

Enhancing Yarn Coverage with Electrospun Polyacrylonitrile Nanofibers via the Pin Spinning Method: An Investigation of Influencing Parameters

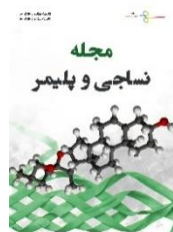
Masoud Moradi¹, Farzad Dabirian^{2*}, and Laleh Rajabi¹, Sepide Heydari²

¹ Polymer Research Center, Department of Chemical Engineering, College of Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran

² Department of Materials and Textile Engineering, College of Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran

Article Information	Abstract
<p>Article history:</p> <p>Received: 2024-05-10 Accepted: 2025-01-12</p>	<p>This research aimed to enhance the alignment, coherence, and mechanical strength of nylon yarn by coating it with polyacrylonitrile (PAN) nanofibers using an innovative pin electrospinning technique. The study also focused on identifying and analyzing the parameters that influence the efficiency and optimization of continuous electrospun nanofiber coating processes. To achieve this, PAN nanofibers were electrospun onto nylon yarn using a pin electrospinning system equipped with a rotating cone maker. Key factors affecting the coating rate and the morphology of the nanofiber-coated yarn were systematically examined. The results indicated that the nanofiber coating on nylon yarn improved with higher applied voltage, increased spinning solution concentration, faster spinner rotation, and higher speeds of the cone maker and collector. Conversely, increasing the distance between the positive and negative electrodes reduced the extent of nanofiber coating. This study successfully demonstrated the continuous production of nylon yarn coated with PAN nanofibers at a speed of 20 cm/min with a production rate of 0.588 g/h. This represents a tenfold increase in production efficiency compared to conventional electrospinning techniques under similar conditions.</p>
<p>Keywords:</p> <p>Nanofiber, electrospinning, polyacrylonitrile, nylon, coated yarn.</p>	

(*) To whom correspondence should be addressed.
E-mail address: f.dabirian@razi.ac.ir



افزایش میزان پوشش دهی نخ با نانوالیاف پلی اکریلونیتریل الکتروریسی شده به روش ریسندگی با پین و بررسی پارامترهای موثر بر آن

مسعود مرادی^۱، فرزاد دبیریان^{۲*}، لاله رجبی^۱، سپیده حیدری^۲^۱ مرکز تحقیقاتی پلیمر، دانشکده‌ی مهندسی شیمی، دانشگاه رازی، کرمانشاه^۲ دانشکده مهندسی مواد و نساجی، دانشگاه رازی، کرمانشاه

چکیده	اطلاعات مقاله
در این تحقیق، با هدف افزایش نظم و انسجام و همچنین افزایش مقاومت مکانیکی، نخ نایلون پوشش داده شده با نانوالیاف پلی-اکریلونیتریل به روش نوین الکتروریسی پین تولید شد. همچنین در طی این پژوهش، به شناسایی و بررسی پارامترهای موثر بر افزایش سرعت و بهینه‌سازی تولید نانوالیاف الکتروریسی در پوشش دهی مداوم نخ پرداخته شده است. بدین منظور، نانو الیاف پلی-اکریلونیتریل (PAN) توسط سیستم الکتروریسی به روش ریسندگی پین به کمک یک مخروط‌ساز چرخان بر روی یک نخ نایلونی رسیده شد و کمیت‌های موثر در میزان پوشش دهی نانوالیاف و مورفولوژی نخ پوشش داده شده با نانو الیاف مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که نخ پوشش کاری شده نایلون با افزایش ولتاژ، غلظت بیشتر از محلول ریسندگی، سرعت بالاتر ریسندگی، سرعت بیشتر مخروط‌ساز و جمع کننده افزایش می‌یابد. همچنین افزایش فاصله‌ی دو الکتروود مثبت و منفی نیز می‌تواند سبب کاهش پوشش دهی نانوالیاف نایلون شود. در این مطالعه نخ نایلونی پوشش داده شده با نانو الیاف پلی-اکریلونیتریل با سرعت ۲۰ سانتی متر بر دقیقه با میزان ۰/۵۸۸ گرم در ساعت به صورت پیوسته با موفقیت تولید شد. این میزان پوشش دهی در مقایسه با الکتروریسی متداول در شرایط مشابه حدود ۱۰ برابر افزایش تولید را به همراه دارد.	تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۲۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۲۳
	واژه‌های کلیدی: نانو الیاف، الکتروریسی، پلی-اکریلونیتریل، نایلون، نخ پوشش داده شده.

۱ مقدمه

با بار مخالف پرتاب می‌شود و در نهایت پس از ازدیاد طول بسیار زیاد، جت‌ها با از دست دادن حلال خود به نانوالیاف تبدیل می‌شوند [۹]. تلاش‌هایی به هدف تولید نخ نانوالیاف صورت گرفته که منظم کردن نانوالیاف تولیدی، افزایش مقاومت مکانیکی با دسته شدن نانوالیاف، همچنین امکان تولید مداوم نانوالیاف با استفاده از این روش را فراهم آورده است. ندیم شوکت و تانگ لین [۱۰] با استفاده از یک روش ترکیبی بدون نازل - با نازل موفق به تولید مداوم نخ نانوالیاف شدند. دریک روش دیگر جیان ژین هی و همکاران [۱۱] از روش الکتروریسی مزدوج چندگانه برای تولید نخ نانوالیاف استفاده کردند و موفق به تولید نخ نانوالیاف PAN شدند.

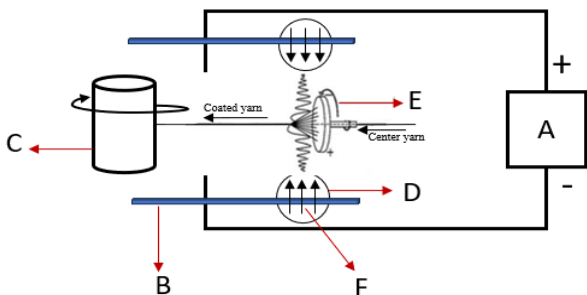
بر خلاف کاربرد بالقوه‌ی نانوالیاف در صنایع نساجی، بسیاری از نخ‌های تولید شده در این روش دارای مقاومت مکانیکی پایینی هستند که باعث محدود شدن کاربرد آن‌ها می‌شود. با این حال به کمک پوشش دهی سطوح مختلف پارچه و نخ به کمک الکتروریسی می‌توان خواص نخ و پارچه را بهبود داد [۹].

در سال‌های اخیر نانو الیاف پلیمری مورد توجه بسیاری از محققین واقع شده است، روش الکتروریسی به عنوان مهم‌ترین و ساده‌ترین روش برای تولید نانو الیاف از محلول یا مذاب پلیمری است [۱]. تاکنون شمار زیادی از پلیمرها با هدف تولید نانو الیاف با استفاده از روش‌های مختلفی از جمله جداسازی فاز [۲،۳]، سانتریفیوژ [۴]، اکستروژن [۵] و الکتروریسی [۶] با موفقیت تولید شده‌اند. البته در میان روش‌های مختلف تولید، الکتروریسی با توجه به سادگی، هزینه کمتر و توانایی کنترل بیشتر بر روی عملیات نسبت به سایر روش‌ها بیشتر مورد توجه قرار گرفته است [۷]. نانوالیاف دارای کاربردهای مختلف از جمله بهداشت و درمان، مهندسی محیط زیست و حفاظت و امنیت است. این روش در صورت ارتقا به یک مقیاس صنعتی قابل اطمینان می‌تواند، یکی از مهم‌ترین فناوری‌های نانو در قرن اخیر باشد [۸]. در روش الکتروریسی با استفاده از اعمال ولتاژهای بالا به قطرات محلول پلیمری قرار گرفته در میدان الکتریکی، جت‌هایی از قطره‌های محلول پلیمری بردار شده به سمت الکتروود

* مسئول مکاتبات، پیام‌نگار: f.dabirian@razi.ac.ir

۲-۲ دستگاه‌ها

طرح‌واره‌ی دستگاه الکتروریسی مورد استفاده در این تحقیق در شکل ۱ نشان داده شده است. این دستگاه شامل یک منبع ولتاژ بالا (A)، دو واحد ریسندگی (B)، جمع کننده نخ پوشش داده شده (C)، ظرف نگهدارنده محلول (D)، مخروط‌ساز (E) و پین‌های الکتروریسی (F) تشکیل شده است.



شکل ۱ تصویر شماتیک دستگاه الکتروریسی پوشش‌دهی نخ (A): منبع ولتاژ بالا؛ B: واحدهای ریسندگی؛ C: جمع کننده نخ؛ D: ظرف نگه دارنده محلول؛ E: مخروط ساز؛ F: پین‌های الکتروریسی)

هر واحد ریسندگی از ۲۰ پین تشکیل شده که از طریق یک میله شیشه‌ای به یک موتور چرخان با سرعت قابل کنترل متصل شده است. مخروط‌ساز مورد استفاده در این تحقیق، شامل یک استوانه چرخان است که لبه بیرونی آن توسط فویل آلومینیومی پوشش داده شده است. مخروط‌ساز و جمع کننده نخ نیز به یک موتور با سرعت قابل کنترل متصل شده‌اند. ظرف های نگه دارنده محلول به گونه‌ای در زیر پین‌های واحد ریسندگی قرار داده شده‌اند که با چرخش پین‌ها، نوک آن‌ها به محلول پلیمری آغشته شود. هر ریسنده به یک سر منبع ولتاژ بالا، با اختلاف ولتاژ مشخص متصل شده است. واحدهای ریسنده درست در مقابل هم و در دو طرف مخروط‌ساز قرار داده شده‌اند.

۳-۲ روش تولید نانوالیاف و پوشش‌دهی نخ

پس از اعمال ولتاژ، بین واحدهای ریسنده مثبت و منفی میدان الکتریکی ایجاد خواهد شد. همچنین، با اعمال ولتاژ توزیع بارهای الکتریکی روی سطح مخروط‌ساز نیز دچار تغییر می‌شود. یک قطعه فلزی، دارای توزیع یکنواختی از الکترون در سطح خود است. هنگامی که این قطعه به یک جسم باردار شده نزدیک شود، القای الکترواستاتیک منجر به توزیع مجدد بارهای الکتریکی موجود در قطعه می‌شود. برای مثال وقتی بار مثبت در نزدیکی یک جسم فلزی قرار داده شود، بارهای منفی موجود در فلز جذب آن شده و به سمت آن حرکت می‌کنند، این امر باعث می‌شود که قسمت نزدیک‌تر به بار الکتریکی خارجی، دارای بار منفی و قسمت دورتر از آن دارای بار مثبت شود. به همین ترتیب اگر بار خارجی منفی باشد جای بارهای مثبت و منفی در قطعه فلزی برعکس می‌شود. از آنجایی که این فرآیند فقط یک توزیع بار مجدد است جسم دارای هیچ گونه بار خالصی نخواهد شد [۱۷].

در این سیستم الکتروریسی، با توجه به اینکه مخروط‌ساز چرخان در بین واحدهای ریسنده قرار گرفته، دچار القای الکترواستاتیک خواهد شد و قسمت نزدیک‌تر به ریسنده مثبت دارای بار القایی منفی و قسمت نزدیک‌تر به

در یک مطالعه در زمینه پوشش‌دهی پتريک و مالی [۱۲] یک بستر سلولزی را با استفاده از نانوالیاف پلی آمید ۶ پوشش داده و در زمینه فیلتراسیون هوا مورد استفاده قرار دادند. در زمینه مهندسی بافت، از یک پارچه کشباف پوشش داده شده با نانوالیاف به عنوان داربست بافت استفاده شده که دارای ترکیبی از خواص مکانیکی پارچه کشباف و خواص نانو سطح پوششی بود. ژو و همکاران [۱۳] با استفاده از پوشش‌دهی یک پارچه با قابلیت تنفس و ضدآب با نانوالیاف الکتروریسی شده موفق به بهبود راحتی پوشاک تولید شده از این پارچه با بهبود خاصیت ضدآب، قابلیت تنفس و انعطاف‌پذیری آن را بدون تغییر در خواص اصلی پارچه شدند. هی و همکاران [۱۴] موفق به تولید نخ‌های پوشش داده شده ویسکوز با نانوالیاف پلی‌اکریلونیتریل الکتروریسی شده با جت هوای چند نازلی شدند. نتایج این پژوهش نشان داد که نخ‌های پوشش داده شده ویسکوز با نانو الیاف پلی‌اکریلونیتریل توزیع، جهت‌گیری و پیچش یکنواخت را داشته‌اند و چندین بار تکرار این پوشش‌دهی نخ پوشش داده شده قابلیت استفاده در تولید منسوجات کاربردی دارند. یکی دیگر از مزیت‌های پوشش‌دهی بر روی نخ‌ها به جای استفاده از پوشش مستقیم بر روی پارچه، امکان پوشش‌دهی یکنواخت‌تر بر روی نخ‌ها و امکان استفاده از نخ‌ها با پوشش‌های مختلف و کاربردهای مختلف در ساختار یک پارچه است. با پوشش‌دهی نانوالیاف بر روی نخ می‌توان علاوه بر نظم دادن به ساختار کلی نانوالیاف، مقاومت مکانیکی آن را نیز تا حد دلخواه (با توجه به نوع نخ و پلیمر استفاده شده در مغزی) افزایش داد که می‌تواند با توجه به خواص ترکیبی نانوالیاف و نخ مورد استفاده کاربردهای زیادی در صنایع نساجی برای ساخت پارچه‌ها و منسوجات مورد استفاده در فیلتراسیون، لباس‌های محافظ و پزشکی (نخ‌های بخیه، بانداز زخم و غیره) داشته باشد [۱۵].

در این مطالعه، از یک روش تغییر یافته الکتروریسی با عنوان پین اسپینینگ به منظور افزایش سرعت تولید نانو الیاف و پوشش‌دهی پیوسته نخ استفاده شده است. همچنین پارامترهای موثر بر فرآیند فرآیند پوشش‌دهی شناسایی و مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته است. ایجاد نظم و آرایش در نانو الیاف پوشش‌دهی شده و افزایش سرعت پوشش‌دهی از اهداف اصلی بررسی پارامترهای موثر بر فرآیند فرآیند است.

۲ تجربیات

۱-۲ مواد

پودر پلیمر تجاری پلی‌اکریلونیتریل (PAN) با وزن مولکولی ۱۰۰۰۰۰ گرم بر مول و وزن مولکولی عددی ۷۰۰۰۰ از شرکت پلی‌اکریل ایران، حلال دی‌متیل فرم‌امید از شرکت مرک آلمان و نخ نایلون ۱۰ فیلامنتی با ظرافت ۴/۵ تکس از شرکت تایر کورد زنجان تهیه شده است. محلول‌های پلیمری PAN / DMF با غلظت‌های ۱۰، ۱۲، ۱۳ و ۱۴ درصد وزنی وزنی با استفاده از هیتر با همزن مغناطیسی در دمای ۵۰ درجه سانتیگراد در مدت زمان ۱۲ ساعت تهیه شد.

به صورت تفاوت وزن بین ۱۰۰ سانتیمتر نخ پوشش داده شده و نخ بدون پوشش تعریف شده و به عنوان پوشش دهی در متر گزارش شده است.

۳ نتایج و بحث

لازمه‌ی پوشش دهی یکتواخت و مداوم نانوالیاف بر روی نخ، تشکیل و پایداری مخروط نانوالیاف است. ناپایداری مخروط منجر به پوشش دهی مقطعی بر روی نخ و شکست فرآیند پوشش دهی خواهد شد. در این تحقیق، شش پارامتر مهم تأثیرگذار بر روی مورفولوژی نخ پوشش داده شده، میزان پوشش دهی و هم‌سویی نانوالیاف، شناسایی شده و مورد بررسی قرار گرفته است که شامل تأثیر ولتاژ اعمال شده، غلظت محلول پلیمری، فاصله بین ریسنده‌ها، سرعت چرخش ریسنده‌ها، سرعت چرخش مخروط‌ساز و سرعت جمع‌آوری نخ پوشش داده شده می‌شود. سایر پارامترهای ثابت در هر بخش، طبق جدول ۱، در تمامی بخش‌های پژوهش ثابت در نظر گرفته شده است.

۳-۱ تأثیر ولتاژ اعمال شده

الکتروریسی یک روش است که در آن محلول پلیمری با استفاده از ولتاژهای بالا باردار شده و به صورت جت‌های پلیمری پرتاب خواهد شد و در نهایت به نانوالیاف تبدیل می‌شود. در این روش به جای استفاده از دستگاه‌های مکانیکی برای اکستروژن محلول، از یک منبع ولتاژ بالا برای باردار کردن محلول استفاده می‌شود. بین بارهای هم نام مجاور در قطرات محلول نیروی دافعه الکتریکی ایجاد خواهد شد، در ولتاژهای بالاتر از یک مقدار مشخص که به «ولتاژ بحرانی» معروف است، نیروی ناشی از میدان الکتریکی بر نیروی کشش سطحی محلول غلبه کرده و منجر به فوران جت از قطرات باردار شده می‌شود [۹]. ولتاژ اعمال شده یکی از مهم‌ترین پارامترهای مؤثر در فرآیند الکتروریسی است که مستقیماً بر روی تعداد جت‌های تشکیل شده و قطر نانوالیاف تأثیر می‌گذارد [۲۰].

در این تحقیق برای بررسی تأثیر ولتاژ اعمال شده بر روی مورفولوژی و میزان پوشش دهی نانوالیاف بر روی نخ از سه ولتاژ ۲۰، ۲۲ و ۲۴ کیلوولت استفاده شد. همچنین مقدار ثابت ۵ پارامتر دیگر برای بررسی ولتاژ، بر طبق مقادیر جدول ۱ در نظر گرفته شده است. با افزایش ولتاژ در این محدوده، میانگین قطر نانوالیاف کاهش یافت که در شکل ۳ (الف و ب) نشان داده شده است. افزایش ولتاژ منجر به افزایش بار سطحی قطرات، افزایش نیروی دافعه بین بارهای هم نام و همچنین قوی‌تر شدن میدان الکتریکی خواهد شد، این عوامل باعث افزایش نیروی کششی وارد شده به جت‌ها و در نهایت کاهش قطر نانوالیاف می‌شوند [۲۱].

ریسنده منفی دارای بار القایی مثبت خواهد شد. به این ترتیب بین هر واحد ریسنده و مخروط‌ساز یک میدان الکتریکی ایجاد خواهد شد. با برقراری ولتاژ، قطرات محلول پلیمری قرار گرفته در نوک پین‌های ریسنده به صورت استاتیک باردار شده و این بارها به صورت یکتواخت در سراسر قطره پخش خواهد شد [۱۸]. تجمع بار در سطح قطرات و میدان الکتریکی منجر به ایجاد یک حالت برآمدگی در انتهای قطره می‌شود که به مخروط تیلور معروف است [۱۹]. با افزایش قدرت میدان الکتریکی جت‌های پلیمری باردار، از نوک پین‌ها به سمت قسمتی از مخروط‌ساز که دارای بار مخالف است، پرتاب شده و با از دست دادن بار خود خنثی خواهند شد که منجر به جمع‌آوری نانوالیاف بر روی مخروط‌ساز خواهد شد.

با اضافه شدن نخ نایلون به منطقه الکتروریسی، نانوالیاف تولید شده به علت حرکت متلاطم و مارپیچی که دارند به سطح نخ می‌چسبند و بین نخ و مخروط‌ساز، کشیده شده و یک مخروط نانوالیاف دور نخ ایجاد می‌کنند. شکل ۲ تصویری از مخروط نانوالیاف تشکیل شده توسط مخروط‌ساز را نشان می‌دهد. چرخش مخروط‌ساز منجر به چرخش مخروط نانوالیاف و پیچیده شدن آن دور نخ می‌شود که در نهایت باعث پوشش دهی نخ خواهد شد. فرآیند پوشش دهی نانوالیاف بر روی نخ با حرکت نخ از نگه دارنده به سمت منطقه الکتروریسی و جمع کردن آن توسط جمع کننده به صورت مداوم ادامه می‌یابد. در این تحقیق، فاصله بین واحدهای ریسنده به عنوان ناحیه پوشش دهی تعریف شده است.



شکل ۲ مخروط نانوالیاف

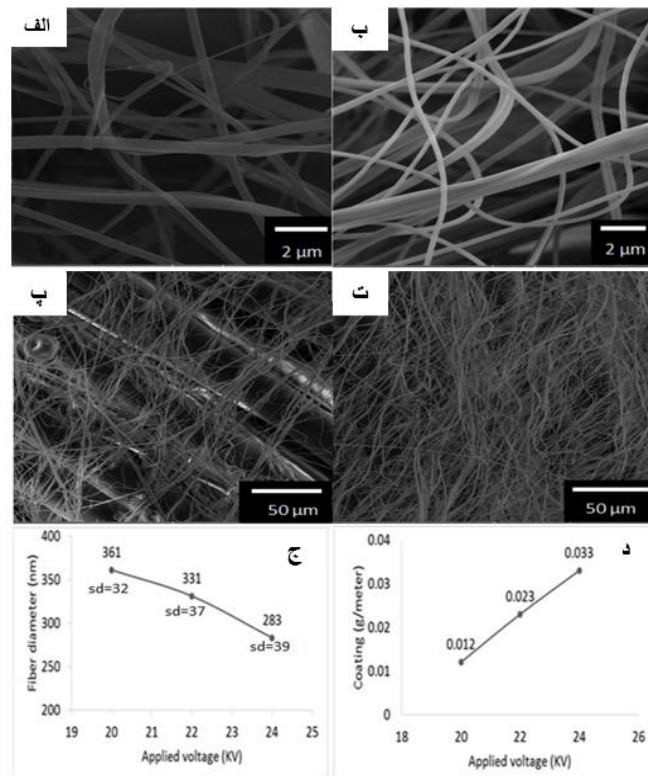
۲-۴ مشخصه‌یابی مورفولوژی نانوالیاف

برای بررسی تأثیر هر پارامتر بر روی مورفولوژی نانوالیاف از تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) استفاده شد. برای به دست آوردن میانگین قطر نانوالیاف موجود در هر نمونه، قطر حداقل ۱۰۰ رشته توسط نرم افزار دی جی مایزر اندازه گیری شد. میزان پوشش دهی نانوالیاف بر روی نخ

جدول ۱ مقادیر مشخص در نظر گرفته شده برای پارامترهای در هر بخش

غلظت (درصد وزنی)	ولتاژ (کیلوولت)	فاصله (سانتیمتر)	سرعت چرخش ریسنده‌ها (دور بر دقیقه)	سرعت مخروط‌ساز (دور بر دقیقه)	سرعت جمع‌آوری نخ پوشش کاری شده (سانتیمتر بر دقیقه)
۱۳	۲۲	۱۷	۴۰	۱۸	۵

در این تحقیق، با افزایش غلظت محلول پلیمری در محدوده مورد بررسی، میانگین قطر نانوالیاف افزایش یافته است که در شکل ۴ نشان داده شده است. هوان هی و همکاران [۲۵] نشان دادند که قطر نانوالیاف PAN شدیداً به ویسکوزیته وابسته است و ویسکوزیته محلول به صورت مستقیم با افزایش غلظت افزایش می‌یابد، در نتیجه با افزایش غلظت، ویسکوزیته و قطر نانوالیاف افزایش می‌یابد [۲۵]. در غلظت‌های پایین نیروی دافعه بارهای هم نام بر نیروهای ویسکوالاستیک غلبه کرده و باعث ازدیاد طول بیشتر جت‌ها و نازک‌تر شدن نانوالیاف می‌شود، در حالی که در غلظت‌های بالاتر نیروی ویسکوالاستیک بیشتر بوده و باعث ضخیم‌تر شدن الیاف می‌شود [۲۶]. همان‌گونه که در شکل ۴ (پ، ت، ج) نشان داده شده است در این تحقیق با افزایش غلظت محلول پلیمری دانه‌های کمتری در ساختار نانوالیاف مشاهده می‌شود. تأثیر غلظت بر روی قطر و میزان پوشش‌دهی نانوالیاف بر روی نخ در شکل ۴ (د و ح) نشان داده شده است.

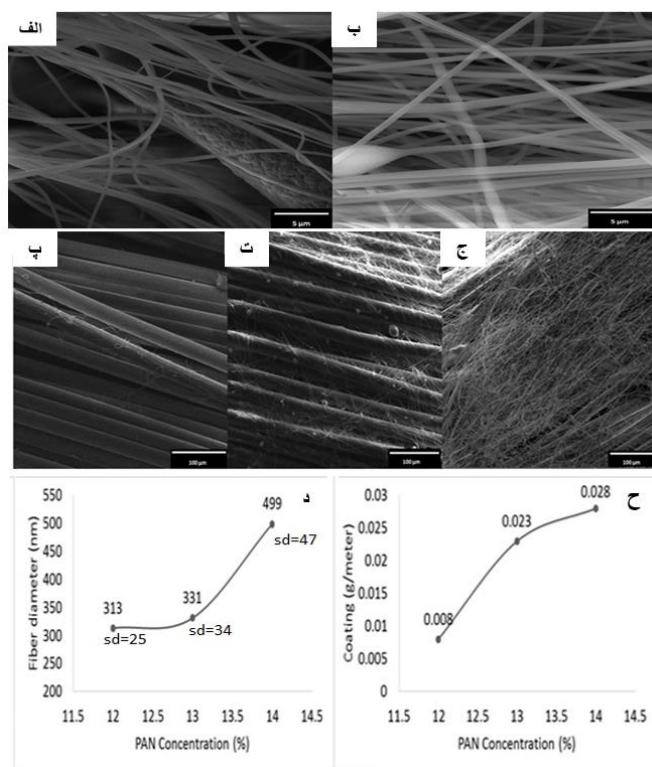


شکل ۳ تصاویر SEM تأثیر ولتاژ به ترتیب در دو ولتاژ ۲۰ و ۲۴ کیلوولت: (الف و ب) بر روی قطر نانوالیاف، (پ و ت) بر روی میزان پوشش‌دهی نانوالیاف بر روی نخ، (ج) میانگین قطر نانوالیاف و (د) پوشش‌دهی در متر برای دو ولتاژ ۲۰ و ۲۴ کیلوولت.

با افزایش ولتاژ، تعداد جتهای پرتاب شده و شتاب پرتاب آنها بیشتر شده و تولید نانوالیاف افزایش می‌یابد که به دلیل افزایش قدرت میدان الکتریکی است [۲۲، ۲۳]. با افزایش ولتاژ، نانوالیاف بیشتری تولید شده و به مخروط تشکیل شده دور نخ اضافه می‌شود. در نتیجه، میزان پوشش‌دهی نانوالیاف دور نخ بیشتر می‌شود که در شکل ۳ (پ و ت) قابل مشاهده است. تأثیر ولتاژ بر روی میانگین قطر نانوالیاف و میزان پوشش‌دهی در شکل ۳ (ج و د) نشان داده شده است.

۲-۳ تأثیر غلظت

غلظت محلول پلیمری یکی از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر روی درهم‌تنیدگی زنجیرهای پلیمری است و ویسکوزیته محلول را مستقیماً تحت تأثیر قرار می‌دهد. افزایش غلظت پلیمر درون حلال، ویسکوزیته محلول را افزایش خواهد داد، اگرچه عوامل دیگری مانند وزن مولکولی، ترکیب حلال و درجه حرارت محلول بر روی ویسکوزیته تأثیر دارند، غلظت مهم‌ترین عامل برای کنترل ویسکوزیته و تشکیل نانوالیاف در حین الکتروروسی است [۲۴]. برای بررسی تأثیر غلظت بر روی نانوالیاف تشکیل شده، سه غلظت ۱۲، ۱۳ و ۱۴ درصد وزنی، و به ترتیب با ویسکوزیته‌های ۶۴۹، ۸۷۰ و ۱۴۳۷ سنتی پواز، مورد بررسی قرار گرفت. همچنین مقدار ثابت ۵ پارامتر دیگر در بررسی غلظت، بر طبق مقادیر جدول ۱ در نظر گرفته شده است.

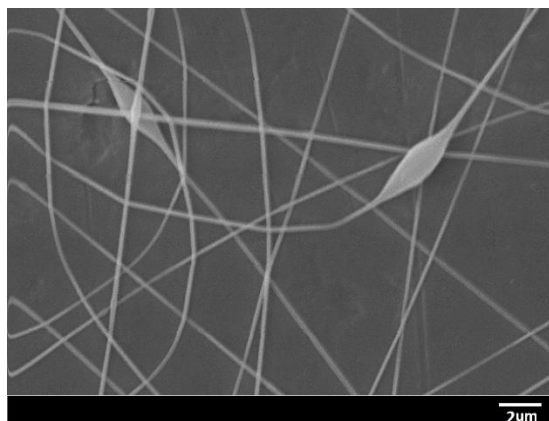


شکل ۴ تصاویر SEM تأثیر غلظت به ترتیب بر روی قطر الیاف تشکیل شده، الف: ۱۰٪ وزنی؛ ب: ۱۴٪ وزنی، میزان پوشش‌دهی بر روی نخ و تشکیل دانه، پ: ۱۰٪ وزنی؛ ت: ۱۲٪ وزنی؛ ج: ۱۴٪ وزنی؛ د: تأثیر غلظت بر روی میانگین قطر نانوالیاف؛ ح: تأثیر غلظت بر روی میزان پوشش‌دهی در متر.

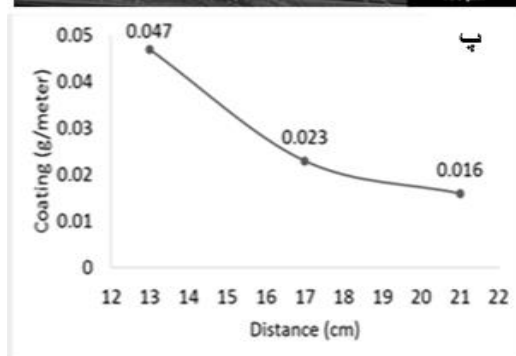
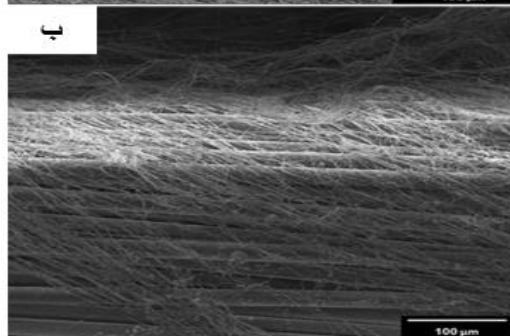
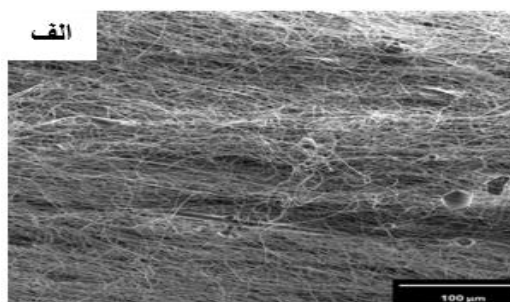
همان‌گونه که در شکل ۵ مشخص است در غلظت ۱۰٪ میزان نانوالیاف پوشش داده شده بر روی نخ بسیار ناچیز است. با افزایش غلظت تا ۱۴٪ میزان نانو الیاف پوشش داده شده بر روی نخ افزایش یافته است. در غلظت ۱۲٪ دانه‌های زیادی در ساختار نانو الیاف دیده می‌شود (شکل ۵) که با افزایش غلظت به ۱۴٪ تعداد آنها کاهش یافته است. تشکیل دانه در ساختار نانوالیاف به دلیل کشش سطحی بالای محلول پلیمر است که منجر به تکه تکه شدن جت‌های پلیمری به صورت قطرات می‌شود، فانگ و همکاران [۲۷] نشان

قبل از پیوستن به مخروط، به محیط اطراف می‌چسبند، بنابراین نانوالیاف کمتری به مخروط اضافه شده و به دور نخ پیچیده می‌شود که در نهایت منجر به کاهش پوشش‌دهی بر روی نخ خواهد شد. در شکل ۵ (پ) میزان نانوالیاف پوشش داده شده بر روی نخ در فواصل ۱۳ و ۲۱ سانتیمتری نشان داده شده است.

دادند که با افزایش ویسکوزیته، شکل دانه‌ها از حالت کروی خارج شده که باعث می‌شود الیاف صاف‌تری تولید شود [۲۷].



شکل ۵ تصویر بیدهای تشکیل شده در غلظت ۱۲٪



شکل ۶ تصاویر SEM تأثیر فاصله بر روی میزان پوشش‌دهی نانوالیاف بر روی نخ: (الف): فاصله ۱۳ سانتیمتر، (ب): فاصله ۲۱ سانتیمتر، (پ): میزان نانوالیاف پوشش‌دهی شده در این فواصل.

۴-۳ سرعت چرخش ریسنده‌ها

با استفاده از سرعت چرخش ریسنده‌ها می‌توان شدت جریان محلول تزریق شده به محیط الکتروریسی را کنترل کرد، به این صورت که با افزایش سرعت چرخش ریسنده‌ها محلول پلیمری بیشتری در معرض میدان الکتریکی قرار خواهد گرفت. برای بررسی اثرات مربوط به سرعت چرخش ریسنده‌ها بر روی مورفولوژی و میزان پوشش‌دهی نانوالیاف بر روی نخ، سه سرعت چرخش ۲۰، ۴۰ و ۶۰ دور بر دقیقه، آزمایش شد. مطالعات انجام شده در روش‌های الکتروریسی معمولی با استفاده از سوزن نشان داده است که با افزایش شدت جریان محلول، قطر نانوالیاف تولید شده افزایش می‌یابد که می‌تواند به دلیل کاهش زمان در دسترس برای تبخیر حلال باشد [۲۸، ۱۷]. همچنین مقدار

۳-۳ تأثیر فاصله

فاصله بین الکتروده مثبت و منفی یکی دیگر از عوامل تأثیرگذار بر روی اندازه و مورفولوژی الیاف است. در یک ولتاژ ثابت با کاهش فاصله بین الکترودها شدت میدان الکتریکی افزایش می‌یابد [۲۸]. البته برای افزایش شدت میدان الکتریکی فاصله را به هر میزان دلخواهی نمی‌توان کاهش داد؛ زیرا حلال باید فرصت لازم برای تبخیر شدن را داشته باشد. از طرفی، اگر فاصله بسیار زیاد باشد، به ولتاژ بیشتری برای شروع فرآیند الکتروریسی نیاز داریم که ممکن است منجر به «تخلیه کرونا» شود [۲۸]. در این تحقیق فاصله بین ریسنده‌ها به عنوان یک پارامتر تأثیرگذار بر روی قطر نانوالیاف و میزان پوشش‌دهی شناسایی شد و مورد بررسی قرار گرفت همچنین مقدار ثابت ۵ پارامتر دیگر برای بررسی فاصله، بر طبق مقادیر جدول ۱ در نظر گرفته شده است. فاصله بین ریسنده مثبت و منفی بررسی شده در این تحقیق ۱۳، ۱۷ و ۲۱ سانتیمتر بود. با افزایش فاصله از ۱۳ تا ۲۱ سانتیمتر میانگین قطر نانوالیاف ۲۴ نانومتر کاهش یافته است. با توجه به اینکه تأثیر تغییر فاصله بر روی میانگین قطر نانوالیاف بسیار ناچیز بوده است، نتایج توسط آنالیز ANOVA مورد بررسی بیشتر قرار گرفت. نتایج ANOVA نشان می‌دهد که هرچند افزایش فاصله موجب کاهش ناچیز قطر نانوالیاف شده است اما از نظر آماری این کاهش قطر معنی‌دار نیست، پس می‌توان گفت که تغییر فاصله در محدوده مورد بررسی در این تحقیق، بر روی میانگین قطر نانوالیاف بی‌تأثیر بوده است. افزایش طول و نازک شدن جت‌های پلیمری تا زمانی که محو پلیمری خشک نشده، امکان‌پذیر است. بنابراین بعد از خشک شدن جت افزایش فاصله ریسندگی تأثیری بر کاهش قطر الیاف ندارد.

با افزایش فاصله از ۱۳ تا ۲۱ سانتیمتر، میزان پوشش‌دهی نانوالیاف بر روی نخ به وضوح کاهش یافته است که در شکل ۵ (الف و ب) نشان داده شده است. کاهش پوشش‌دهی نانوالیاف بر روی نخ می‌تواند دارای دلایل مختلفی باشد. با افزایش فاصله، شدت میدان الکتریکی کاهش می‌یابد که منجر به کاهش تولید نانوالیاف و در نهایت کاهش پوشش‌دهی می‌شود [۲۲]. همچنین مشاهده شد که با افزایش فاصله مقدار زیادی از نانوالیاف تولید شده

تأثیر سرعت چرخش ریسنده، در سرعت‌های بالاتر از ۶۰ دور بر دقیقه، به دلیل افزایش نیروهای گریز از مرکز وارد شده به قطرات، بخشی از محلول پلیمری به صورت قطره در محیط الکتروریسی پرتاب شد که باعث اختلال در فرآیند پوشش‌دهی و از هدر رفتن محلول می‌شود؛ بنابراین سرعت‌های بالاتر از ۶۰ دور بر دقیقه مورد مطالعه قرار نگرفتند. با افزایش میزان تولید نانوالیاف، مخروط نانو الیاف تشکیل شده دور نخ متراکم‌تر شده و پوشش‌دهی بر روی نخ افزایش یافته است. تأثیر افزایش سرعت چرخش ریسنده‌ها بر روی میزان پوشش‌دهی نخ در شکل ۷ (پ و ت) نشان داده شده است. در شکل ۷ (ج و د) تأثیر سرعت چرخش ریسنده بر روی قطر و میزان پوشش‌دهی نانوالیاف نشان داده شده است.

۳-۵ تأثیر سرعت چرخش مخروط ساز

یکی از عوامل مؤثر بر روی نظم و انسجام نانوالیاف پوشش‌دهی شده بر روی نخ، سرعت چرخش مخروط‌ساز است. سرعت چرخش مخروط‌ساز مهم‌ترین پارامتر مؤثر بر روی پوشش‌دهی نخ است که باعث می‌شود تا مخروط نانوالیاف ایجاد شده، دور نخ پیچیده شود. مشکلات مربوط به انسجام ساختاری سطح پوشش داده شده را می‌توان با استفاده از شناخت درست از اثر سرعت چرخش مخروط‌ساز بررسی کرد [۹]. در یکی از مطالعات انجام شده در زمینه پوشش‌دهی نانو الیاف بر روی نخ اثر سرعت چرخش مخروط‌ساز بر روی نظم الیاف مورد بررسی قرار گرفت و مشخص شد که با افزایش سرعت چرخش مخروط ساز، نظم و همسویی الیاف پوشش‌دهی شده بر روی نخ کاهش یافته است [۹]. در شرایطی که سایر پارامترها ثابت نگه داشته شده بودند، برای بررسی اثر سرعت چرخش مخروط‌ساز بر روی پوشش‌دهی نانوالیاف بر روی نخ، سه مقدار ۱۸، ۳۸ و ۵۸ دور بر دقیقه، مورد آزمایش قرار داده گرفت. سایر شرایط مورد بررسی در تأثیر سرعت چرخش مخروط‌ساز بر روی مورفولوژی و میزان پوشش‌دهی نانوالیاف طبق مقدار ثابت ۵ پارامتر دیگر در جدول ۱ در نظر گرفته شده است.

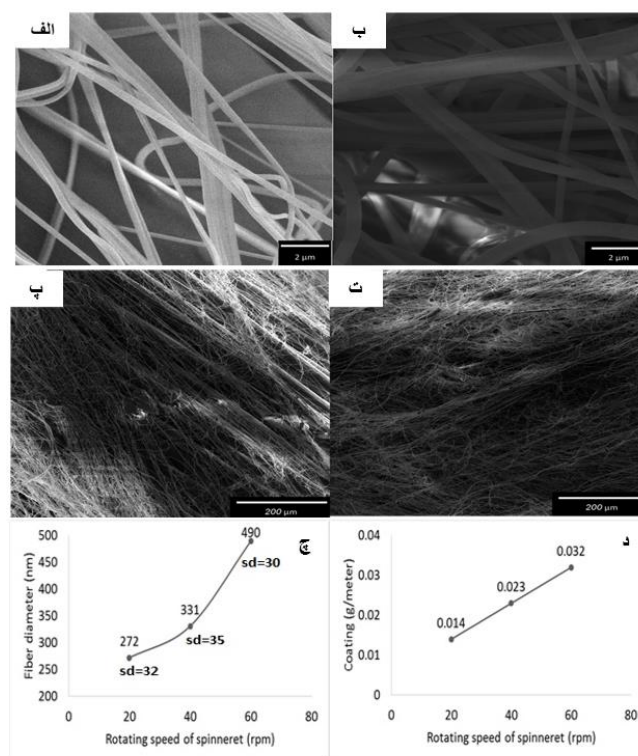
همان‌گونه که در شکل ۸ (الف و ب) مشخص است هم‌سویی نانوالیاف پوشش‌دهی شده بر روی نخ با افزایش سرعت چرخش مخروط‌ساز در محدوده مورد بررسی قرار گرفته کاهش یافته است که می‌تواند به این دلیل باشد که با افزایش سرعت چرخش مخروط‌ساز، نانوالیاف قبل از پوشش داده شدن بر روی نخ فرصت کمتری برای هم‌سو شدن پیدا می‌کنند [۹]. همچنین، با افزایش سرعت چرخش مخروط ساز، میانگین قطر نانوالیاف نیز افزایش یافته است (شکل ۸). این موضوع را می‌توان اینگونه توضیح داد که در سرعت‌های چرخش پایین‌تر، الیاف قرار رفته در مخروط تشکیل شده برای اینکه دور نخ مغزی پیچیده شوند، تحت کشش بیشتر قرار می‌گیرند. در نتیجه، این کشش سبب آرایش یافتگی بیشتر و کاهش قطر الیاف می‌شود.

با افزایش سرعت چرخش مخروط‌ساز میزان نانوالیاف پوشش داده شده بر روی نخ به‌وضوح بیشتر شده است، همچنین در تصاویر شکل ۸ الیاف به هم چسبیده دیده می‌شوند علت این مسئله کشیدگی و مقدار موازی شدن الیاف

ثابت ۵ پارامتر دیگر برای بررسی سرعت چرخش ریسنده‌ها، بر طبق مقادیر جدول ۱ در نظر گرفته شده است.

در این سیستم الکتروریسی، تغییر در سرعت چرخش ریسنده یک عامل مؤثر بر روی مورفولوژی و میزان پوشش‌دهی نانوالیاف بر روی نخ است. با چرخش ریسنده درون ظرف محلول، نوک پین‌ها به محلول پلیمری آغشته شده و با ادامه چرخش، قطرات محلول قرار گرفته در نوک پین‌ها در معرض میدان الکتریکی قرار می‌گیرد. با اعمال ولتاژ قطرات محلول قرار گرفته در نوک پین‌ها، باردار شده و تحت تأثیر میدان الکتریکی و دافعه بین بارهای هم نام، مخروط تیلور در نوک پین ایجاد می‌شود. جت‌های پلیمری از نوک پین‌ها به بیرون پرتاب شده و با از دست دادن حلال خود به نانوالیاف تبدیل می‌شوند.

در این تحقیق، با افزایش سرعت چرخش ریسنده‌ها در محدوده مورد بررسی، میانگین قطر نانوالیاف افزایش یافته است که می‌تواند به دلیل پرتاب جت‌های ضخیم‌تر از ریسنده باشد. تأثیر افزایش سرعت چرخش ریسنده بر روی میانگین قطر نانوالیاف در شکل ۷ (الف و ب) نشان داده شده است.

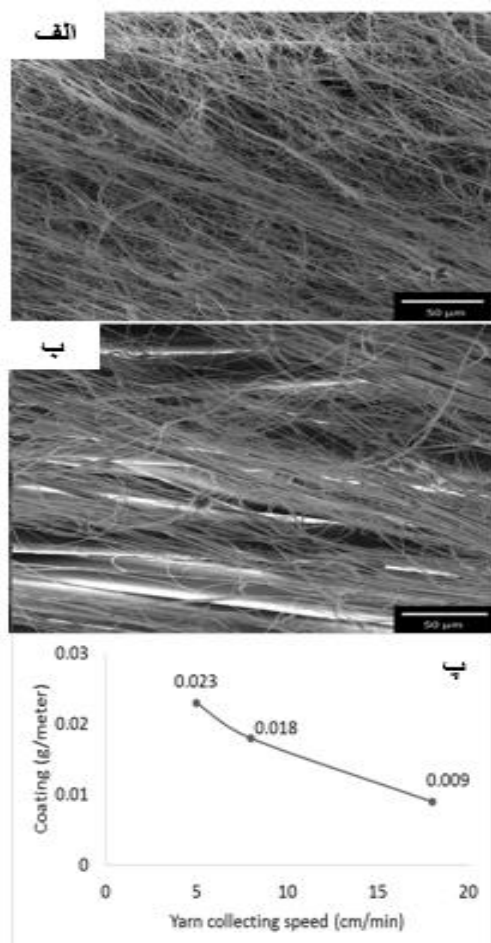


شکل ۷ تصاویر SEM تأثیر سرعت چرخش ریسنده‌ها بر روی قطر نانوالیاف (الف): ۲۰ دور بر دقیقه؛ ب): ۳۰ دور بر دقیقه؛ ج و د): تأثیر سرعت چرخش ریسنده بر روی میزان پوشش‌دهی نخ؛ ج و د): تأثیر سرعت چرخش ریسنده بر روی قطر و میزان پوشش‌دهی

در سرعت‌های کمتر از ۲۰ دور بر دقیقه میزان تولید نانوالیاف بسیار کم بود؛ به‌گونه‌ای که مخروط نانو الیاف تشکیل شده بسیار نازک بوده و به‌صورت مداوم بریده می‌شود. با افزایش سرعت چرخش ریسنده میزان تولید نانوالیاف به وضوح افزایش یافت و مخروط تشکیل شده، توانایی پوشش‌دهی نانوالیاف بر روی کل سطح نخ را داشت. با توجه به مقادیر سایر پارامترها برای بررسی

پوشش‌دهی سه سرعت ۵، ۸ و ۱۸ سانتیمتر بر دقیقه مورد آزمایش قرار گرفته است. شرایط مورد بررسی سایر پارامترها را برای بررسی تأثیر سرعت جمع‌آوری نخ طبق مقدار ثابت ۵ پارامتر دیگر در جدول ۱ در نظر گرفته شده است.

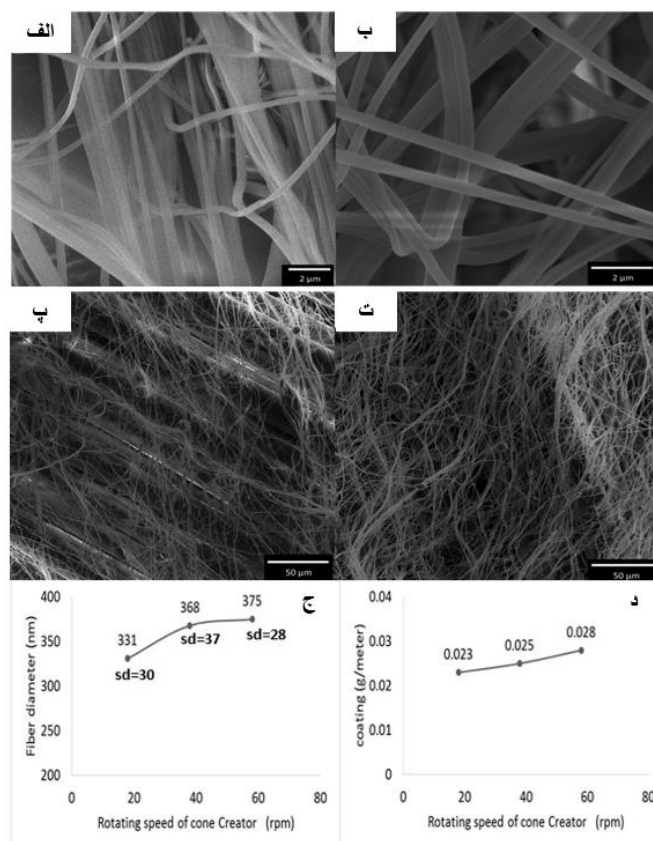
همان‌گونه که در شکل ۹ (الف و ب) به‌وضوح مشخص است، با افزایش سرعت جمع‌آوری نخ، میزان پوشش‌دهی نانوالیاف بر روی نخ کاهش یافته است. با افزایش سرعت جمع‌آوری نخ، میزان پوشش‌دهی در هر متر کاهش یافته، درحالی‌که میزان پوشش‌دهی در ساعت افزایش یافته است. این موضوع می‌تواند به این دلیل باشد که با افزایش سرعت جمع‌کردن نخ، مخروط نانوالیاف تشکیل شده دور نخ کشیده‌تر شده و نانوالیاف تولید شده فضای بیشتر برای پیوستن به مخروط دارند که منجر به کاهش هدر رفتن و پراکنده شده الیاف در فضای اطراف می‌شود. مقدار نانوالیاف پوشش داده شده بر روی نخ در سرعت‌های مختلف در شکل ۹ (پ) نشان داده شده است.



شکل ۹ تصاویر SEM تأثیر افزایش سرعت جمع‌آوری نخ بر روی میزان پوشش‌دهی (الف): سرعت جمع‌آوری ۵ سانتیمتر بر دقیقه؛ ب: سرعت جمع‌آوری ۱۸ سانتیمتر بر دقیقه، پ: مقدار نانوالیاف پوشش داده شده بر روی نخ در سرعت‌های ۵، ۸ و ۱۸ سانتیمتر بر دقیقه.

۳-۷ بهبود پوشش‌دهی و سرعت جمع‌آوری نخ پوشش داده شده با افزایش سرعت جمع‌آوری نخ پوشش داده شده، نخ مرکزی زمان کمتری را در منطقه الکتروروسی سپری خواهد کرد که منجر به پوشش‌دهی ضعیف بر

و در نتیجه کنار هم قرار گرفتن الیاف وابسته به سرعت چرخش تابنده و سرعت برداشت نخ توسط جمع‌کننده است که سبب چسبندگی دسته‌ای از الیاف به یکدیگر شده است. تأثیر افزایش سرعت چرخش مخروط‌ساز بر روی میزان پوشش‌دهی در شکل ۸ (پ و ت) نشان داده شده است. در زمان پوشش‌دهی مشاهده شد که با افزایش سرعت چرخش مخروط‌ساز مقدار نانوالیافی که به اطراف پراکنده شده و هدر رفته بودند، کمتر شده است. بنابراین، الیاف بیشتری به مخروط ملحق شده و توسط آن دور نخ پیچیده می‌شدند که باعث افزایش پوشش‌دهی بر روی نخ شده است. تأثیر سرعت چرخش مخروط‌ساز بر روی قطر و میزان پوشش‌دهی نانوالیاف بر روی نخ در شکل ۸ (ج و د) نشان داده شده است.



شکل ۸ تصاویر SEM تأثیر سرعت چرخش مخروط‌ساز به ترتیب: بر همسویی نانوالیاف (الف): سرعت ۱۸ دور بر دقیقه؛ ب: سرعت ۵۸ دور بر دقیقه، بر میزان پوشش‌دهی (پ): سرعت ۱۸ دور بر دقیقه؛ ت: سرعت ۵۸ دور بر دقیقه، ج: بر میانگین قطر نانوالیاف در سه سرعت ۱۸، ۳۸ و ۵۸ دور بر دقیقه؛ د: بر روی پوشش‌دهی نانوالیاف بر روی نخ در سه سرعت ۱۸، ۳۸ و ۵۸ دور بر دقیقه.

۳-۶ تأثیر سرعت جمع‌آوری نخ

یکی دیگر از پارامترهای مؤثر بر روی میزان پوشش نخ، سرعت جمع‌آوری نخ است. هرچه سرعت جمع‌آوری نخ بیشتر باشد نخ مرکزی فرصت کمتری پیدا می‌کند تا در معرض پوشش‌دهی قرار گیرد و بنابراین انتظار می‌رود که با افزایش سرعت جمع‌آوری، میزان پوشش‌دهی کمتر شود. آنالیز عکس‌های SEM نشان داد که تغییر در سرعت جمع‌آوری نخ بر روی میانگین قطر الیاف بی‌تأثیر است، زیرا این پارامتر بر روی نیروهای وارد شده به جت‌های پلیمری اثری ندارد. برای بررسی تأثیر سرعت جمع‌آوری نخ بر روی میزان

نانوالیاف در این پژوهش شامل ولتاژ اعمالی، غلظت محلول پلیمری، سرعت چرخش ریسنده‌ها، سرعت چرخش مخروط‌ساز، سرعت جمع‌آوری نخ و فاصله‌ی بین الکتروده مثبت و منفی، بصورت مجزا مورد بررسی قرار گرفتند. نتیجه‌ی حاصل از تغییر این پارامترها بر مورفولوژی نخ نایلون پوشش داده شده با نانوالیاف PAN با تصاویر SEM مورد ارزیابی قرار گرفت. سه ولتاژ ۲۰، ۲۴ و ۲۸ کیلوولت مورد بررسی قرار گرفت و نتیجه آن شد که با افزایش ولتاژ میزان پوشش‌دهی به علت قویتر شدن میدان الکتریکی افزایش می‌یابد. همچنین در بررسی تاثیر غلظت محلول الکترورسی در ۳ غلظت مختلف بهترین نتیجه در نمونه غلظت ۱۴ درصد مشاهده شد. افزایش سرعت چرخش مخروط‌ساز و چرخش ریسنده هر دو سبب افزایش پوشش‌دهی می‌شود اما افزایش فاصله‌ی دو الکتروده مثبت و منفی سبب کاهش میدان الکتریکی و در نتیجه کاهش پوشش‌دهی می‌شود. با افزایش سرعت جمع‌آوری نخ، میزان پوشش‌دهی در هر متر کاهش و میزان پوشش‌دهی در ساعت افزایش می‌یابد. در نهایت نخ پوشش داده شده با نانوالیاف در شرایط بهینه‌ی شش پارامتر مورد ارزیابی به ترتیب در ولتاژ ۲۴ کیلووات، غلظت ۱۴ درصد وزنی، فاصله ۱۵ سانتی‌متر، سرعت چرخنده ریسنده‌ها ۶۰ متر بر ثانیه و سرعت چرخش مخروط‌ساز ۷۵ دور بر دقیقه به میزان پوشش ۰/۵۸۸ گرم بر ساعت به صورت مداوم با موفقیت تولید شد که در مقایسه با الکترورسی متداول افزایش تولید حدود ۱۰ برابری، در شرایط مشابه ریسندگی را ایجاد می‌کند.

مراجع

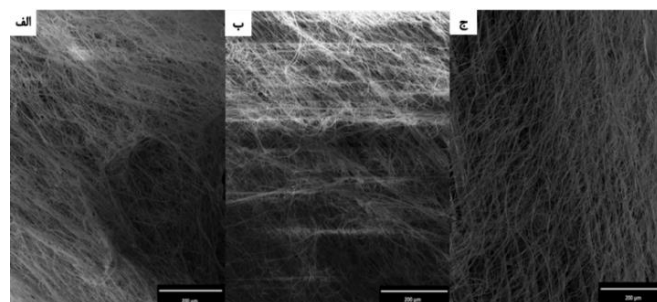
- [1] Xu, Huaizhong, et al. "A review on current nanofiber technologies: Electrospinning, centrifugal spinning, and electro-centrifugal spinning." *Macromolecular Materials and Engineering* 308, 22005, 2023.
- [2] Hu, Qinghai, et al. "Preparation of Polydopamine-Based Electrospun Nanofibers as an Efficient Adsorbent for Solid-Phase Extraction of Trace Mycotoxins Followed by HPLC." *ACS Applied Polymer Materials* 6.18 11193-11204, 2024.
- [3] Al-Abduljabbar, Abdulhamid, and Irfan Farooq. "Electrospun polymer nanofibers: Processing, properties, and applications." *Polymers* 15.1 65, 2022.
- [4] Zhang, Zhi-Ming, et al. "A review on nanofiber fabrication with the effect of high-speed centrifugal force field." *Journal of Engineered Fibers and Fabrics* 14 1558925019867517.2019.
- [5] Drabek, Jiri, and Martin Zatloukal. "Meltblown technology for production of polymeric microfibers/nanofibers: A review." *Physics of Fluids* 31.9, 2019.
- [6] Niu, Haitao, Hua Zhou, and Hongxia Wang. "Electrospinning: an advanced nanofiber production technology." *Energy Harvesting Properties of Electrospun Nanofibers*. Bristol, UK: IOP Publishing, 1-44, 2019.

روی آن می‌شود؛ اما با شناخت درست از تأثیر سایر پارامترها می‌توان همزمان سرعت جمع‌آوری نخ پوشش داده شده و میزان پوشش‌دهی بر روی نخ را افزایش داد. در بخش‌های قبل مشخص شد که افزایش ولتاژ مورد استفاده، غلظت، سرعت چرخش ریسنده، سرعت چرخش مخروط‌ساز و کاهش فاصله منجر به افزایش مقدار نانوالیاف پوشش داده شده بر روی نخ می‌شود؛ بنابراین برای افزایش سرعت جمع‌آوری نخ پوشش داده شده و مقدار نانوالیاف پوشش داده شده بر روی آن شرایط بهینه مورد بررسی مطابق با جدول ۲ تنظیم شد.

جدول ۲ پارامترهای مورد برای بهینه‌سازی میزان پوشش‌دهی

ولتاژ (کیلوولت)	غلظت (درصد وزنی)	فاصله (سانتیمتر)	سرعت چرخش ریسنده‌ها (دور بر دقیقه)	سرعت چرخش مخروط‌ساز (دور بر دقیقه)
۲۴	۱۴	۱۵	۶۰	۷۵

برای بررسی تأثیر بهینه‌سازی پارامترها بر روی میزان پوشش‌دهی، سه سرعت جمع‌آوری ۱۰، ۱۵ و ۲۰ سانتیمتر بر دقیقه مورد آزمایش قرار گرفت که همان‌طور که در شکل ۱۰ نشان داده شده است در هر سه سرعت مورد آزمایش، پوشش‌دهی نانوالیاف بر روی نخ کاملاً یکنواخت بود. در شرایط آزمایشات مربوط به تأثیر سرعت جمع‌آوری نخ بر روی میزان پوشش‌دهی در سرعت جمع‌آوری نخ تا ۱۸ سانتیمتر بر دقیقه میزان پوشش‌دهی نانوالیاف بر روی نخ تا ۰/۰۹۷ گرم در ساعت است؛ در حالی که با پارامترهای بهینه‌ی ذکر شده در جدول ۲ در سرعت جمع‌آوری ۲۰ سانتیمتر بر دقیقه میزان پوشش‌دهی نانوالیاف بر روی نخ ۰/۵۸۸ گرم در هر ساعت است که افزایش حدود ۶ برابری را از خود نشان می‌دهد. در مقایسه با الکترورسی متداول با دو نازل رو به روی هم با شرایط مشابه جدول ۲ مقدار تولید ۰/۰۵۶ گرم بر ساعت است.



شکل ۱۰ تصاویر SEM بهبود سرعت و میزان پوشش‌دهی (الف): ۱۰ سانتیمتر بر دقیقه؛ (ب): ۱۵ سانتیمتر بر دقیقه؛ (ج): ۲۰ سانتیمتر بر دقیقه

۴ نتیجه‌گیری

در این تحقیق، از پودر پلیمر پلی‌اکریلونیتریل در ترکیب با حلال DMF به منظور تولید نانوالیاف از محلول حاصل، برای پوشش‌دهی نخ نایلون در در چهار غلظت متفاوت ۱۰، ۱۲، ۱۳ و ۱۴ در سیستم الکترورسی جدید ریسندگی پین استفاده شد. شش پارامتر موثر در فرآیند الکترورسی

- [7] Ibrahim, Hassan M., and Anke Klingner. "A review on electrospun polymeric nanofibers: Production parameters and potential applications." *Polymer Testing* 90, 106647, 2020.
- [8] Lou, Lihua, Odia Osemwegie, and Seshadri S. Ramkumar. "Functional nanofibers and their applications." *Industrial & Engineering Chemistry Research* 59.13 5439-5455, 2020
- [9] Dabirian, Farzad, et al. "Conformal coating of yarns and wires with electrospun nanofibers." *Polymer Engineering & Science* 52.8 ,1724-1732, 2012.
- [10] Shuakat, Muhammad Nadeem, and Tong Lin. "Highly-twisted, continuous nanofibre yarns prepared by a hybrid needle-needleless electrospinning technique." *Rsc Advances* 5.43, 33930-33937,(2015).
- [11] He, Jianxin, et al. "Multiple conjugate electrospinning method for the preparation of continuous polyacrylonitrile nanofiber yarn." *Journal of applied polymer science* 131.8 , 4.137, 2014.
- [12] Petrik, Stanislav, and Miroslav Maly. "Production nozzle-less electrospinning nanofiber technology." *MRS Online Proceedings Library (OPL)* 1240, 307, 2009.
- [13] Zhou, Mengjuan, et al. "Continuously fabricated nano/micro aligned fiber based waterproof and breathable fabric triboelectric nanogenerators for self-powered sensing systems." *Nano Energy* 104, 107885, 2022.
- [14] He, Jianxin, et al. "Fabrication of continuous nanofiber core-spun yarn by a novel electrospinning method." *Fibers and Polymers* 15, 2061-2065, 2014.
- [15] Zhou, Feng-Lei, Rong-Hua Gong, and Isaac Porat. "Nano-coated hybrid yarns using electrospinning." *Surface and Coatings Technology*, 204, 21–22, 3459-3463, 2010.
- [16] Dabirian, F., et al. "Manufacturing of twisted continuous PAN nanofiber yarn by electrospinning process." *Fibers and Polymers* 12, 610-615, 2011.
- [17] Li, Dan, and Younan Xia. "Electrospinning of nanofibers: reinventing the wheel." *Advanced materials* 16,14 1151-1170, 2004.
- [18] Reznik, S. N., et al. "Transient and steady shapes of droplets attached to a surface in a strong electric field." *Journal of Fluid Mechanics* 516, 349-377, 2004.
- [19] Wang, Xiao E., et al. "Effect of process parameters on Continuous Nanofiber Yarn using two oppositely charged spinnerets." *Advanced Materials Research* 821, 32-35, 2013.
- [20] Hu, C., R. H. Gong, and F. L. Zhou. "Electrospun sodium alginate/polyethylene oxide fibers and nanocoated yarns." *International Journal of Polymer Science*, 2015, 126041, 1-12, 2015.
- [21] Wu, Dezhi, et al. "High throughput tip-less electrospinning via a circular cylindrical electrode." *Journal of Nanoscience and nanotechnology* 10, 7 4221-4226. 2010.
- [22] Wang, Xin, et al. "Needleless electrospinning of uniform nanofibers using spiral coil spinnerets." *Journal of Nanomaterials* 2012, 1-9, 2012.
- [23] Bhardwaj, Nandana, and Subhas C. Kundu. "Electrospinning: A fascinating fiber fabrication technique." *Biotechnology advances* 28, 3, 325-347, 2010.
- [24] He, Ji-Huan, Yu-Qin Wan, and Jian-Yong Yu. "Effect of concentration on electrospun polyacrylonitrile (PAN) nanofibers." *Fibers and Polymers* 9, 140-142, 2008.
- [25] Meechaisue, Chidchanok, et al. "Electrospun mat of tyrosine-derived polycarbonate fibers for potential use as tissue scaffolding material." *Journal of Biomaterials Science, Polymer Edition* 17.9, 1039-1056, 2006.
- [26] Fong, Hao, Iksoo Chun, and Darrel H. Reneker. "Beaded nanofibers formed during electrospinning." *Polymer* 40, 16, 4585-4592. 1999.
- [27] Lin, Tong, ed. *Nanofibers: Production, properties and functional applications*. BoD–Books on Demand, 2011.
- [28] Ramesh Kumar, P., et al. "Nanofibers: effective generation by electrospinning and their applications." *Journal of nanoscience and nanotechnology* 12.1 1-25, 2012.