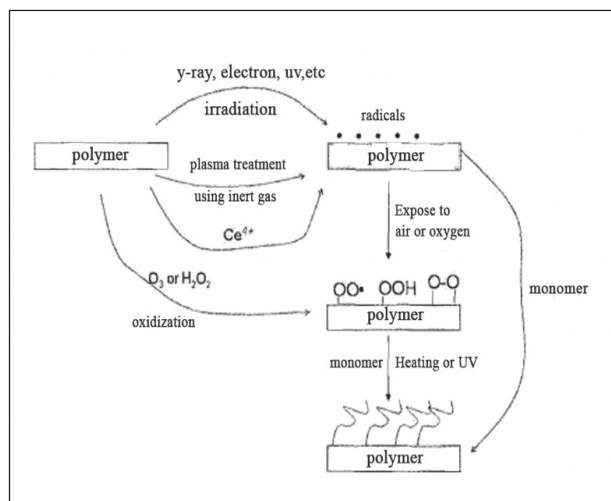
بزرگترین محدودیت این روش ناپایداری ترکیبی است که در سطح پلیمر قرار می‌گیرد. زیرا به مرور زمان مواد کاربردی از پلیمر جدا می‌شوند. اما اگر جداشدن به حدی آهسته باشد که بر روی کارایی مواد تأثیر منفی نگذارد، این روش همچنان مفید و مناسب است [۷]. شکل ۸ این سه روش را نمایش داده است:



شکل ۸ انواع روش‌های پوشش‌دهی فیزیکی

### ۶-۲ کوپلیمر کردن پیوندی

اساس این روش قرار دادن رادیکال‌ها یا گروه‌های عاملی مانند پروکسید در سطح پلیمر است. در واقع این روش سطحی برای اتصال مولکول‌های لیگاند و چسباندن پروتئین‌ها بر روی سطح نانوالیاف به کار می‌رود که به ترتیب می‌توان از آن‌ها به عنوان لایه جاذب و مهندسی بافت استفاده کرد. فعال کردن اولیه سطح پلیمرهای خنثی از طریق پرتوافکنی (اشعه گاما، اشعه‌های الکترونی، UV و ...)، عملیات پلاسما، اکسایش ازون یا آب اکسیژنه و اکسایش  $Ce^{+4}$  حاصل می‌شود [۱۱]. نمایی کلی پیوند خوردن به سطح پلیمر در شکل ۹ نشان داده شده است.

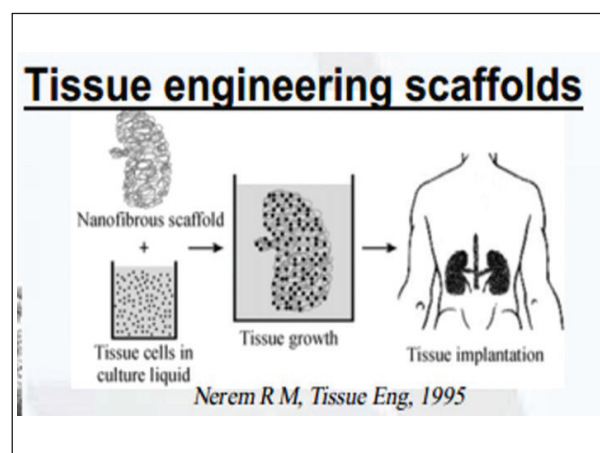


شکل ۹ کوپلیمر کردن پیوندی

## ۷ کاربردهای نانوالیاف پلیمری الکتروریسی شده

### ۱-۷ مهندسی پزشکی و مهندسی بافت

در مهندسی پزشکی، نانوالیاف در تهیه بافت‌های مهندسی، پوشش‌های زخم، لایه‌های جاذب و رهایش دارو به کار می‌روند. بافت‌های مهندسی و بافت‌های ترمیمی تهیه شده از نانوالیاف پلیمری قابلیت ترمیم بافت‌ها را داشته، به رشد و تکثیر سلول‌ها نیز کمک می‌کنند. چنانچه بافت‌های نانوالیافی حاوی سلول‌های کشت داده شده، به بدن بیمار پیوند زده شوند؛ باعث ترمیم بافت‌های آسیب دیده خواهند شد. در حقیقت غشاهای بدن مانند رگ‌های خون، غضروف، استخوان‌بندی، عصب و پوست از دیدگاه زیستی به شکل نانوالیاف هستند [۶]. شکل ۱۰ نمایی از کاربرد نانوالیاف در مهندسی بافت را نشان می‌دهد.



شکل ۱۰ کاربرد نانوالیاف در مهندسی بافت

یکی از اهداف مهم در مهندسی بافت و غشایی، استفاده از مواد زیست تخریب‌پذیر به عنوان جایگزین پیوند استخوان به منظور برطرف کردن معایب استخوان‌های بزرگ است. استحکام مکانیکی این مواد باید بهتر از حالت ترمیم شده آن باشد و نیز می‌بایست تخریب آن‌ها کنترل شده باشد تا فضای لازم برای شکل‌گیری استخوان‌های جدید را به وجود آورند.

چنانچه از لایه نانوالیاف برای پوشش زخم استفاده شود، تشکیل پوست در ناحیه آسیب‌دیده بهتر و سریع‌تر انجام می‌شود و به طور کلی شرایط مساعدتری برای بهبود زخم ایجاد می‌شود. در این پوشش‌های زخم‌بند، میزان تبخیر آب کنترل شده و نفوذپذیری اکسیژن، مناسب است. به دلیل تخلخل زیاد نانوالیاف و خاصیت ذاتی پلیمرهایی مانند

پلی‌یورتان، خاصیت ضد عفونی کردن نیز بهبود می‌یابد [۶].

### ۲-۷ رگ‌های خونی

رگ‌های خونی در انتقال خون از قلب به سمت دیگر اندام‌ها، نقش بسیار مهمی دارند. در صورت بروز مشکل، جراحان از بدن بیمار، قسمتی از رگ را برداشته، به محل موردنظر پیوند می‌زنند. این روش گران و زمان‌بر است. می‌توان با به کارگیری الکتروریسی و مهندسی بافت، رگ‌های مصنوعی در حجم زیاد تولید کرد. برای کشت و رشد سلول‌های داخلی رگ‌ها بر روی پلی‌یورتان یا سطح مواد زیستی دیگر، روش‌های گوناگونی مانند اصلاح سطح به وسیله عملیات پلاسما و ... توسعه یافته‌اند [۱۲].

### ۳-۷ تهیه حسگرها

حسگرها قطعاتی هستند که در برابر تحریک‌های فیزیکی یا شیمیایی از قبیل غلظت مولکول‌های زیستی، غلظت گاز، انرژی گرمایی، انرژی الکترومغناطیسی، انرژی صوتی، فشار، مغناطیس یا حرکت، عکس‌العمل نشان می‌دهند که به صورت علائم ساده و قابل شناسایی و عموماً به صورت الکتریکی یا نوری است.

با توجه به سطح مخصوص بالای نانوالیاف الکتروریسی شده می‌توان از آن‌ها به عنوان حسگر استفاده کرد.

سطح مخصوص، یکی از اساسی‌ترین عوامل حصول حساسیت مناسب فیلم‌های حسگر جریان‌سنج است. حسگر بر پایه اکسیدهای نیمه‌رسانا، نوعی حسگر ارزان قیمت است که برای احیای گاز به کار می‌رود. امکان کاربرد نانوالیاف پلیمری الکتروریسی شده به عنوان حسگرهای گاز، حسگرهای شیمیایی، حسگرهای نوری و زیست حسگرها مورد بررسی قرار گرفته است. به این دلیل که نسبت سطح به حجم نانوالیاف زیاد است، حساسیت حسگرها نیز افزایش می‌یابد. حسگرهای نانوالیافی علاوه بر حساسیت بالا، زمان پاسخگویی سریعی نیز دارند [۱۳].

### ۴-۷ سامانه رهایش دارو

نانوالیاف را می‌توان به عنوان حامل دارو در سامانه انتقال دارو به کار برد. در این مورد، لایه‌های نانوالیاف با ترکیبات دارویی آمیخته شده و به عنوان مثال می‌تواند زخم را ترمیم ببخشند (نقش بخیه). یا به صورت کپسول‌های محتوی دارو، مواد دارویی را از طریق سامانه گوارشی بیمار انتقال دهند [۱۵].

**۷-۵ غشا**

روش غربال کردن، به صورت انتخابی یا گزینشی است. علاوه بر مولکول‌های زیستی، لایه‌های جاذب قادر به جداسازی سلول‌های مرده، جامدهای معلق و کلوییدی و ذرات ویروسی از تعلیق‌های همگن سلول‌های باکتریایی هستند [۱۵].

**۷-۸ تقویت‌کننده کامپوزیت**

یکی از کاربردهای مهم نانوالیاف، ایفای نقش تقویت‌کنندگی در کامپوزیت‌ها است. به علت سطح مخصوص زیاد نانوالیاف، تنش اعمالی بر کامپوزیت به طور کامل به ایفای منتقل می‌شود. به غیر از بهبود خواص مکانیکی، کامپوزیت‌های پلیمری تقویت شده با نانوالیاف شفافیت خیلی خوبی دارند [۱۶].

**۸ نتیجه گیری**

الکتروریسی یکی از روش‌های ممکن در تولید نانوالیاف است. تحقیقات در زمینه الکتروریسی و بررسی هر چه دقیق‌تر عوامل موثر بر فرایند الکتروریسی باعث افزایش کارایی در تولید نانوالیاف پلیمری با قطر و ریخت‌شناسی دلخواه و قابل کنترل می‌شود. همچنین این روش منجر به کاربرد نانوالیاف در طیف وسیعی از حوزه‌های علوم شده است. نانوالیاف الکتروریسی شده ویژگی‌های مطلوبی را به نمایش می‌گذارند که امکان استفاده از آنها را در بسیاری از کاربردها از جمله مهندسی بافت، سامانه رهایش دارو، پوشش زخم، غشاها با قابلیت ویژه، حسگرها و ... فراهم می‌سازد. در هر کاربرد با انتخاب مواد مناسب و روش مورد استفاده و کنترل عوامل موثر بر الکتروریسی می‌توان شرایطی را فراهم کرد که محصول نهایی، بهترین عملکرد و کارایی را با توجه به کاربرد مورد نظر داشته باشد.

عملکرد لایه‌های نانوالیاف در کاربردهای محیط زیستی برای جداسازی غشایی رطوبت و گرد و خاک است. همچنین می‌توان هوای آلوده محتوی باکتری را با استفاده از لایه‌های ایفای در مقیاس نانو تصفیه کرد. اگر سطح نانوالیاف مانند غشای ضد باکتری با هدف از بین بردن باکتری‌ها اصلاح شیمیایی شود، در آن صورت استفاده از آن در محل سکونت و محیط کار بسیار مفید خواهد بود [۱۱].

**۷-۶ پوشش محافظ**

یکی از کاربردهای مهم نانوالیاف استفاده از آن به عنوان جداکننده‌های ذرات معلق در ماسک و البسه محافظ در برابر مواد جنگ‌افزاری شیمیایی و زیستی است.

نانوالیاف، سطح وسیعی را برای عمل کردن گروه‌های شیمیایی در دسترس قرار می‌دهند تا این گروه‌ها با مواد شیمیایی و گازهای سمی واکنش دهند.

پارچه‌های نانوالیافی به دلیل سطح مخصوص زیاد، قابلیت خنثی سازی مواد شیمیایی بدون کاهش نفوذپذیری پارچه در برابر هوا و بخار آب را دارند. لایه نانوالیاف حاصل از الکتروریسی خلل و فرج زیادی دارد و اندازه حفرات آن بسیار کوچک است و مقاومت خوبی در برابر نفوذ مواد شیمیایی مضر معلق در محیط را دارد [۱۰].

**۷-۷ لایه‌های جاذب**

لایه‌های جاذب با استفاده از لیگاندهای شیمیایی متصل بر سطح نانوالیاف، توانایی خالص سازی مولکول‌ها را از طریق به دام انداختن مولکول‌ها، بر پایه خواص فیزیکی یا شیمیایی یا عوامل زیستی دارند. جداسازی صرفاً بر اساس اندازه و وزن مولکول‌ها نیست. جداسازی بر خلاف



## مراجع

1. Haung G., Dong F., Wang J., Jia Y., "Synthesis and Characterization of Block Terpolymer and Degradation Behavior of Their Nano-Structured Fibers Via Electrospinning", *Polymer Degradation and Stability*, 97, 1067-1073, **2012**.
2. Tiwari, S.K., Venkatraman, S.S., "Importance of Viscosity Parameters in Electrospinning: of Monolithic and Core-Shell Fibers", *Material Science and Engineering*, 32, 1037-1042, **2012**.
3. Kowalewski, T.A., Blonski, S., Barral, S., "Experiments and Modeling of Electrospinning Process", *Bull Polymer Academy Science*, 53/4, 385-394, **2005**.
4. Deitzel, J.M., Kleinmeyer, J., Harris, D., "The Effect of Processing Variables on the Morphology of Electrospun Nanofibers and Textiles", *Polymer*, 42, 261-272, **2001**.
5. Sonseca, A., Peponi, L., Sahuquillo, O., "Electrospinning of Biodegradable Polylactide/Hydroxyapatite Nanofibers: Study on the Morphology, Crystallinity Structure and Thermal Stability", *Polymer Degradation and Stability*, 97, 2052-2059, **2011**.
6. Karchin, A., Simonovsky, F.I., Ratner, B.D., Sanders, E.J., "Melt Electrospinning of Biodegradable Polyurethane Scaffolds", *Acta Biomaterialia*, 7, 3277-3284, **2011**.
7. Theron, J.P., Knoetze, J.H., Sanderson, R.D., Hunter, R., "Modification, Crosslinking and Reactive Electrospinning of a Thermoplastic Medical Polyurethane for Vascular Graft Applications", *Acta Biomaterialia*, 6, 2434-2447, **2010**.
8. Huang, Z.M., Zhang, Y.Z., Ramakrishna, S., Lim, C.T., "Electrospinning and Mechanical Characterization of Gelatin Nanofibers", *Polymer*, 45, 5361-5368, **2004**.
9. Shi, Q., Vitchuli, N., Nowak, J., Noar, J., Caldwell, J.M., Breidt, F., Bourham, M., McCord, M., Zhang, X.W., "One-step Synthesis of Silver Nanoparticle-Filled Nylon 6 Nanofibers and Their Antibacterial Properties", *Journal of Materials Chemistry*, 21, 10330-10335, **2011**.
10. Nataraji, S., Yang, K.S., Aminabhavi, T. M., "Polyacrylonitrile-Based Nanofibers-A state-of-the-art Review", *Progress in Polymer Science*, 37, 487-513, **2012**.
11. Berkland, C., Pack, D.W., Kim, K., "Controlling Surface Nano-Structure Using Flow-Limited Field-Injection Electrostatic Spraying (FFESS) of Poly (D,L-lactide-co-glycolide)", *Biomaterials*, 25, 5649-5658, **2004**.
12. Burger, C., Hsiao, B.S., "Nanofiberous Materials and Their Applications", *Annual Review of Materials Research*, 36, 333-368, **2006**.
13. Baumgarten, P.K., "Electrostatic Spinning of Acrylic Microfibers", *Journal of Colloid and Interface Science*, 36, 75-79, **1971**.
14. Subbiah, T., Bhat, G.S., Tock, R.W., Parameswaran, S., Ramkumar, S.S., "Electrospinning of Nanofibers", *Applied Polymer Science*, 96, 557-569, **2005**.
15. Bergshoef, M.M., Vancso, G.J., "Transparent Nanocomposites with Ultrathin, Electrospun Nylon-4,6 Fiber Reinforcement", *Advanced Materials*, 11, 1362-1365, **1999**.
16. Teo, W. E., Ramakrishna, S., "A Review on Electrospinning Design and Nanofibre Assemblies", *Nanotechnology*, 17, **2006**.