

## اصول بنیادی الکترونیسی و بررسی فرایند های تولید و کاربرد نانوالیاف پلیمری

مهرشاد خرمی

دانشجوی کارشناسی ارشد طراحی پارچه و لباس، مؤسسه آموزش عالی مارلیک نوشهر، مازندران، ایران  
(mehrsad.dsgn@gmail.com)

ریحانه فتاحیان

استادیار گروه طراحی پارچه و لباس، مؤسسه آموزش عالی مارلیک نوشهر، مازندران، ایران  
(reyhaneh.fatahyan@gmail.com)

### چکیده:

نانوالیاف رشته‌هایی نانومتری هستند که قطرشان کمتر از یک میکرون و طولی چند میکرونی دارند. این نانو مواد تک بعدی به دلیل نسبت طول به قطر بالا و سطح ویژه بسیار زیاد، خواص فیزیکی و شیمیایی ویژه‌ای از خود بروز می‌دهند که منجر به ایجاد کاربردهای بسیار زیاد و متنوعی در صنایع مختلف می‌شود. نانو الیاف می‌توانند از پلیمرهای مختلف و نانو کامپوزیت های مرتبط ساخته شوند. پلیمر های مدنظر می‌توانند پایه طبیعی و مصنوعی داشته باشند و ساختاری الاستیکی، فیبر، ژلاتینی و عملگری را شامل شوند. فرایندهای الکترونیسی بدون شک مناسب‌ترین و قابل کنترل‌ترین روش برای تولید نانوالیاف با میانگین قطر همگن‌تری نسبت به روش‌های دیگر است. محصول الکترونیسی لایه ای نمدگونه از نانوالیاف است که این لایه ها بعد از تعیین ضخامت روی صفحه فلزی جمع میشوند و طی مراحل بعدی برای ایجاد خواص و کاربرد، آماده میشوند. اهمیت مسئله کاربرد الیاف نامبرده، در منابع تولید و ذخیره انرژی، تصفیه آب و محیط زیست، مراقبت‌های بهداشتی و پزشکی، که می‌توانند بسیار موثر عمل کنند، باعث شده تا تحقیق وسیع در این زمینه با جدیت بیشتر دنبال شود. از این رو هدف از این مطالعه مرور اجمالی اصول بنیادی نانو الیاف، روش‌های مهم تولید نانوالیاف به‌ویژه روش الکترونیسی، بررسی و ارزیابی برخی خواص و کاربرد های نانو الیاف الکترونیسی شده میباشد. پژوهش حاضر براساس هدف از نوع تحقیقات بنیادی و براساس ماهیت و روش از نوع توصیفی-تحلیلی می باشد. گردآوری داده ها و اطلاعات در این پژوهش به روش اسنادی (کتابخانه ای) می باشد که بر اساس آن کلیه منابع و شواهد تاریخی مورد مطالعه و فیش برداری قرار خواهند گرفت. نتایج نشان داد که امروزه نانو الیاف بدلیل خواص منحصر به فردی که دارد در زمینه های متفاوتی حایز اهمیت است. برخی از کاربرد های آن را میتوان در زمینه فیلترشدن، حسگرها، نمایشگر بلور مایع (LCD) و زیست پزشکی (داروسازی، زخم پوش ها و داربست های سه بعدی) و... نام برد. ایده‌های زیادی برای تولید الیاف، آن هم در ابعاد نانومتری وجود دارد، اما همه این ایده‌ها قابل پیاده‌سازی یا تجاری‌سازی نیستند.

**واژگان کلیدی:** نانو الیاف، الکترونیسی، نانو الیاف پلیمری، نانو ذرات

## مقدمه:

نانوالیاف دارای خصوصیات منحصر به فردی هستند که آنها را از سایر ساختارهای یک بعدی متمایز می کند. نانوالیاف می توانند از پلیمرهای مختلف و نانوکامپوزیت های مرتبط ساخته شوند. الیاف پلیمری در ابعاد نانومتری خواص فیزیکی و شیمیایی منحصر به فردی نشان می دهند. این خواص قابلیت استفاده از نانو الیاف پلیمری را در فضاهای فوق العاده کوچک فراهم می کند. نانوالیاف مساحت سطح وسیعی در مقایسه با حجم شان دارند، که این سطح برای فناوری های جدید بسیار مناسب است و نیز سرعت واکنش های شیمیایی با افزایش مساحت سطح افزایش می یابد. چگالی پایین و نسبت سطح به جرم بالا و اندازه کوچک حفرات، آن ها را برای گستره وسیعی از کاربردها مناسب کرده است. (Xue J et al, 2017)

در طی چند دهه گذشته، انواع گوناگون ساختارهای نانوالیافی با هدف ایجاد رویکرد مکمل یا جایگزین برای تهیه داربست های مورد استفاده در مهندسی بافت، دارورسانی، فیلتراسیون و غیره توسعه پیدا کرده است. تخلخل، مورفولوژی، خواص مکانیکی و نرخ تجزیه غشا های نانوالیافی بایستی منطبق بر نیازهای کاربرد نهایی باشد. نانوالیاف به دلیل خصوصیات منحصر به فرد خود از قبیل نسبت سطح به حجم بالا، انعطاف پذیری در ایجاد ویژگی های سطحی، عملکرد مکانیکی مناسب و میزان تخلخل و تراوایی بالا می تواند برای کاربردهای متنوع پزشکی، انرژی و غیره مورد استفاده قرار گیرد (Yalcinkaya F and Hruza J, 2018). روش های گوناگونی برای سنتز نانوالیاف ارائه شده است که از میان آنها می توان به الکتروریسی، ریسندگی مرطوب، ریسندگی سانتیفریوژی، خودآرایی، جدایش فازی، پلیمریزاسیون فصل مشترکی، پلیمریزاسیون با شروع سریع، رشد به کمک الگو، رشد بخار-مایع-جامد، کشیدن و سنتز هیدروترمال اشاره کرد.

برای تولید نانوالیاف به روش های تجاری، در حال حاضر دو روش مهم الکتروریسی و چگالش از فاز بخار وجود دارد. اولویت این روش ها امکان پذیری بیشتر آنها در مقایسه با روش های متنوع دیگری است که علی رغم پیشرفت چشمگیر به نقطه مطلوب تجاری نرسیده اند. نانوالیاف الکتروریسی شده (Electrospinning) و نانوالیاف نانولوله (vapor grown carbon fibers) به عنوان دو دسته اصلی از نانوالیاف کاربردی شناخته شده اند که می توانند کاربردهای بسیار گسترده ای در بخش هایی با عملکرد استحکامی، عایقی، الکتریکی، فیلتری و پزشکی داشته باشند. کنترل بالای شکل الیاف و تنوع بالا، هم در مواد اولیه و هم در شکل نهایی از خصوصیات روش الکتروریسی است و خواص بسیار خوب مکانیکی و حرارتی و الکتریکی با هزینه پایین از خصوصیات اصلی نانوالیاف نانولوله است. در این مطالعه به بررسی کلی و جزئی الکتروریسی می پردازیم. (Sadeghi-Aghbash et al, 2023)

## ۲- الکتروریسی

روش الکتروریسی شناخته شده ترین روش برای تولید نانوالیاف به شمار می آید. الکتروریسی روشی چندمنظوره با تجهیزات ساده است و می توان با تنظیم پارامترهای مؤثر بر فرایند، قطر الیاف را کنترل کرد. شایان ذکر است که الیاف الکتروریسی شده دارای طول زیاد، پیوسته و بسیار یکپارچه هستند. روش الکتروریسی علاوه بر حالت کلاسیک خود، دارای انواع مختلفی شامل الکتروریسی حبابی،



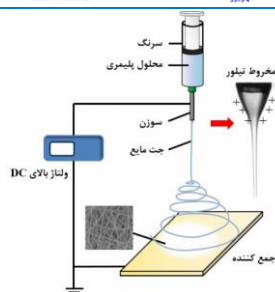
الکتروریسی به کمک گاز، الکتروریسی مذاب، الکتروریسی به کمک میدان مغناطیسی، الکتروریسی چندنازله، الکتروریسی دوجزیی، الکتروریسی بدون سوزن و الکتروریسی گریز از مرکز است (Li Z et al, 2019). در ادامه به تشریح این روش ها می پردازیم.

## ۲-۱ فرایند الکتروریسی متداول

با وجود نرخ تولید پایین، روش الکتروریسی فرایندی ساده و جذاب برای تولید نانوالیاف است. نمایی از فرایند الکتروریسی در شکل ۱ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود، دستگاه الکتروریسی از سه بخش اصلی ژنراتور ولتاژ بالا، سرنگ برای تغذیه محلول پلیمری و جمع کننده تشکیل شده است. طراحی دستگاه الکتروریسی می تواند به صورت افقی یا عمودی باشد. تنظیم دقیق مقدار محلول یا مذاب پلیمر ورودی به درون یک سرنگ به عنوان نازل توسط پمپ تغذیه انجام می شود. محلول یا مذاب پلیمری با نرخ جریان مناسب و بهینه از روزنه خارج می شود. جمع کننده متصل به زمین بوده و معمولاً با یک فویل آلومینیومی پوشانده می شود. اعمال میدان الکتریکی قوی (۵ تا ۳۰ کیلو ولت) در فضای بین سر سرنگ و جمع کننده فلزی (با فاصله ۱۰ تا ۲۵ سانتیمتر) باعث ایجاد بار القایی روی قطره پلیمری موجود در نوک سرنگ و لذا کشیده شدن قطره نیمه کروی به سمت جمع کننده و تغییر شکل آن به صورت مخروطی موسوم به مخروط تیلور می شود. با افزایش ولتاژ، نیروهای الکترواستاتیکی بر کشش سطحی غلبه کرده و یک جت پلیمری باردار از نوک سرنگ فوران کرده و به سمت جمع کننده کشیده می شود. حلال موجود در جت پلیمری قبل از رسیدن به جمع کننده و تشکیل شبکه به هم پیوسته ای از نانوالیاف، تبخیر می شود که اصطلاحاً انجماد جت نام دارد .

(Großhau C et al, 2020)

حرکت الیاف پس از جدا شدن از نوک سرنگ عمدتاً وابسته به نیروهای الکترواستاتیکی ناشی از میدان الکتریکی خارجی و بار سطحی جمع شده روی نانوالیاف الکتروریسی شده است. علاوه بر این، وجود بارهای الکترواستاتیک روی الیاف باعث افزایش بارهای ناهمنام روی جمع کننده شده و در نتیجه، به جذب الیاف توسط جمع کننده کمک می کند. همان طوری که در شکل ۱ مشاهده می شود، هنگامی که جت باردار در طی فرایند الکتروریسی از مخروط تیلور فوران می کند، ابتدا در مسیر خط مستقیم حرکت می کند. جت سیال در ادامه حرکت خود به علت پدیده ناپایداری خمشی در یک مسیر پیچیده خم می شود و در اثر نیروهای الکتریکی کشیده شده و نازک تر می شود. این حرکت پر پیچ و خم ناشی از برهم کنش عوامل مختلفی مانند ویسکوزیته محلول، کشش سطحی، نرخ تبخیر حلال، رسانایی الکتریکی محلول، نیروهای الکترواستاتیک، اصطکاک هوا و گرانش است. این پدیده، مکانیزم مهمی برای دستیابی به الیاف با قطر نانومتری محسوب می شود. نرخ نشست لایه الیاف با تشکیل اولین لایه نازک از الیاف روی سطح جمع کننده اندکی کاهش پیدا می کند. باردار شدن موضعی جمع کننده نیز حرکت نامنظم جت پلیمری در نزدیکی سطح را افزایش می دهد. حرکت شلاق وار نامنظم الیاف در نهایت باعث استقرار تصادفی الیاف الکتروریسی شده در یک دایره معمولاً ۱۰ سانتی متری می شود. قطر، تخلخل و سایر ویژگی های ظاهری الیاف را می توان با اصلاح جریان محلول، ترکیب محلول پلیمری، پتانسیل میدان الکتریکی و فاصله بین سرنگ و جمع کننده کنترل کرد. (Ostheller ME et al, 2021)



شکل ۱- نمایی از فرایند الکترورسی کلاسیک (متداول)

فاصله بین افشانک و جمع کننده معمولاً ۵ تا ۳۰ سانتیمتر است. اگر حرارتی برای نگهداشتن پلیمر در حالت مایع نیاز نباشد، فرایند می تواند در دمای اتاق انجام شود. قطر الیاف تولید شده به روش الکترورسی، باید زیر ۱۰۰ نانومتر باشد. روش الکترورسی در مقایسه با روش های معمول ریسندگی خشک، ریسندگی تر و ریسندگی مذاب، الیافی با قطر کمتر و نانومتری ایجاد میکند (FanZZ et al, 2019).

## ۲-۱-۱ مهم ترین شرایط فرایند الکترورسی کلاسیک

- \* برای حل کردن پلیمر باید حلال مناسب انتخاب شود.
- \* فشار بخار حلال که تعیین کننده سرعت تبخیر آن است، باید به گونه ای باشد که در مدت زمانی که الیاف به جمع کننده می رسند 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 می شود.
- \* گرانی 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 (Golecki HM et al, 2014).
- \* منبع تغذیه باید به اندازه کافی توان داشته باشد تا بر نیروی گرانی و کشش سطحی محلول های 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 می شود. این فاصله باید به اندازه ای باشد تا امکان تبخیر کامل حلال قبل از قرار گرفتن روی جمع کننده فراهم شود (Williams RMJ et al, 2015).

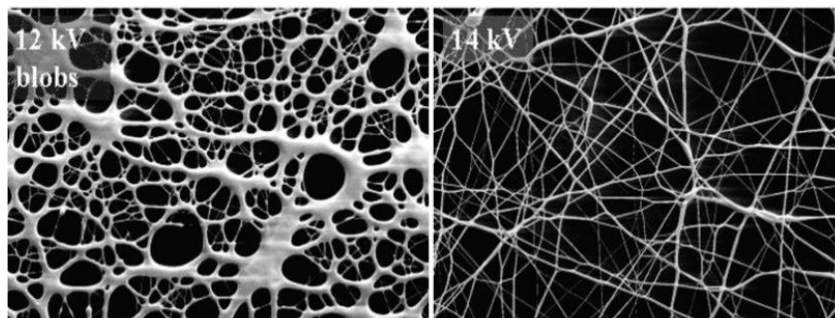
## ۲-۱-۲ عوامل موثر بر ریخت شناسی الیاف الکترورسی شده

قطر متوسط الیاف، خلل و فرج سطح لیف و لایه های نانوالیاف و خاصیت آگریزی نانوالیاف و لایه آن، وابسته به ریخت شناسی آنها است. ریخت شناسی نانوالیاف الکترورسی شده را میتوان به وسیله میکروسکوپ روبشی (SEM) و میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) مورد بررسی قرار داد. AFM وسیله ای مفید برای بررسی حفرات با اندازه های متفاوت در سطح الیاف است. مزیت AFM نسبت به SEM این است که با آن میتوان عمق حفرات را اندازه گیری کرد. از تجزیه و تحلیل تصاویر SEM فقط اطلاعات مربوط به اندازه و توزیع حفرات حاصل میشود. ساختارهای متشکل از الیاف الکترورسی شده خاصیت آگریزی لایه را به طور بارزی افزایش

میدهند و خاصیت آبریزی فوق العاده ای را در پارچه های پلیمری ایجاد می کنند. با روش های 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، گروه های قطبی شیمیایی وارد سطح بافت می شوند. در نتیجه انرژی سطحی پلیمر افزایش یافته و به دنبال آن زاویه سطح تماس کاهش میابد. (Zhong T et al, 2021) عوامل متعددی بر ریخت شناسی الیاف الکتروسی شده از محلول پلیمری موثر است. به برخی از آن ها در زیر اشاره شده است:

## ۲-۱-۲-۱ ولتاژ منبع تغذیه

ولتاژ بالا، بارهای الکتریکی لازم را وارد محلول می کند. این بارها میدان الکتریکی خارجی را ایجاد می کنند. 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 می شود و به دنبال آن میدان قوی تری را ایجاد میکند که این موارد در کاهش قطر الیاف موثر است و به تبخیر سریع تر حلال و خشک شدن الیاف کمک می کند. اما در عمل در ولتاژهای بالا (بالاتر از ولتاژ بحرانی) گرایش بیشتری برای تشکیل گلوله ها وجود دارد (Jeong JH et al, 2022)



شکل ۲- تأثیر افزایش ولتاژ بر ریخت شناسی نانوالیاف

## ۲-۱-۲-۲ دمای محلول پلیمری

دمای محلول علاوه بر افزایش نرخ تبخیر بر کاهش گرانروی محلول پلیمری نیز اثرگذار است. در صورتی که پلیمر در دمای بالا الکتروسی شود، الیاف با قطر یکنواخت تری تولید می شود. این پدیده ممکن است ناشی از گرانروی کمتر محلول و حلالیت بیشتر پلیمر در حلال باشد که اجازه کشش بیشتری به محلول می دهد. با گرانروی کمتر یا سیالیت بیشتر مولکول های پلیمر ناشی از افزایش دما، نیروهای کولمبیک قادرند نیروی کششی بیشتری به محلول وارد کنند، بنابراین الیاف حاصل دارای قطر کوچک تری هستند.

## ۲-۱-۲-۳ اثر جمع کننده

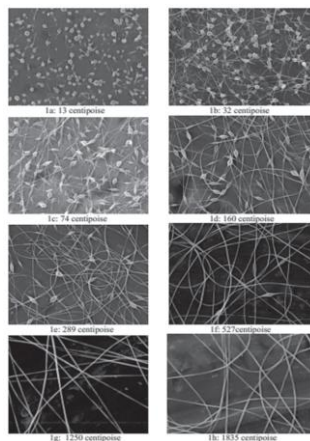
جمع کننده ها به دو شکل متحرک و ثابت هستند. جمع کننده مدور برای جمع آوری الیاف بصورت منظم است و به خشک شدن الیاف کمک بیشتری می کند و این به عنوان مزیت شمرده می شود. مثلاً DMF نقطه جوش بالایی دارد و وقتی الیاف جمع آوری میشوند باعث ایجاد رطوبت در آنها میشود. جمع کننده دوار، زمان بیشتری برای تبخیر حلال ایجاد می کند و میزان تبخیر را افزایش میدهد. این جمع کننده، زمانی که به الیاف مجزا نیاز باشد باعث بهبود ریخت شناسی الیاف میشود.

## ۲-۱-۲-۴ 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 می رسد زمان کافی برای تبخیر حلال نبوده و 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 گلوله ها کمک می کند. اگر فاصله به گونه ای باشد که شدت میدان در حالت بهینه قرار گیرد، گلوله های کم تری تشکیل می شود. زیرا میدان الکترواستاتیکی، نیروی کششی مناسبی را به جت وارد خواهد کرد. افزایش فاصله، زمان بیشتری را برای پرواز ایجاد می کند که باعث میشود محلول قبل از تشکیل روی جمع کننده، بیشتر کشیده شود و این منجر به کاهش قطر متوسط الیاف میشود (Qu C et al, 2022).

## ۲-۱-۲-۵ وزن مولکولی و گرانیوی محلول پلیمری

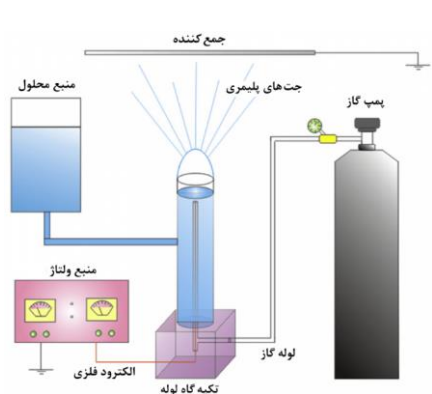
وزن مولکولی نشان دهنده طول زنجیر پلیمر است و بر گرانیوی محلول اثر می گذارد. در گرانیوی های پایین، الیاف قرار گرفته روی صفحه جمع کننده، دارای ذرات گلوله مانند هستند. در این حالت میزان درهم رفتگی زنجیرهای پلیمری کمتر است. کشش سطحی تأثیر زیادی بر جت الکتروروسی دارد. مولکول های حلال به دلیل کشش سطحی تمایل بیشتری به تجمع و تبدیل شدن به شکل کروی را دارند. در گرانیوی های بالا، میزان درهم رفتگی زنجیرهای پلیمری در محلول بیشتر است. در واقع برهم کنش میان مولکول های پلیمر و حلال بیشتر است. بنابراین زمانی که محلول تحت تأثیر بارهای الکتریکی کشیده میشود مولکول های حلال تمایل به گسترش یافتن در میان مولکول های درهم رفته پلیمری را دارند، در نتیجه گرانش مولکول های حلال، به گرد هم آمدن در اثر کشش سطحی کاهش خواهد یافت و الیاف با قطر یکنواختی تشکیل می شوند. (Bhattarai RS et al, 2018)



شکل ۳- تغییرات ظاهری نانوالیاف با افزایش گرانیوی

## ۲-۲ الکتروروسی حبابی

روش الکتروریسی حبابی از تارتنی عنکبوت الهام گرفته شده است و در آن کشش سطحی محلول با استفاده از حباب های هوا کاهش می یابد. نمایی از دستگاه الکتروریسی حبابی در شکل ۴ نشان داده شده است. همان طوری که مشاهده می شود، در این روش، حباب در مخزن عمودی حاوی محلول توسط یک لوله تغذیه گاز از پایین با یک الکتروود فلزی تثبیت شده در وسط لوله تولید می شود. جمع کننده بالای منبع محلول قرار دارد. روش الکتروریسی حبابی از پتانسیل بالایی برای تولید انبوه نانوالیاف با قطر کمتر از ۵۰ نانومتر برخوردار است. این روش در سال ۲۰۰۷ ابداع شده است. بر خلاف روش الکتروریسی متداول که در آن قابلیت الکتروریسی نانوالیاف عمدتاً به خواص محلول به ویژه ویسکوزیته آن بستگی دارد، قابلیت الکتروریسی در روش الکتروریسی حبابی به صورت هندسی به اندازه



شکل ۴- نمایی از الکتروریسی حبابی

حباب های تولیدی وابسته بوده و مستقل از خواص محلول است. این روش دارای مکانیزم بسیار ساده ای است. در غیاب میدان الکتریکی، سیستم حباب ساز شروع به ایجاد تعداد زیادی حباب در سطح محلول می کند. با اعمال میدان، بار الکتریکی در سطح حباب ها افزایش می یابد. با ایجاد بارهای سطحی تحت میدان الکتریکی، یک تنش مماسی به وجود می آید که باعث هدایت حباب های ریز به سمت جریان جت می شود. در غیاب اعمال ولتاژ، کشش سطحی به صورت هندسی به اندازه حباب بستگی دارد. با اعمال میدان الکتریکی، بارهای الکتریکی القایی روی سطح حباب ها و سطح محلول ایجاد می شود.

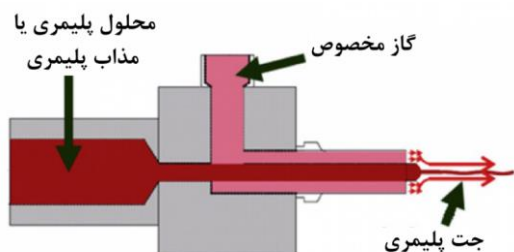
همان طور که گفته شد، با ایجاد بارهای سطحی تحت میدان الکتریکی، یک تنش مماسی به وجود می آید که باعث تغییر شکل حباب به صورت

جت مقعر روبه بالا می شود که در شکل ۴ نشان داده شده است. هر گاه شدت میدان الکتریکی از مقدار بحرانی مورد نیاز برای غلبه بر کشش سطحی بیشتر شود، یک جت سیال از نوک حباب مخروطی شکل خارج می شود. هنگامی که حباب بترکد، بارهای سطحی بازتوزیع شده و سطح حباب به دلیل نیروی الکتریکی دوباره به سمت بالا کشیده می شود و لذا در مدت زمان اندکی چندین جت تشکیل خواهد شد. در صورتی که اندازه حباب ها به مقیاس نانومتری میل کند، کشش سطحی به شدت کاهش می یابد و نانوحباب ها به راحتی به صورت نانوالیاف کشیده می شود. این فناوری ابزار بسیار مناسبی برای تولید نانوالیاف با قطر میانگین کوچکتر از ۵۰ نانومتر است. (Shao Z et al, 2017)

## ۲-۳ الکتروریسی به کمک گاز

در برخی موارد، به دلیل کشش سطحی یا ویسکوزیته بالای مذاب پلیمری، نیروی الکترواستاتیک برای کشیدن آن به منظور تولید نانوالیاف کافی نیست. در این شرایط، از یک گاز مخصوص برای اعمال نیروی کشش کمکی به مذاب در نوک نازل استفاده می شود. علاوه بر این، استفاده از جریان گاز گرم به دلیل کاهش ویسکوزیته موجب تسهیل بیشتر فرایند الکتروریسی می شود. نمایی از نازل دستگاه الکتروریسی به کمک گاز در شکل ۵ نشان داده شده است. استفاده از گاز گرم با هدف ذوب پلیمر، جلوگیری از منجمد شدن آن در نزدیکی نازل و انتقال مذاب پلیمری با ویسکوزیته بالا و هدایت الکتریکی پایین از طریق نازل الکتروریسی صورت می گیرد. در فرایند الکتروریسی مذاب پلیمری به کمک گاز، به دلیل عدم نازک شدن الیاف از طریق تبخیر حلال، الیاف ضخیم تری نسبت به فرایند

الکتروریسی محلول پلیمری تولید می‌شود. علاوه بر این، جت مذاب پلیمری معمولاً به وسیله هوای پیرامون به سرعت سرد می‌شود که نه تنها از نازک شدن جت اولیه جلوگیری می‌کند، بلکه از حرکت شلاقی آن نیز ممانعت به عمل می‌آورد.



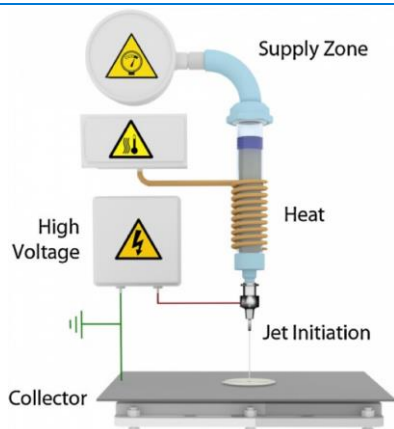
غلبه بر چالش‌های فوق مستلزم گرمایش اضافی به‌ویژه در نزدیکی نازل است. جریان گاز می‌تواند گرمایش محیط اطراف نازل را حفظ کند و لذا انجماد مذاب پلیمری را به تأخیر بیاورد. همچنین، نرخ بالای جریان گاز قادر است نیروی درگ یا بازدارنده اضافه‌ای بر سطح جت ایجاد کند که منجر به نازک‌تر شدن الیاف و افزایش سرعت تولید آن‌ها می‌شود (Schuchard KG et al, 2022).

## ۲-۴ الکتروریسی مذاب

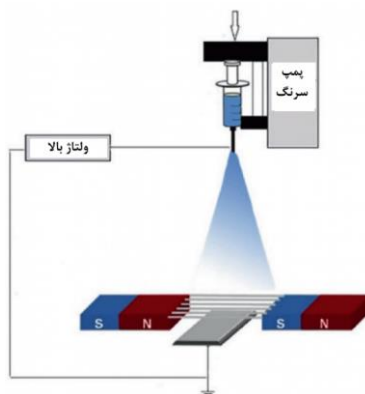
شکل ۵- نمایی از الکتروریسی به کمک گاز

استفاده از برخی حلال‌ها برای تهیه محلول‌های الکتروریسی به دلیل مسائل زیست محیطی و سلامت با محدودیت مواجه بوده و لازم است از روش‌های دوست‌دار محیط‌زیست به جای روش حلالی استفاده شود. روش الکتروریسی مذاب که در آن از مذاب پلیمر به جای محلول پلیمری استفاده می‌شود، جایگزین مناسبی برای برخی مواد محسوب می‌شود. نارسایی و ویسکوزیته بالای مذاب پلیمرها از جمله مهم‌ترین عواملی است که قابلیت الکتروریسی آن‌ها را محدود می‌کند. در روش الکتروریسی مذاب، برخلاف الکتروریسی محلول، نیازی به تبخیر حلال برای انجماد الیاف پلیمری وجود نداشته و از سمیت ناشی از وجود حلال باقیمانده در الیاف مورد استفاده در سیستم‌های زیستی جلوگیری به عمل می‌آید. از طرف دیگر، الیاف حاصل از این روش به دلیل سرد شدن سریع مذاب دارای سطحی کاملاً صاف و همگن است، در حالی که سطح الیاف در روش الکتروریسی محلول، به علت تبخیر حلال از سطح آن‌ها معمولاً صاف و هموار نیست. با این وجود، قطر الیاف حاصل از روش مذاب به دلیل وجود درهم‌تنیدگی‌های بسیار زیاد بین زنجیره‌های پلیمری، پایداری بیشتر جت پلیمری و عدم وجود حلال در حالت عادی تا ۱۰ برابر بزرگ‌تر از قطر الیاف پلیمری مشابه حاصل از روش محلول است، اما در مقابل، الیافی با توزیع قطر باریک‌تر و درجه همگنی بالاتری به دست می‌آید. در روش الکتروریسی مذاب بایستی گرمای ثابت و یکنواختی در سیستم فراهم شود تا پلیمر در حالت مذاب باقی بماند. همچنین، تولید الیاف با قطر یکنواخت مستلزم پایداری سرعت جریان و برقراری تعادل دمایی در سیستم الکتروریسی مذاب است. از آنجایی که پلیمر در حالت مذاب به بار بیشتری برای تشکیل جت نیاز دارد لذا فاصله نازل جمع‌کننده در تا این روش بیشتر از الکتروریسی محلول است.





شکل ۷- نمایی از الکترورسی مذاب



شکل ۶- نمایی از دستگاه الکترورسی با میدان مغناطیسی

## ۲-۵ الکترورسی به کمک میدان مغناطیسی

می توان با اعمال یک میدان مغناطیسی خارجی پیرامون جمع کننده آرایه های منظمی از نانوالیاف هم راستا به دست آورد. الکترورسی به کمک میدان مغناطیسی با اضافه کردن دو آهنربا به دستگاه الکترورسی متداول حاصل می شود. نمایی از این روش در شکل ۷ نشان داده شده است. الیاف تولیدی در حضور میدان مغناطیسی اساساً دارای یکنواختی بیشتر و انشعاب بسیار کمتری نسبت به الیاف تولیدی در غیاب میدان مغناطیسی هستند.

## ۲-۶ الکترورسی چندنازله

در حالت کلی، فرایند الکترورسی متداول دارای ظرفیت تولید پایینی در حدود  $0.02 \text{ g/h}$  است. تاکنون روش های متعددی برای بهبود نرخ تولید الیاف با استفاده از روش الکترورسی گزارش شده است که روش الکترورسی چندنازله در رأس آن ها قرار دارد. در این روش، چندین جت به صورت همزمان از چندین نازل تولید می شود. نمایی از روش الکترورسی چند نازله در شکل ۸ نشان داده شده است. این روش علاوه بر افزایش نرخ الکترورسی و امکان الکترورسی همزمان الیاف پلیمری مختلف، دارای محدودیت هایی نیز هست. مشاهده شده است که چنانچه فاصله نازل ها از همدیگر کمتر از چند سانتی متر باشد، جت های با بار مثبت به شدت بر یکدیگر تأثیر گذاشته و عملکرد یکدیگر را محدود می کنند. همچنین، طی کار مداوم، معمولاً نازل ها دچار گرفتگی شده و بازده کلی سامانه کاهش می یابد. (Fujita S et al, 2019)

## ۲-۷ الکترورسی دوجزئی (هم مرکز یا کواکسیال، جزیره در دریا و جدایش فازی)

الیاف دوجزئی، الیاف هتروفیل یا بای کامپوننت نیز نامیده می شوند. در روش الکترورسی دوجزئی، حداقل دو پلیمر مختلف از مسیرهای معین طراحی شده در نازل خارج می شوند. نمایی از فرایند الکترورسی دوجزئی به همراه سطح مقطع الیاف حاصل از آن با اشکال مختلف در شکل ۹ نشان داده شده است. شکل و نحوه قرارگیری اجزای پلیمری نسبت به یکدیگر در الیاف تشکیل شده بستگی به طراحی مسیرهای خروج محلول یا مذاب پلیمری از داخل نازل دارد. مورفولوژی داخلی الیاف می تواند به صورت جزیره در دریا، کپک قابل برش، دو جزء کنار

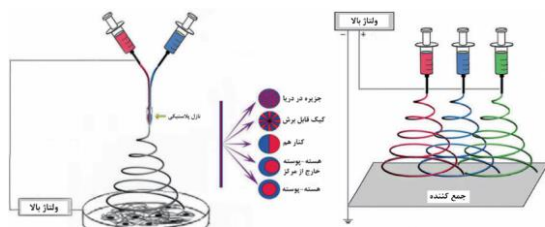


هم، هسته-پوسته و هسته-پوسته خارج از مرکز باشد. الیاف جزیره در دریا با افزایش تعداد روزنه های موجود در نازل به دست می آید. برای تهیه الیاف هسته-پوسته یا الیاف توخالی از نازل با دو روزنه هم مرکز استفاده می شود. این الیاف در میکروالکترونیک، اپتیک و پزشکی کاربرد دارد. الکتروریسی دوجزئی روش مناسبی برای تولید نانولوله های پلیمری است که خود می تواند به عنوان قالبی برای تولید نانولوله های سرامیکی مورد استفاده قرار گیرد

نانوالیاف جزیره در دریا برای اولین بار توسط شرکت تورای تولید شد. با حل کردن پلیمر دریا در یک حلال یا ذوب کردن آن، دریا برداشته می شود و الیاف بسیار ظریف به جای می مانند. پیش از حل کردن پلیمر دریا بایستی الیاف تحت نیروی کشش قرار گیرند تا قطرشان کاهش یابد. طراحی نازل و توزیع روزنه های آن روی قطر، سطح مقطع و تعداد جزایر تأثیر می گذارد. ویسکوزیته دو پلیمر مهم ترین عامل تعیین کننده قابلیت الکتروریسی آن هاست.

در روش جدایش فازی حلال استخراج می شود و فاز دیگر به جای می ماند. به بیان دیگر، این فرایند دارای مراحل مختلفی شامل (۱) حل کردن پلیمر، (۲) جداسازی فاز مایع از مایع، (۳) ژل کردن پلیمر از طریق سرد کردن، (۴) خارج کردن حلال از ژل با آب و (۵) منجمد کردن و خشک کردن است. مرحله ژل سازی حساس ترین مرحله این فرایند است، به طوری که ساختار متخلخل فوم های نانوالیافی را کنترل می کند. مدت زمان ژل سازی به غلظت پلیمر و دمای ژل سازی بستگی دارد. دو عامل غلظت و دمای ژل سازی تأثیر چندانی روی میانگین قطر الیاف ندارند. لازم به ذکر است که افزایش غلظت پلیمر سبب کاهش تخلخل و افزایش خواص مکانیکی خواهد شد. از دیگر عوامل تأثیرگذار روی مورفولوژی و خواص نانوالیاف به دست آمده می توان به نوع پلیمر و حلال و عملیات حرارتی اشاره کرد. سادگی ابزار و سهولت فرایند از جمله مزایای روش جدایش فازی است. در عین حال، این فرایند نیازمند مدت زمان طولانی برای انتقال پلیمر جامد به غشای نانو متخلخل است.

(Fujita S et al, 2019)



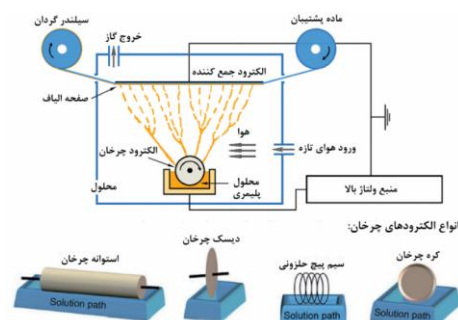
شکل ۸- نمایی از دستگاه الکتروریسی چند نازله

شکل ۹- نمایی از فرایند الکتروریسی دوجزئی به همراه سطح مقطع الیاف حاصل

## ۲-۸ الکتروریسی بدون سوزن

برای پرهیز از استفاده از سوزن و لوله موئین به عنوان نازل و جلوگیری از محدودیت های مرتبط با آن ها، از روش الکتروریسی بدون سوزن استفاده می شود که در آن ها از اشکال جدیدی از نازل استفاده می شود. فرایند الکتروریسی بدون سوزن مبتنی بر یک اصل اساسی است که بر طبق آن امواجی از یک مایع رسانای الکتریکی در مقیاس مژوسکوپی در حالت خودآرا قرار می گیرند و هرگاه شدت ولتاژ الکتریکی اعمالی بالاتر از یک مقدار بحرانی باشد، شروع به تشکیل جت های پلیمری می کنند. دستگاه الکتروریسی بدون سوزن به دو صورت کلی طراحی می شود: الکتروریسی بدون سوزن با سیستم تغذیه محدود و سیستم تغذیه نامحدود. در سیستم تغذیه محدود، مخزنی حاوی محلول پلیمری

که متعاقباً دورن نازل تزریق می‌شود، مورد استفاده قرار می‌گیرد، اما در سیستم تغذیه نامحدود از نازل استفاده نمی‌شود. در هر دو گروه، یک منبع ولتاژ بالا برای کشیدن جت‌های پلیمری و تبدیل آن‌ها به نانوالیاف به کار گرفته می‌شود و محلول پلیمری به‌صورت کنترل‌شده روی سطح آزاد یک پشتواره مناسب اعمال می‌شود. این پشتواره می‌تواند به‌شکل استوانه یا سیم در سیستم با تغذیه نامحدود، یا به‌صورت یک سطح آزاد در سیستم با تغذیه محدود باشد (Wei L et al, 2019). شمای از دستگاه الکتروریسی بدون سوزن در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

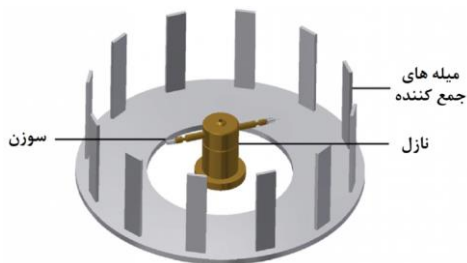


شکل ۱۰- دستگاه الکتروریسی بدون سوزن به‌همراه انواع الکترودهای چرخان

## ۲-۹ الکتروریسی گریز از مرکز (سانتریفیوژی)

فرایندهای ریسندگی گریز از مرکز و الکتروریسی گریز از مرکز دو روش متداول برای تولید نانوالیاف هستند. این دو روش شباهت بسیار زیادی دارند. در روش الکتروریسی گریز از مرکز، محلول پلیمری به داخل یک دیسک دوار با سرعت بسیار بالا تزریق می‌شود. محلول پلیمری در اثر غلبه نیروهای کشش سطحی بر نیروهای گریز از مرکز، به‌طور شعاعی به لبه‌های دیسک دوار حرکت کرده و وارد میدان الکتریکی ولتاژ بالا می‌شود. مهمترین مزیت این روش، عدم وابستگی آن به شرایط محیطی مانند دما و رطوبت است.

سرعت چرخش نازل، ساختمان نازل، فاصله جمع‌کننده از نازل و دما از جمله عوامل مؤثر بر روی هندسه و مورفولوژی نانوالیاف تولیدی به روش الکتروریسی گریز از مرکز است. با بهینه‌سازی سرعت چرخش نازل و دمای مذاب پلیمری می‌توان نانوالیاف با نرخ تولید بالا به‌دست آورد. علاوه بر این، این روش بر مشکلات ناشی از استفاده از حلال برای تهیه محلول پلیمری غلبه می‌کند. (Liu JJ et al, 2020)



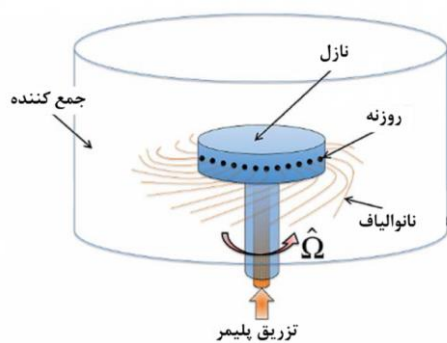
شکل ۱۱- نمایی از دستگاه الکتروریسی گریز از مرکز

## ۳- ریسندگی گریز از مرکز یا فورس اسپینینگ

روش ریسندگی گریز از مرکز مشابه دستگاه‌های پشمک‌ساز عمل می‌کند. در پشمک‌ساز، شکر با گرما ذوب شده و از طریق نیروی گریز از مرکز به سمت نازل‌ها هدایت می‌شود. الیاف ساکاروز به شکل تصادفی در فضای آزاد نزدیک نازل توزیع می‌شود. در روش ریسندگی گریز از مرکز از میدان الکتریکی استفاده نمی‌شود و به‌جای آن از نیروی گریز از مرکز برای تشکیل الیاف بهره‌برداری می‌شود. هرگاه سرعت

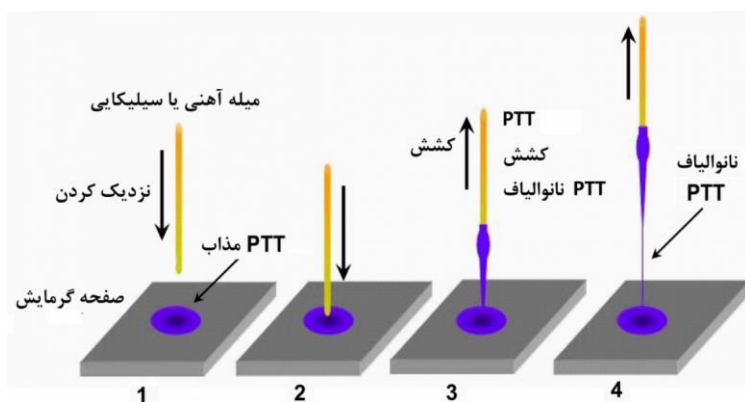
چرخش نازل که حاوی مذاب پلیمری است، به یک مقدار بحرانی برسد، نیروی گریز از مرکز برای غلبه بر کشش سطحی کافی بوده و لذا جت مایع از نوک نازل خارج شده و به شکل الیاف به سمت جمع کننده کشیده می شود. نمایی از روش ریسندگی گریز از مرکز در شکل ۱۲ نشان داده شده است. در حالت کلی، استفاده از روش فورس اسپینینگ امکان غلبه بر محدودیت های موجود در روش الکتروریسی متداول از قبیل اعمال میدان الکتریکی بالا، بازده پایین، رسانایی الکتریکی و هزینه بالای تولید را ممکن ساخته است. مهم ترین محدودیت این روش آن است که کیفیت الیاف تولیدی و بازده فرایند به شدت وابسته به خواص ماده و طراحی نازل است.

#### ۴- کشش



شکل ۱۲- نمایی از روش ریسندگی گریز از مرکز

در فرایند کشش، یک قطره میلی متری از یک محلول پلیمری بر روی سطحی از جنس دی اکسید سیلیسیم  $\text{SiO}_2$  نشانده می شود. غلظت محلول در لبه های قطره به دلیل تبخیر ناشی از جریان مویینیگی افزایش می یابد. یک میله آهنی یا شیشه ای به داخل قطره تا نزدیکی خط تماس با سطح فرو برده شده و سپس با سرعت ۱۰۰ میکرومتر بر ثانیه بیرون آورده می شود که منجر به کشیده شدن محلول به صورت یک نانولیف می شود. شمایی از فرایند کشش نانوالیاف در شکل ۱۳ نشان داده شده است. این روش تنها برای مواد ویسکوالاستیک که قادر به حفظ انسجام خود تحت تنش های کششی بالا بوده و تغییر شکل زیادی از خود نشان می دهند، مورد استفاده قرار می گیرد. (Zhang Z et al, 2022)



شکل ۱۳- نمایی از فرایند کشش نانوالیاف

روش کشش فرایندی ساده و کم هزینه برای تولید سیم های فوتونیک است. با این وجود، این روش نیازمند توزیع پایدار حرارت در نقطه کشش بوده و طول سیم تولیدی در حدود چند صد میکرومتر است. الیاف پلی (تری متیلن ترفتالات) یا PTT با قطر ۶۰ نانومتر و طول ۵۰۰ نانومتر با استفاده از این روش تولید شده است. تولید این نانوالیاف با سرعت یک متر بر ثانیه امکان پذیر است. همزمان با کشش، انعقاد هم رخ



می‌دهد. مرحله انعقاد با خنک کردن یا تبخیر حلال صورت می‌پذیرد. در این فرایند، قطر الیاف تولیدی به عواملی نظیر نرخ کشش، نرخ خنک‌سازی یا تبخیر و غلظت ماده اولیه بستگی دارد. الیاف تولیدی نه تنها اتلاف نوری ندارند، بلکه از انعطاف‌پذیری مناسبی نیز برخوردار هستند. (Hu C et al, 2015)

## ۵- ریسندگی سریع (فلش-اسپینینگ)

این روش شامل پاشش سریع و تحت فشار بالای فیلم نازکی از محلول یا مذاب پلیمری به یک حمام ریسندگی و تبدیل آن به یک یا چند شبکه الیافی است. در روش محلولی، محلول حاوی پلیمر و حلال، در دمایی بالاتر از نقطه جوش حلال اسپری می‌شود، به‌طوری که افت ناگهانی فشار پس از خروج آن از نازل، باعث تبخیر سریع حلال می‌شود.

## ۶- ترریسی یا ریسندگی تر

روش ریسندگی تر یکی از فرایندهای مرسوم و تجاری بوده و قادر به تولید نانوالیاف با قطر ۱۰ میکرومتر تا چندصد نانومتر است. پیش‌ماده اولیه از طریق یک روزنه بسیار ظریف شیشه‌ای درون یک محیط بسیار ویسکوز و در حال چرخش تزریق می‌شود. این محیط رشته را به سمت میله محور دوران می‌برد. نانوالیاف به سمت میله واقع در محور چرخش محیط کشیده شده و پس از طی یک مسیر پیوسته حلزونی شکل دور آن پیچیده و سفت می‌شوند. این روش می‌تواند الیافی را که قابلیت ریسندگی آن‌ها با استفاده از روش‌های دیگر وجود ندارد، برسد. علاوه بر این، مواد با ویسکوزیته پایین با استفاده از این روش قابل‌ریسیدن هستند.

## ۷- پلیمریزاسیون فصل‌مشارکی

پلیمریزاسیون فصل‌مشارکی به‌عنوان روشی مؤثر برای تولید نانوالیاف پلیمرهای رسانا شناخته می‌شود. در حالت کلی، پلیمرهای رسانایی مانند پلی‌آنیلین، پلی‌پیرول و پلی (۴،۳- اتیلن‌دی‌اکسی‌تیوفن) با استفاده از این فرایند تولید می‌شوند. این روش شامل پلیمریزاسیون ماده پلیمری در فصل مشترک بین دو مایع امتزاج‌ناپذیر است. در این روش، رسانایی الکتریکی پلیمر با تغییر مواد اولیه کنترل می‌شود. در گام نخست، مواد اکسنده و مونومرها در حلال‌های غیرقابل اختلاط (مانند آب و روغن) حل شده و بدون هم‌زدن مخلوط می‌شوند. پس از مدتی بخشی از مونومرها در ناحیه فصل‌مشارک دو محلول اکسید می‌شوند و الیگومرهایی را ایجاد می‌کنند که به‌تدریج رشد می‌کنند. بنابراین، پلیمریزاسیون فصل‌مشارکی یک روش بدون قالب است که در آن غلظت موضعی بالای مونومر و آنیون‌های دوپ‌کننده در فصل‌مشارک مایع-مایع، تشکیل توده‌های مونومری و آنیون یا الیگومر-آنیون را افزایش می‌دهد. این توده‌های مولکولی به‌عنوان هسته یا جوانه برای فرایند پلیمریزاسیون عمل کرده و باعث ایجاد پودر با مورفولوژی رشته‌ای می‌شود. افزودن برخی سورفکتانت‌ها یا مولکول‌های فعال سطحی به کنترل بهتر قطر الیاف کمک می‌کند. جداسازی نانوالیاف از محلول یکی از مهم‌ترین مراحل این فرایند است که با استفاده از روش فیلتراسیون توسط فیلترهای ظریف یا کیسه‌های دیالیز انجام می‌شود. (Jao D and Beachley VZ, 2019) برای درک بهتر این فرایند، مقاله "روش‌های میکروامولسیون و مایسل معکوس" را مطالعه کنید.

## ۸- مقایسه کلی روش‌های تولید نانوالیاف

به طور کلی، روش الکتروریسی دارای مزایای قابل ملاحظه‌ای نسبت به روش‌های دیگر تولید نانوالیاف است که از جمله آن‌ها می‌توان به انعطاف‌پذیری بالاتر برای مواد پلیمری مختلف، تولید الیاف با قطر یکنواخت‌تر و عدم وجود پیچیدگی‌های ابزاری و فرایندی اشاره کرد. روش‌های مختلف تولید نانوالیاف به همراه مزایا و معایب مربوط به آن‌ها در جدول ۱ آورده شده است.

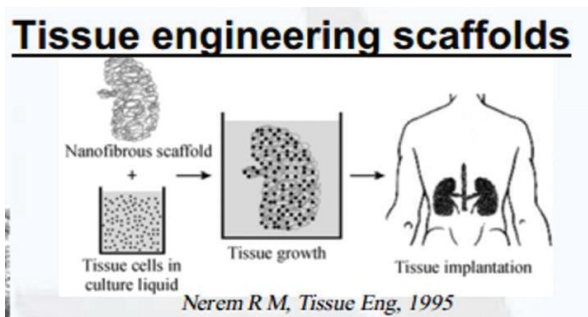
جدول ۱- روش‌های مختلف تولید نانوالیاف به همراه برخی از مزایا و معایب هر کدام از آن‌ها

روش تولید	قابلیت صنعتی شدن	مزایا	معایب
ریسندگی محلول	دارد	نرخ تولید بالا	حذف ناقص حلال حمام‌های پیچیده منعقدسازی
ریسندگی مذاب	دارد	بازده بالا چند کاربردی تولید یکنواخت	توزیع متغیر قطر مصرف بالای انرژی
ریسندگی گریز از مرکز	دارد	سادگی فرایند نرخ تولید بالا امنیت بالا	لزوم استفاده از دمای بالا
الکتروریسی محلول	دارد	تجهیزات ساده تولید نانوالیاف با قطر یکنواخت قابلیت تغییر ترکیب شیمیایی	بازده پایین برای یک سرنگ مشکلات مربوط به بازیافت و سمیت حلال
الکتروریسی مذاب	دارد	عدم استفاده از حلال هزینه اندک امکان کنترل نحوه چینش الیاف	بازده پایین امکان استفاده برای انواع محدودی از پلیمرها سهولت در گرفتگی سوزن پیچیدگی ابزاری
کشش	ندارد	فرایند ساده و تک مرحله‌ای تولید الیاف با طول زیاد	نرخ تولید پایین غیر یکنواختی در اندازه قطر
جدایش فازی	ندارد	تجهیزات ساده	قابل استفاده برای پلیمرهای خاص
خودآرایی	ندارد	سهولت تولید نانوالیاف کوچک‌تر	پیچیدگی فرایند
تولید به کمک الگو	ندارد	سهولت کنترل قطر الیاف با تغییر الگو	پیچیدگی فرایند

## ۹- کاربردهای نانوالیاف پلیمری الکتروریسی شده

### ۹-۱ مهندسی پزشکی و مهندسی بافت

در مهندسی پزشکی، نانوالیاف در تهیه بافت های مهندسی، پوشش های زخم، لایه های جاذب و رهایش دارو به کار میروند. بافت های مهندسی و بافت های ترمیمی تهیه شده از نانوالیاف پلیمری قابلیت ترمیم بافت ها را داشته و به رشد و تکثیر سلول ها نیز کمک می کنند. چنانچه بافت های نانوالیافی حاوی سلول های کشت داده شده، به بدن بیمار پیوند زده شوند؛ باعث ترمیم بافت های آسیب دیده خواهند شد. در حقیقت غشا های بدن مانند رگ های خون، غضروف، استخوانبندی، عصب و پوست از دیدگاه زیستی به شکل نانوالیاف هستند. (شکل ۱۴)



شکل ۱۴- کاربرد نانوالیاف در مهندسی بافت

یکی از اهداف مهم در مهندسی بافت و غشایی، استفاده از مواد زیست تخریب پذیر به عنوان جایگزین پیوند استخوان به منظور بر طرف کردن معایب استخوان های بزرگ است. استحکام مکانیکی این مواد باید بهتر از حالت ترمیم شده آن باشد و نیز می بایست تخریب آن ها کنترل شده باشد تا فضای لازم برای شکل گیری استخوان های جدید را به وجود آورند. چنانچه از لایه نانوالیاف برای پوشش زخم استفاده شود، تشکیل پوست در ناحیه آسیب دیده بهتر و سریعتر انجام میشود و به طور کلی شرایط مساعدتری برای بهبود زخم ایجاد میشود. در این پوشش های زخم بند، میزان تبخیر آب کنترل شده و نفوذپذیری اکسیژن، مناسب است. به دلیل تخریل زیاد نانوالیاف و خاصیت ذاتی پلیمرهایی مانند پلی یورتان، خاصیت ضد عفونی کردن نیز بهبود می یابد. (Rahmani Del Bakhshayesh A et al, 2017)

### ۹-۲ رگ های خونی

رگ های خونی در انتقال خون از قلب به سمت دیگر اندام ها، نقش بسیار مهمی دارند. در صورت بروز مشکل، جراحان از بدن بیمار، قسمتی از رگ را برداشته، به محل مورد نظر پیوند میزنند. این روش گران و زمان بر است. میتوان با به کارگیری الکتروریسی و مهندسی بافت، رگ های مصنوعی در حجم زیاد تولید نمود. برای کشت و رشد سلول های داخلی رگ ها بر روی پلی یورتان یا سطوح مواد زیستی دیگر، روش های گوناگونی مانند اصلاح سطح به وسیله عملیات پلاسما و ... توسعه یافته اند.

### ۹-۳ تهیه حسگرها



حسگرها قطعاتی هستند که در برابر تحرک های فیزیکی یا شیمیایی از قبیل غلظت مولکول های زیستی، غلظت گاز، انرژی گرمایی، انرژی الکترومغناطیسی، انرژی صوتی، فشار، مغناطیس یا حرکت، عکس العمل 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 اساسی ترین عوامل حصول حساسیت مناسب فیلم های حسگر جریان سنج است. حسگر بر پایه اکسیدهای نیمه رسانا، نوعی حسگر ارزان قیمت است که برای احیای گاز به کار می رود. 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. (Chen J et al, 2023)

#### ۴-۹ سامانه رهایش دارو

نانوالیاف را میتوان به عنوان حامل دارو در سامانه انتقال دارو به کار برد. در این مورد، لایه های نانوالیاف با ترکیبات دارویی آمیخته شده و به عنوان مثال می توان زخم را ترمیم ببخشند (نقش بخیه). یا به صورت کپسول های محتوی دارو، مواد دارویی را از طریق سامانه گوارشی بیمار انتقال دهند.

#### ۵-۹ غشا

عملکرد لایه های نانوالیاف در کاربردهای محیط زیستی برای جداسازی غشایی رطوبت و گرد و خاک است. همچنین می توان هوای آلوده محتوی باکتری را با استفاده از لایه های الیاف در مقیاس نانو تصفیه کرد. اگر سطح نانوالیاف مانند غشای ضد باکتری با هدف از بین بردن باکتری ها اصلاح شیمیایی شود، در آن صورت استفاده از آن در محل سکونت و محیط کار بسیار مفید خواهد بود

(Lou CW at al, 2023).

#### ۶-۹ پوشش محافظ

یکی از کاربرد های مهم نانوالیاف استفاده از آن به عنوان جداکننده های ذرات معلق در ماسک و البسه محافظ در برابر مواد جنگ افزاری شیمیایی و زیستی است. نانوالیاف، سطح وسیعی را برای عمل کردن گروه های شیمیایی در دسترس قرار می دهند تا این گروه ها با مواد شیمیایی و گازهای سمی واکنش دهند. پارچه های نانوالیافی به دلیل سطح مخصوص زیاد، قابلیت خنثی سازی مواد شیمیایی بدون کاهش نفوذ پذیری 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.

#### ۷-۹ لایه های جاذب

لایه های جاذب با استفاده از لیگاندهای شیمیایی متصل بر سطح نانوالیاف، توانایی خالص سازی مولکول ها را از طریق به دام انداختن مولکول ها، بر پایه خواص فیزیکی یا شیمیایی یا عوامل زیستی دارند. جداسازی صرفاً بر اساس اندازه و وزن مولکول ها نیست. جداسازی بر خلاف روش غربال کردن، به صورت انتخابی یا گزینشی است. علاوه بر مولکول های زیستی، لایه های جاذب قادر به جداسازی سلول های مرده، جامدهای معلق و کلونیدی و ذرات ویروسی از تعلیقی های همگن سلول های باکتریایی هستند.





## ۸-۹ تقویت کننده کامپوزیت

یکی از کاربردهای مهم نانوالیاف، ایفای نقش تقویت کنندگی در کامپوزیت ها است. به علت سطح مخصوص زیاد نانوالیاف، تنش اعمالی بر کامپوزیت به طور کامل به الیاف منتقل می شود. به غیر از بهبود خواص مکانیکی، کامپوزیت های پلیمری تقویت شده با نانوالیاف شفافیت خیلی خوبی دارند. (Jalalah M et al, 2022)

### نتیجه:

الکتروریسی یکی از روش های ممکن در تولید نانوالیاف است. تحقیقات در زمینه الکتروریسی و بررسی هر چه دقیق تر عوامل موثر بر فرایند الکتروریسی باعث افزایش کارایی در تولید نانوالیاف پلیمری با قطر و ریخت شناسی دلخواه و قابل کنترل می شود. همچنین این روش منجر به کاربرد نانوالیاف در طیف وسیعی از حوزه های علوم شده است. نانوالیاف الکتروریسی شده ویژگی های مطلوبی را به نمایش می گذارند که امکان استفاده از آنها را در بسیاری از کاربردها از جمله مهندسی بافت، سامانه رهایش دارو، پوشش زخم، غشاهای با قابلیت ویژه، حسگرها و ... فراهم می سازد. 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. امروزه نانو الیاف سهم حیاتی و مهمی را در صنایع مختلف دارد و با خصوصیات منحصر به فردی که دارد قابلیت رفع مشکلات و تسریع عملکرد در حوزه های پزشکی و صنعتی میگردد. نانو الیاف چشم اندازی در صنعت نساجی است که در آینده ای نزدیک منسوجات و مواد مرکب مبتنی بر منسوجات، جایگزین بسیاری از مواد فلزی و پلاستیکی مورد استفاده در صنعت خودرو، کشتی سازی، ساختمان، هوانوردی، برق و الکترونیک، کالاهای ورزشی و پزشکی، تجهیزات کشاورزی، مواد چوبی یا چرمی مبلمان و ... شوند. با بهره گیری از نانوفناوری در صنعت نساجی، محصولاتی مانند آنتن های پارچه ای، الیاف تحریک شونده با گرما، حسگرهای دما، الکترودهای حسگر پارچه ای، تولید و ذخیره کننده های انرژی، نانولوله های کربنی، منسوجات خودتمیز شونده، ضدچروک، ضدآب و ضد چربی، منسوجات با قابلیت خود ترمیمی (منسوجاتی که در اثر پاره شده خود را ترمیم می نمایند)، محصولات مرتبط با نانوزیست فناوری و ... تولید و رشد کرده اند. همچنین در آینده ای نزدیک سربازان می توانند در پناه یونیفرم های نانویی مجهز به سیستم حسگر، الکترونیکی، ضدگلوله سبک، با دوام، مقاوم، نامرئی و همرنگ شونده با محیط اطراف، استتار نموده و ایمنی بیشتری داشته باشند. پیش بینی می شود تا سال ۲۰۲۲ میلادی، رشد جهانی منسوجات نانوفناورانه در زمینه پوشاک ۱۱ درصد، منسوجات ورزشی ۱۳ درصد، پزشکی ۲۲ درصد، نظامی ۲۹ درصد، خانگی ۳۷ درصد، هوشمند و فنی ۴۵ درصد رشد داشته باشند. با استفاده از متد الکتروریسی بسیاری از عوامل از جمله نرخ تولید، بازدهی، توزیع و نیز الگوی مصرفی تغییر میکند. با اینکه این روش بسیار کارآمد بوده اما در برخی موارد محدودیت هایی چون انتخاب درست حلال و پلیمر دارد و تمام روش ها بجز دو مورد ذکر شده بصورت گسترده قابلیت تولید صنعتی را ندارند. امید است تا محدودیت های مذکور رفع شده و صنایع مورد نظر عملکرد موثر تری را داشته باشند.

### منبع:



1. Xue J, Xie J, Liu W, Xia Y. (2017). Electrospun Nanofibers: New Concepts, Materials, and Applications. *Accounts of chemical research*, 50(8):1976-1987.
2. Yalcinkaya F, Hruza J.(2018). Effect of Laminating Pressure on Polymeric Multilayer Nanofibrous Membranes for Liquid Filtration. *Nanomaterials* (Basel, Switzerland), 8(5):272.
3. Sadeghi-Aghbash M, Rahimnejad M, Adeli H, Feizi F. (2023). Wound Healing: An Overview of Wound Dressings on Health Care. *Current pharmaceutical biotechnology*, 24(9):1079-1093.
4. Li Z, Mei S, Dong Y, She F, Kong L. (2019). High Efficiency Fabrication of Chitosan Composite Nanofibers with Uniform Morphology via Centrifugal Spinning. *Polymers*, 11(10):1550.
5. Großhaus C, Bakirci E, Berthel M, Hrynevich A, Kade JC, Hochleitner G, Groll J, Dalton PD. (2020). Melt Electrospinning of Nanofibers from Medical-Grade Poly( $\epsilon$ -Caprolactone) with a Modified Nozzle. *Small* (Weinheim an der Bergstrasse, Germany), 16(44):e2003471.
6. Ostheller ME, Balakrishnan NK, Groten R, Seide G. (2021). Detailed Process Analysis of Biobased Polybutylene Succinate Microfibers Produced by Laboratory-Scale Melt Electrospinning. *Polymers*, 13(7):1024.
7. Fan ZZ, He HW, Yan X, Zhao RH, Long YZ, Ning X. (2019). Fabrication of Ultrafine PPS Fibers with High Strength and Tenacity via Melt Electrospinning. *Polymers*, 11(3):530.
8. Golecki HM, Yuan H, Glavin C, Potter B, Badrossamay MR, Goss JA, Phillips MD, Parker KK. (2014). Effect of solvent evaporation on fiber morphology in rotary jet spinning. *Langmuir : the ACS journal of surfaces and colloids*, 30(44):13369-74.
9. Williams RMJ, Ruddy BP, Hogan NC, Hunter IW, Nielsen PMF, Taberner AJ. (2015). Analysis of Moving-Coil Actuator Jet Injectors for Viscous Fluids. *IEEE transactions on bio-medical engineering*, 63(6):1099-1106.
10. Zhong T, Liu W, Liu H. (2021). Green electrospinning of chitin propionate to manufacture nanofiber mats. *Carbohydrate polymers*, 273:118593.
11. Jeong JH, Park K, Kim H, Park I, Choi J, Lee SS. (2022). Multiplexed electrospraying of water in cone-jet mode using a UV-embossed pyramidal micronozzle film. *Microsystems & nanoengineering*, 29:8:110.
12. Qu C, Zhao P, Ren Y, Wu C, Liu J. (2022). Increase the Surface PANI Occupancy of Electrospun PMMA/PANI Fibers: Effect of the Electrospinning Parameters on Surface Segregation. *Polymers*, 14(16):3401.
13. Bhattarai RS, Bachu RD, Boddu SHS, Bhaduri S. (2018). Biomedical Applications of Electrospun Nanofibers: Drug and Nanoparticle Delivery. *Pharmaceutics*, 11(1):5.
14. Shao Z, Yu L, Xu L, Wang M. (2017). High-Throughput Fabrication of Quality Nanofibers Using a Modified Free Surface Electrospinning. *Nanoscale research letters*, 2(1):470.
15. Schuchard KG, Pawar A, Anderson B, Pourdeyhimi B, Shirwaiker RA. (2022). Multiphase CFD Modeling and Experimental Validation of Polymer and Attenuating Air Jet Interactions in Nonwoven Annular Melt Blowing. *Industrial & engineering chemistry research*, 61(37):13962-13971.
16. Jiang J, Zheng G, Wang X, Li W, Kang G, Chen H, Guo S, Liu J. (2019). Arced Multi-Nozzle Electrospinning Spinneret for High-Throughput Production of Nanofibers. *Micromachines*, 11(1):27.
17. Fujita S, Wakuda Y, Matsumura M, Suye SI. (2019). Geometrically customizable alginate hydrogel nanofibers for cell culture platforms. *Journal of materials chemistry. B*, 7(42):6556-6563.
18. Wei L, Liu C, Mao X, Dong J, Fan W, Zhi C, Qin X, Sun R. (2019). Multiple-Jet Needleless Electrospinning Approach via a Linear Flume Spinneret. *Polymers*, 11(12):2052.
19. Liu JJ, Wu LL, Chen T. (2020). Investigation on the Polymer Drawing Model of the Centrifugal Spinning. *Recent patents on nanotechnology*, 14(1):21-26.

20. Zhang Z, Liu K, Li W, Ji Q, Xu Q, Lai Z, Ke C. (2022). Orthogonal Optimization Research on Various Nozzles of High-Speed Centrifugal Spinning. *Frontiers in bioengineering and biotechnology*, 10:884316.
21. Hu C, Chen S, Zhang W, Xie F, Chen J, Chen X. (2015). Structural evolution analysis and cold-crystallization kinetics of spherical crystals in poly(trimethylene terephthalate) film using Raman spectroscopy. *Soft matter*, 11(34):6866-71.
22. Jao D, Beachley VZ. (2019). Continuous Dual-Track Fabrication of Polymer Micro-/Nanofibers Based on Direct Drawing. *ACS macro letters*, 8(5):588-595.
23. Rahmani Del Bakhshayesh A, Annabi N, Khalilov R, Akbarzadeh A, Samiei M, Alizadeh E, Alizadeh-Ghods M, Davaran S, Montaseri A. (2017). Recent advances on biomedical applications of scaffolds in wound healing and dermal tissue engineering. *Artificial cells, nanomedicine, and biotechnology*, 46(4):691-705.
24. Chen J, Rong F, Xie Y. (2023). Fabrication, Microstructures and Sensor Applications of Highly Ordered Electrospun Nanofibers: A Review. *Materials (Basel, Switzerland)*, 16(9):3310.
25. Lou CW, Hung CY, Wei M, Li T, Shiu BC, Lin JH. (2023). Antibacterial Surgical Sutures Developed Using Electrostatic Yarn Wrapping Technology. *Journal of functional biomaterials*, 14(5):248.
26. Jalalah M, Ahmad A, Saleem A, Qadir MB, Khaliq Z, Khan MQ, Nazir A, Faisal M, Alsaiari M, Irfan M, Alsareii SA, Harraz FA. (2022). Electrospun Nanofiber/Textile Supported Composite Membranes with Improved Mechanical Performance for Biomedical Applications. *Membranes*, 12(11):1158.

## Basic principles of electrospinning and investigation of production processes and application of polymer nanofibers



## Basic principles of electrospinning and investigation of production processes and application of polymer nanofibers

## Basic principles of electrospinning and investigation of production processes and application of polymer nanofibers

**Mehrshad Khorami**

Master's student in textile and clothing design, Marlik Nowshahr Institute of Higher Education, Mazandaran, Iran

**Reyhane Fatahian**

**Reyhane Fatahian**

Assistant Professor, Textile and Clothing Design Department, Marlik Nowshahr University, Mazandaran, Iran

### Abstract:

Nanofibers are nanometer threads that are less than one micron in diameter and several microns in length. These one-dimensional nanomaterials exhibit special physical and chemical properties due to their high length-to-diameter ratio and specific surface area, leading to many diverse applications in various industries. Nanofibers can be made from different polymers and related nanocomposites. The considered polymers can have natural and synthetic bases and include elastic structure, fiber, gelatin, and functionality. Electrospinning processes are undoubtedly the most appropriate and controllable method for producing nanofibers with a more homogeneous average diameter than other methods. The electrospinning product is a felt-like layer of nanofibers. These layers are gathered on the metal plate after determining the thickness and are prepared during the next steps to create properties and use. The importance of the application of the mentioned fibers in sources of energy production and storage, water purification and environment, health care, and medicine, which can be very effective, has caused extensive research in this field to be followed more seriously. Therefore, the purpose of this study is to review the basic principles of nanofibers, and the important methods of nanofiber production, especially the electrospinning method, to investigate and evaluate some properties and applications of electrospun nanofibers. The current research is based on the purpose of fundamental

Formatted: Centered



research and based on the nature and method of descriptive-analytical type. The data and information in this research are collected by documentary (library) method, based on which all historical sources and evidence are studied and checked. will be placed. The results showed that today nanofibers are important in different fields due to their unique properties. Some of its applications can be mentioned in the fields of filtering, sensors, liquid crystal display (LCD) biomedicine (pharmaceuticals, dressings, and 3D scaffolds), etc. There are many ideas for producing fibers, also in nanometer dimensions, but not all of these ideas can be implemented or commercialized.

**Keywords:** nanofibers, electrospinning, polymer nanofibers, nanoparticles