

مطالعه شکل شناسی نانوالیاف پلی آمید ۶ الکترورسی شده با استفاده از جت تکنازلی و دونازلی دوسویه

A Morphology Study of PA 6 Electrospun Nanofibers Using a Single Nozzle and Two-Single Double Sided Nozzles

مهسا خواص، محیا زائرالحسینی، محمد علی توانایی^{*}، ابوالفضل محمودی

یزد، دانشگاه یزد، مجتمع فنی و مهندسی، دانشکده مهندسی نساجی، صندوق پستی ۷۴۱-۸۹۱۹۵

چکیده

در این پژوهش، اثر متغیرهای ولتاژ، فاصله بین سوزن و جمع کننده و غلظت محلول پلیمری در فرایند الکترورسی نانوالیاف پلی آمید ۶ به روش تکنازلی مطالعه شد. سپس، براساس بهترین شرایط الکترورسی تعیین شده، شکل شناسی (اندازه قطر و یکنواختی قطر) وب نانوالیاف تولید شده به دو روش تکنازلی و دونازلی دو سویه بررسی شد. نتایج نشان داد، متغیر غلظت محلول الکترورسی مؤثرترین متغیر مؤثر بر قطر نانوالیاف است. با کاهش غلظت محلول الکترورسی، میانگین قطر نانوالیاف کاهش می یابد. از مقایسه نمونه های الکترورسی شده دونازلی دو سویه با نمونه الکترورسی شده تکنازلی مشابه آن ملاحظه شد، میانگین قطر نانوالیاف تولید شده حاصل از فرایند الکترورسی دونازلی دوسویه یکنواختی بیشتری دارد. بنابراین، روشی مناسب برای تولید نانوالیاف با مقادیر بیشتر در مدت زمان تولید کمتر نسبت به الکترورسی تکنازلی است.

مقدمه

دیگر به زمین یا به جمع کننده رسانا متصل می شود. با عبور محلول از درون لوله موئین، در اثر میدان الکتریکی حاصل از منبع تغذیه با ولتاژ زیاد بین نوک لوله موئین و جمع کننده متصل به زمین، سیال باردار شده و از نوک لوله موئین به سمت جمع کننده کشیده می شود. در اثر حرکت سیال، حلال تبخیر شده و رشته هایی با قطر کمتر از میکرون روی جمع کننده تولید می شود. در اثر برهم کنش نیروهای الکتریکی، بار سطحی جریان سیال، نیروی گرانش و کشسان و نیز کشش سطحی، حرکت مارپیچی به سیال باردار القا شده و بر اثر آن نانوالیاف تولیدی به شکل لایه به هم پیوسته یا بی بافت تولید می شوند [۲،۳]. فاصله بین نوک نازل تا هدف را فاصله کاری یا فاصله

تولید نانوالیاف، زمینه پژوهشی رو به رشدی در سرتاسر جهان است که در دهه اخیر، اهمیت بسیار زیادی یافته است. الکترورسی محلول های پلیمری برای تولید نانوالیاف به دلیل ساده و ارزان بودن توجه زیادی را طی سال های اخیر به خود جلب کرده است. الکترورسی و به عبارتی استفاده از نیروی برق برای ریسندگی یکی از روش های مهم و گسترده برای تولید نانوالیاف است [۱]. در روش الکترورسی از یک منبع تغذیه با ولتاژ زیاد برای تولید بار الکتریکی در جریان محلول یا مذاب پلیمری استفاده می شود. برای تولید نانوالیاف، یکی از الکترودهای منبع تغذیه با ولتاژ زیاد به محلول پلیمری و الکترو

کلمات کلیدی

الکترورسی،
جت تکنازلی،
جت دونازلی دوسویه،
شکل شناسی،
نانوالیاف

*مستول مکاتبات، پیام نگار: ma.tavanaie@yazduni.ac.ir

تجربی

مواد

در این پژوهش، از گرانول پلی‌آمید ۶ ساخت شرکت الیاف تهران با گرانروی نسبی تقریبی ۲/۳ و اندازه گرانول ۲×۲ mm به‌عنوان پلیمر استفاده شد. همچنین، از فرمیک اسید ۹۹٪ با نام MERK به‌عنوان حلال در تولید نانوالیاف استفاده شد.

دستگاه‌ها

دستگاه الکتروریسی ساخت شرکت ایرانی نانوازا با قابلیت ریسندگی نانوالیاف دوسویه به‌کار گرفته شد. از میکروسکوپ الکترونی پویشی مدل TESCAN VEGA ساخت جمهوری چک، برای بررسی شکل‌شناسی نانوالیاف پس از پوشش‌دهی با لایه نازکی از طلا استفاده شد. برای به‌دست آوردن قطر نانوالیاف از تصاویر با بزرگنمایی ۱۰،۰۰۰ برابر از لایه نانوالیاف استفاده شد.

روش‌ها

برای بررسی اثر هر یک از پارامترها روی شکل‌شناسی نانوالیاف حاصل از پلی‌آمید ۶ در سه دسته بررسی پارامتر ولتاژ، فاصله بین سرنگ رشته‌ساز و جمع‌کننده، غلظت محلول پلیمر ریسندگی بررسی شد. ابتدا محلول‌های پلیمری در محدوده ۲۰-۳۰ درصد وزنی-حجمی با افزودن مقدار لازم از گرانول به ۱۰ mL حلال و قرار دادن آن‌ها روی همزن مغناطیسی به مدت ۱ h در دمای محیط تهیه شدند تا محلول همگنی حاصل شود.

برای تولید نانوالیاف از دستگاه الکتروریسی با سرعت چرخش ۴۰۰ rpm و سرعت تغذیه ۰/۱ mL استفاده شد. فرایند الکتروریسی در دما و رطوبت محیط انجام شد. برای انجام فرایند الکتروریسی از سرنگ پلاستیکی با حجم ۵ mL با گیج ۱۸ استفاده شدند. سرنگ آماده شده درون پمپ دستگاه قرار گرفت. روی سطح جمع‌کننده ورقه نازک آلومینیمی قرار داده و نانوالیاف تولیدی روی آن جمع‌آوری شد. پلیمرهای حاصل در دو فرایند تک‌نازلی به مدت ۱ h و دونازلی به مدت ۳۰ min با دستگاه الکتروریسی به نانوالیاف تبدیل شد. در بررسی متغیر ولتاژ و غلظت محلول پلیمری، فاصله تعیین شده بین نازل و جمع‌کننده ۷ cm، همچنین در بررسی متغیر ولتاژ و فاصله غلظت محلول ۲۰ mol/L تعیین شد. ولتاژ ۱/۷۸ kV/cm نیز برای بررسی متغیر فاصله و غلظت تعیین شد. برای تعیین قطر هر نمونه از سه تصویر به‌دست آمده از میکروسکوپ

جدول ۱- تحلیل آماری داده‌های متغیر ولتاژ.

فرایند	تصویر	میانگین (nm)	ولتاژ (kV/cm)	انحراف معیار	ضریب تغییرات
تک‌نازلی	الف	۱/۷۸	۱۳۴/۱	۲۸/۹۴	۲۱/۵۹
	ب	۲/۸۵	۱۵۷/۷۲	۱۷/۲۷	۱۰/۹۴
دونازلی	ج	۱/۷۸	۱۲۵/۷۴	۱۸/۲۸	۱۴/۵۳
	د	۲/۸۵	۱۵۲/۱۱	۱۶/۱۱	۱۰/۵۹

الکتروریسی می‌نامند که تنظیم این فاصله نقش مهمی را در تولید الیاف دارد. تغییرات فاصله بین نوک نازل و جمع‌کننده اثر مستقیم روی زمان پرواز و نیز روی نیروی میدان الکتریکی دارد. اثر فاصله ریسندگی بر قدرت میدان الکتریکی، تبخیر و جامدشدن نانوالیاف است. برای شکل‌گیری الیاف مجزا از هم برای بیشتر حلال‌ها باید به جریان شتاب‌دار محلول الکتروریسی فرصت داده شود تا حلال آن تبخیر شود [۲].

میدان الکتریکی استفاده شده برای الکتروریسی ولتاژ از نوع مستقیم است. در روش الکتروریسی از ولتاژ زیاد در محدوده ۵۰-۵ kV برای باردار کردن محلول پلیمری و تولید نانوالیاف استفاده می‌شود. در اثر اعمال ولتاژ محلول پلیمری باردار شده (بار مشابه) و تمایل به دفع یکدیگر دارند. در نتیجه در سطح زیادی پراکنده می‌شوند و به سوی جمع‌کننده که بار مخالف محلول را دارد، کشیده شده و الیاف تشکیل می‌شوند. مقدار پتانسیل اعمالی باید مناسب باشد تا کارایی جمع‌شدن الیاف در جمع‌کننده را بهبود دهد [۴].

برای تولید نانوالیاف به روش معمول الکتروریسی، پارامترهای مختلف فرایند (ولتاژ و جریان محلول) محیطی (دما و رطوبت محیط) و محلول (رسانایی و گرانروی) بر یکنواختی و قطر نانوالیاف اثرگذار است که هدف، ایجاد شرایطی با یکنواختی زیاد و قطر کم است [۵،۶].

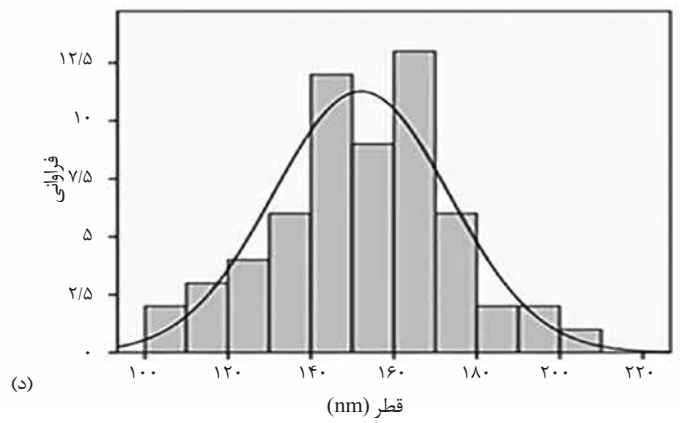
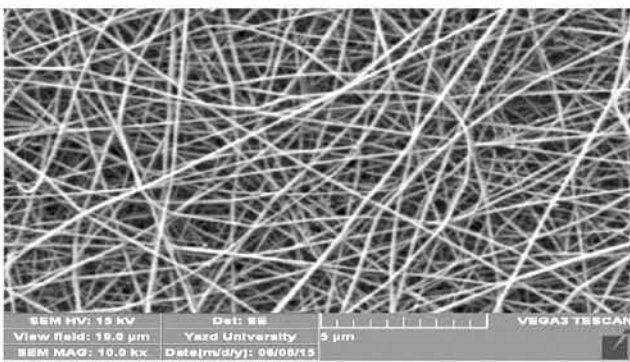
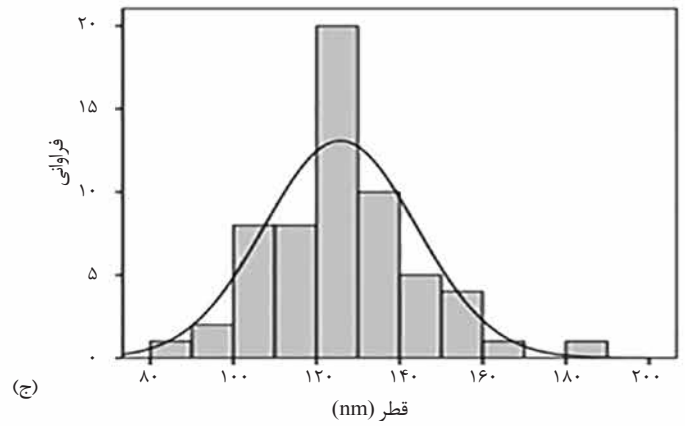
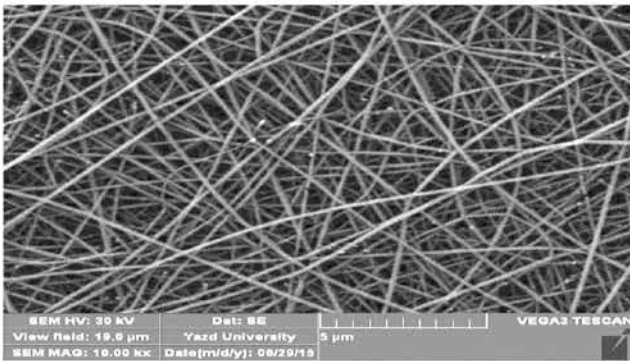
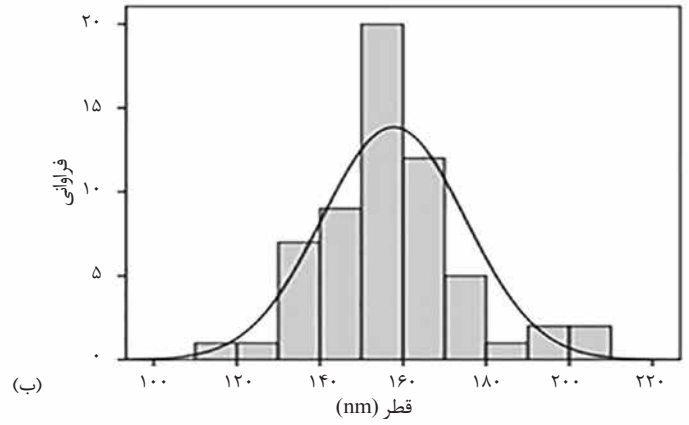
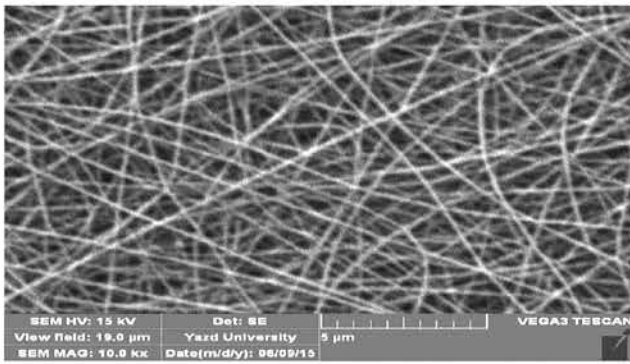
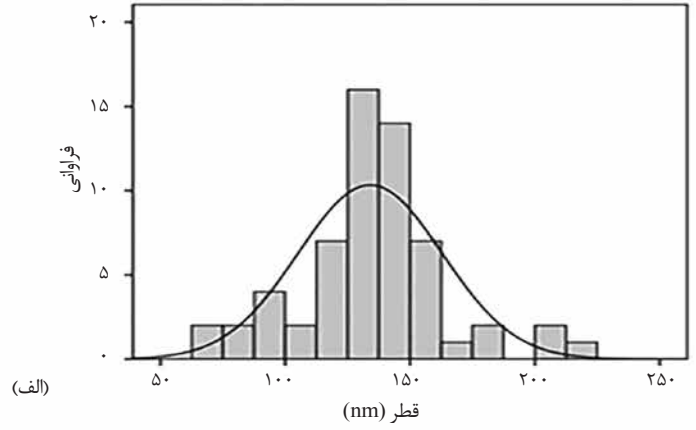
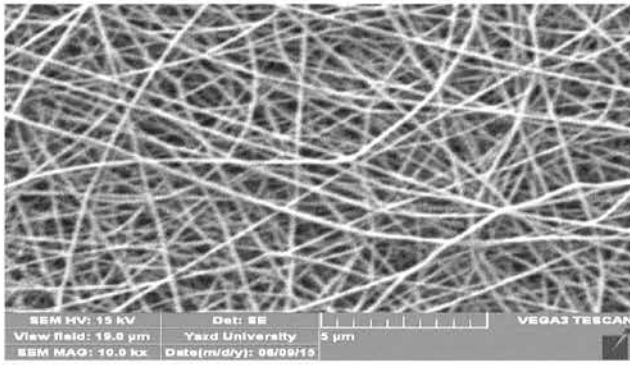
از آنجا که الکتروریسی به‌عنوان بهترین روش تولید نانوالیاف تاکنون شناخته شده است، لازم است تولید نانوالیاف با این روش و نیز نحوه آرایش‌یافتگی آن‌ها در وب ایجاد شده به نحوی اصلاح و کنترل شود. در حقیقت، هنوز مشکلاتی درباره روش الکتروریسی برای تولید نانوالیاف وجود دارد. بدین منظور، روش‌های مختلف الکتروریسی جدید برای حل چنین مشکلاتی به‌کار گرفته شده است. با به‌دست آوردن وب الکتروریسی شده با آرایش‌یافتگی کنترل شده می‌توان قابلیت کاربرد این نانوالیاف را افزایش داد. پیچیدگی فرایند الکتروریسی و تعداد زیاد پارامترهایی که بر آن اثر می‌گذارند، باعث شده تا طرح مدلی بسیط و جامع از الکتروریسی به‌عنوان چالشی مطرح شود [۷].

استفاده از سامانه الکتروریسی چندنازلی می‌تواند به افزایش سرعت تولید کمک کند. همچنین، این سامانه‌ها را می‌توان برای ساختن کامپوزیت‌های نانولیفی چندجزئی از نظر نوع پلیمر به‌کار برد [۸].

یکی از نکات شایان توجه در سامانه‌های الکتروریسی چندنازلی، بیان فیزیکی دقیق اثر متقابل جت بر جت است که برای افزایش سرعت تولید لایه‌های لیفی الکتروریسی ضروری است. در پژوهش‌های انجام شده بر سامانه چندنازلی الکتروریسی، اثر متقابل جت بر جت از لحاظ نظری و تجربی بررسی شده است.

در سامانه چندنازلی، نه تنها میدان الکتریکی داخلی استفاده شده و نیروی کلمبی مسیر جت را تحت تأثیر قرار می‌دهند، اثرهای متقابل دوطرفی کلمبی بین جت‌های مختلف موجود نیز اثرگذارند و جت‌ها یکدیگر را به‌واسطه این نیرو می‌رانند [۹].

در این پژوهش، اثر متغیرهای ولتاژ، فاصله بین سوزن و جمع‌کننده و غلظت محلول پلیمری در فرایند الکتروریسی به روش تک‌نازلی و دونازلی مطالعه شد. سپس، شکل‌شناسی وب نانوالیاف تولید شده (اندازه قطر و یکنواختی قطر) برای انتخاب روشی مناسب و کارآمد مقایسه شد.



شکل ۱- تصاویر SEM از نانوالیاف الکتروپرسی شده تک‌نازلی با ولتاژهای: (الف) ۱/۷۸ kV/cm، (ب) ۲/۸۵ kV/cm و دونازلی با ولتاژ (ج) ۱/۷۸ kV/cm و (د) ۲/۸۵ kV/cm و جدول‌های توزیع فراوانی نانوالیاف.

جدول ۲- بررسی آماری داده‌های متغیر ولتاژ.

فرایند	تصویر	ولتاژ (kV/cm)	ضریب نرمال	کشیدگی	چولگی
تک‌نازلی	الف	۱/۷۸	۰/۱۶	۱/۱۷۰	۱/۱۷۰
	ب	۲/۸۵	۰/۵۱۸	۱/۲۲۲	۰/۴۵۶
دونازلی	ج	۱/۷۸	۰/۴	۱/۵	۰/۶۶۳
	د	۲/۸۵	۰/۹۵	-۰/۸	-۰/۶۱

جدول ۳- تحلیل آماری داده‌های متغیر فاصله.

فرایند	تصویر	متغیر فاصله (cm)	میانگین (nm)	انحراف معیار	ضریب تغییرات
تک‌نازلی	الف	۷	۱۵۷/۸۴	۱۷/۱۱۹۴	۱۰/۸۴
	ب	۱۳	۱۴۰/۹۹	۲۲/۵۳۸۶	۱۵/۹۷
	ج	۱۵	۱۳۳/۴۶	۲۴/۳۹۰۲	۱۸/۲۷
دونازلی	د	۷	۱۵۲/۱۱	۱۶/۱۲	۱۰/۵۹
	ه	۱۳	۱۱۸/۵	۱۵/۶۳	۱۳/۱۸
	و	۱۵	۱۰۵/۹۱	۱۵/۱	۱۴/۱۷

الکترونی استفاده و در مجموع میانگین ۶۰ قطر اندازه‌گیری شد. پس از اندازه‌گیری قطر ۶۰ لیف مختلف میانگین، انحراف معیار و ضریب تغییرات قطرها نیز محاسبه شد. همچنین، با نرم‌افزار نمودارهای خطی تغییرات میانگین قطر و نمودار خطی تغییرات C.V. رسم شد. برای بررسی شکل‌شناسی نانوالیاف تولیدی از چند آزمون آماری استفاده شد که می‌توان به رسم نمودار نرمال، تعیین چولگی و کشیدگی نمودار نرمال و تعیین نرمال بودن داده با استفاده از آزمون کولموگروف-اسمیرنوف اشاره کرد.

نتایج و بحث

در این بخش نتایج در خصوص متغیر ولتاژ، فاصله بین سرنگ رشته‌ساز و جمع‌کننده و غلظت محلول پلیمر ریسندگی در الکتروریسی تک‌نازلی و دونازلی دو سوپه ارائه شده است.

اثر متغیر ولتاژ

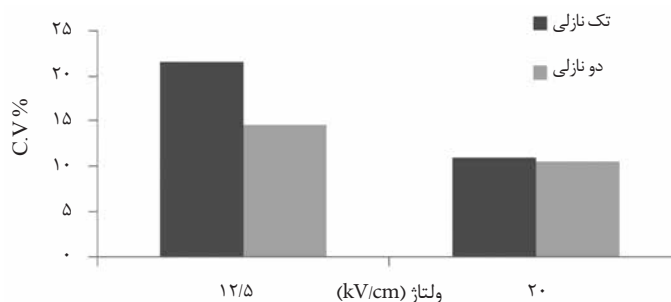
در جدول ۱ تحلیل آماری داده‌های ولتاژ آمده است. داده‌های این جدول نشان می‌دهد، با افزایش ولتاژ از ۱/۷۸ kV/cm به ۲/۸۵ kV/cm قطر متوسط لیاف افزایش می‌یابد. از آنجا که هم ولتاژ اعمال شده و هم میدان الکتریکی حاصل از آن، روی کشش و شتاب جریان شتاب‌دار محلول اثر دارد، هر دوی آن‌ها روی شکل‌شناسی لیاف به‌دست‌آمده نیز اثر دارند. با افزایش ولتاژ سرعت سیال زیاد شده و زمان رسیدن سیال از سرسوزن به جمع‌کننده کم می‌شود. در نتیجه، زمان لازم برای کشش فراهم نمی‌شود. در ولتاژ کمتر کاهش شتاب جریان محلول الکتروریسی و میدان الکتریکی ضعیف‌تر، زمان لازم برای پرواز جت الکتروریسی به منظور شکل‌گیری لیاف ظریف‌تر را فراهم می‌کند. با توجه به شکل ۱ در ولتاژ کم هر چند

زمان پرواز زیاد است، ولی میدان الکتریکی ایجاد شده قدرت کافی برای کشش کامل نانوالیاف را ندارد و الیافی با ناپیکناختی بیشتر ایجاد می‌شود. در بازه افزایش ولتاژ استفاده شده در این پژوهش، با افزایش ولتاژ یکنواختی لیاف بهبود می‌یابد، زیرا میدان الکتریکی ایجاد شده قدرت کافی برای کشش نانوالیاف را دارد و الیافی آرایش یافته با یکنواختی خوب تولید می‌شود. در نتیجه، با توجه به شکل ۳ با افزایش ولتاژ از ۱/۷۸ kV/cm به ۲/۸۵ kV/cm، C.V. به کمترین مقدار می‌رسد که این بیانگر کمترین یکنواختی در ولتاژ ۱/۷۸ kV/cm و بیشترین یکنواختی در ولتاژ ۲/۸۵ kV/cm است.

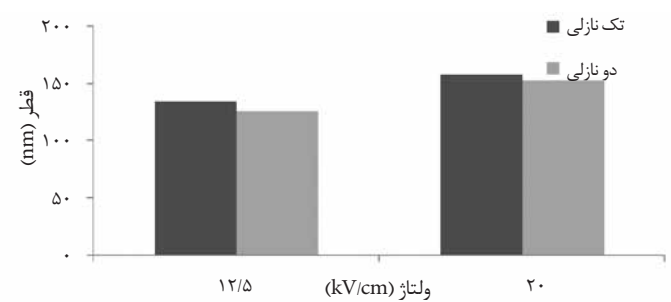
برای تعیین نرمال بودن نمودارهای توزیع فراوانی در جدول ۲ از آزمون تعیین مقدار چولگی و کشیدگی در نرم‌افزار SPSS استفاده شده است. در این آزمون اگر مقدار چولگی و کشیدگی در بازه ۲ و ۲- قرار گیرد، نمودار توزیع فراوانی، نرمال است. با توجه به شکل ۱ مقدار چولگی و کشیدگی به‌دست آمده از داده‌های پارامتر ولتاژ تمام مقادیر به‌دست آمده در بازه مزبور قرار دارد، در نتیجه نمودارهای توزیع فراوانی رسم شده نرمال است. پس از بررسی عادی یا نرمال بودن کشیدگی یا چولگی توزیع داده‌ها، از آزمون کولموگروف-اسمیرنوف استفاده شد تا از نرمال بودن داده‌ها اطمینان حاصل شود.

اگر ضریب به‌دست آمده از این آزمون بیشتر از ۰/۵ باشد، می‌توان داده‌ها را با اطمینان زیاد نرمال فرض کرد. در غیر این صورت نمی‌توان. در این پژوهش با بررسی شکل‌شناسی نانوالیاف در دو فرایند تک‌نازلی و دونازلی تفاوت‌هایی مشاهده شد که به دلیل پیچیدگی میدان الکتروریسی دونازلی به بررسی بیشتر و دقیق‌تر نیاز دارد که در این پژوهش میسر نبود.

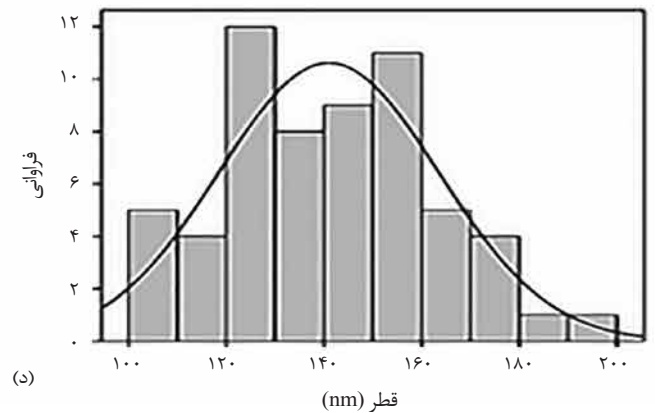
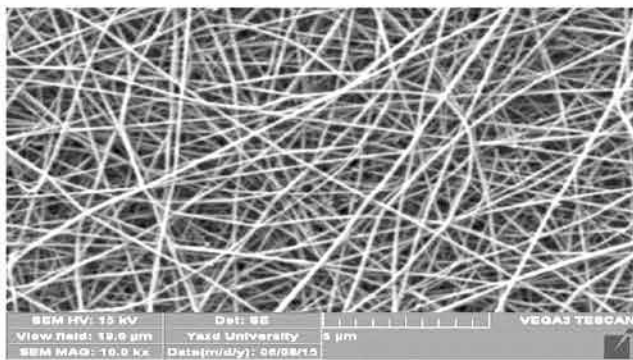
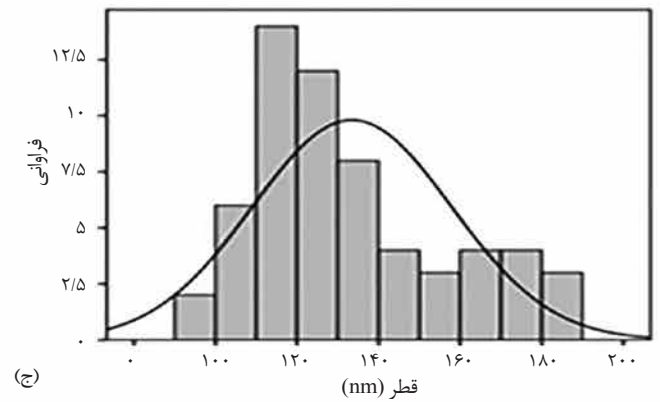
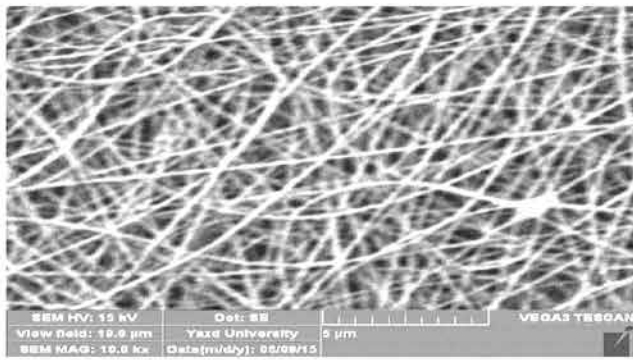
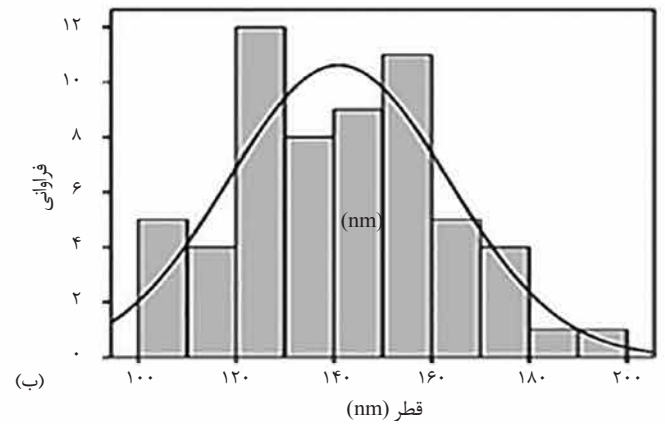
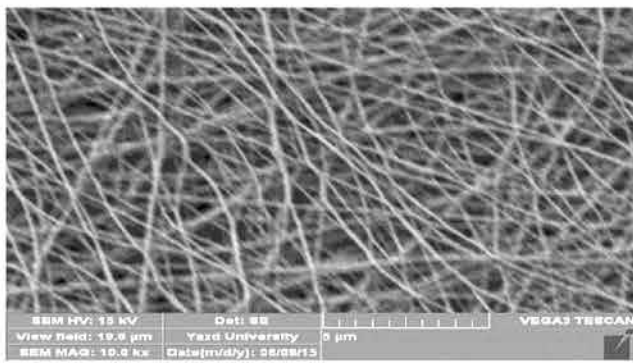
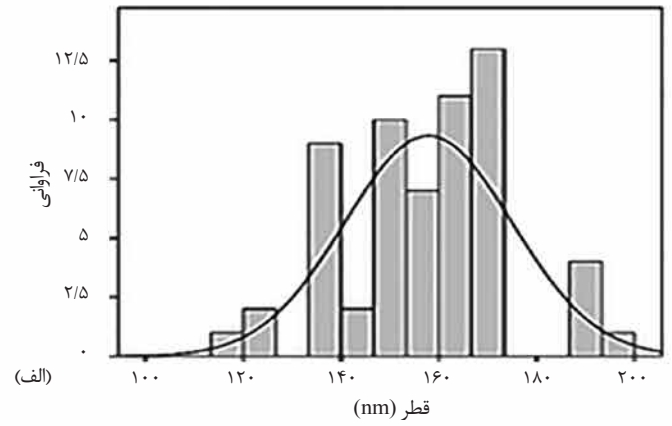
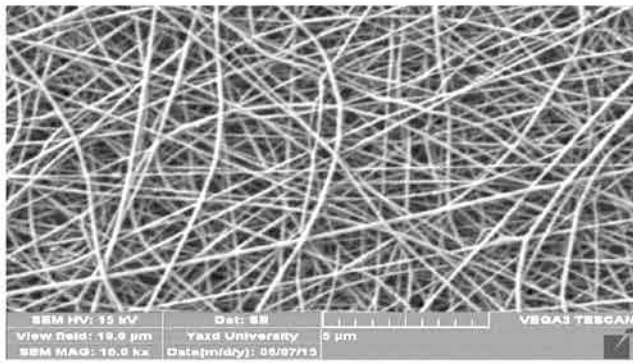
فاصله بین سرنگ و رشته‌ساز در جدول ۳ تحلیل آماری داده‌های

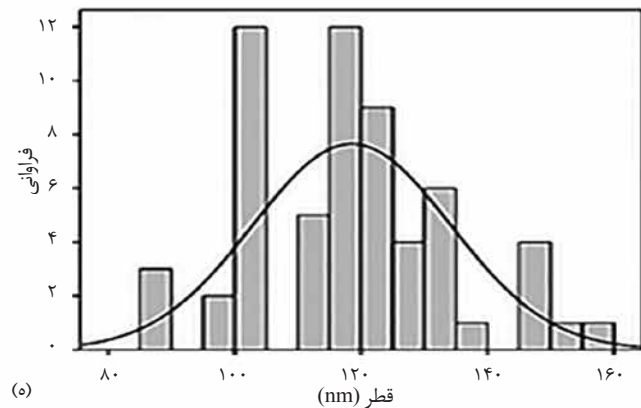
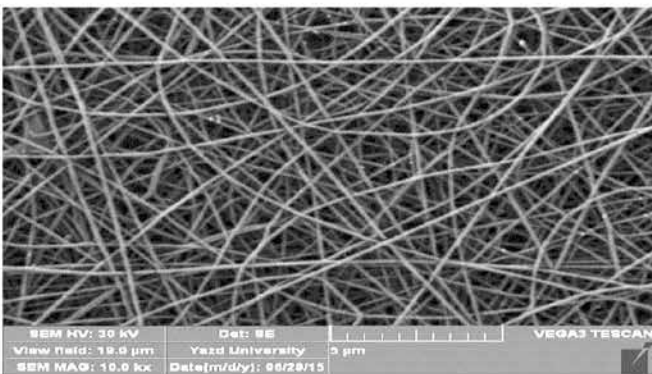
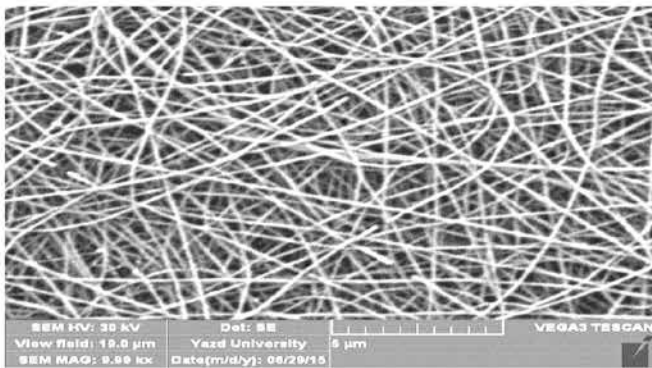


شکل ۳- ضریب تغییرات نمونه‌های تک‌نازلی و دونازلی دوسوپه.

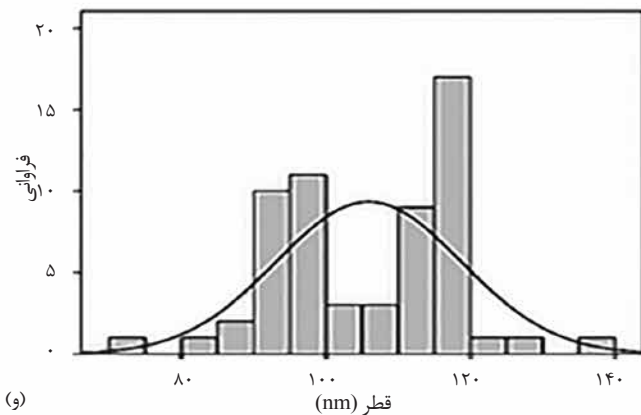


شکل ۲- تغییرات قطر نمونه‌های تک‌نازلی و دونازلی دو سوپه.





(e)



(g)

شکل ۴- تصاویر SEM از نانوالیاف الکتروسیسی شده تک‌نازلی با فاصله: (الف) ۷ cm، (ب) ۱۳ cm، (ج) ۱۵ cm و دونازلی با فاصله (د) ۷ cm، (ه) ۱۳ cm و (و) ۱۵ cm و جدول‌های توزیع فراوانی نانوالیاف.

در جدول ۴ نتایج آزمون‌های کولموگروف-اسمیرنوف و مقدار چولگی و کشیدگی نمودار نرمال داده‌ها آمده است. با توجه مقدار چولگی و کشیدگی به‌دست آمده از داده‌های پارامتر فاصله کلیه مقادیر به‌دست آمده در بازه مزبور قرار دارد، در نتیجه با توجه به شکل ۴، نمودارهای توزیع فراوانی رسم شده نرمال است، همچنین در نتیجه بررسی آزمون کولموگروف-اسمیرنوف تمام داده‌ها نیز دارای توزیع نرمال است.

در این پژوهش، با بررسی شکل‌شناسی نانوالیاف در دو فرایند تک‌نازلی و دونازلی تفاوت‌هایی مشاهده شد که به دلیل پیچیدگی میدان الکتروسیسی دونازلی به بررسی بیشتر و دقیق‌تر نیاز دارد که در

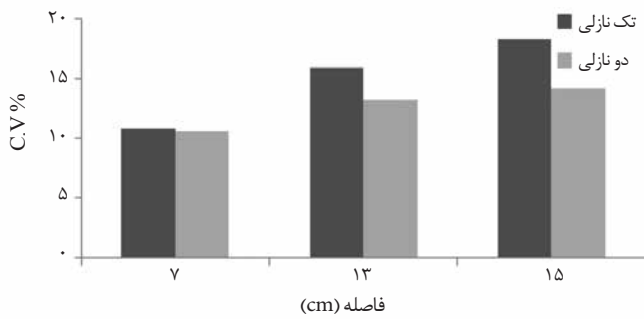
فاصله آمده است. با توجه به جدول ۳ و شکل ۵، افزایش فاصله به کاهش قطر میانگین لیف منجر می‌شود. فاصله بیشتر به این معناست که زمان پرواز بیشتری برای محلول پیش از اینکه به روی جمع‌کننده ته‌نشین شود و در نتیجه زمان بیشتری برای کشیده شدن وجود دارد. با توجه به شکل ۶، با افزایش فاصله از ۷ cm به ۱۵ cm، C.V.٪ به بیشترین مقدار می‌رسد که این بیانگر کمترین یکنواختی در فاصله ۱۵ cm و بیشترین یکنواختی در فاصله ۷ cm است. افزایش فاصله دو الکتروود مثبت و منفی رشته‌ساز تا برداشت‌کننده سبب کاهش قدرت میدان الکتروستاتیکی و کاهش یکنواختی قطر الیاف می‌شود.

جدول ۴- بررسی آماری داده‌های متغیر فاصله.

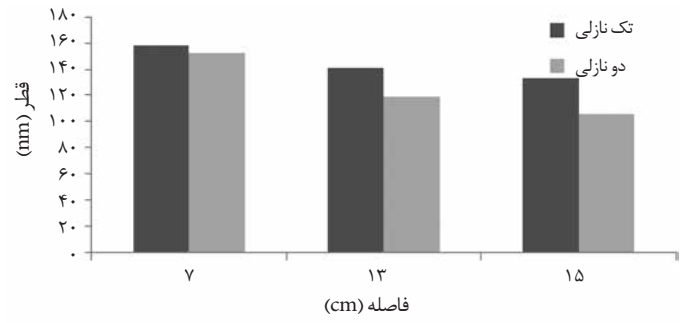
فرایند	تصویر	متغیر فاصله (cm)	ضریب نرمال	کشیدگی	چولگی
تک‌نازلی	الف	۷	۰/۲۹	۰/۲۷	-۰/۲۲
	ب	۱۳	۰/۷۸	-۰/۴۴	-۰/۲۲۷
	ج	۱۵	۰/۲۶	-۰/۴۰	-۰/۷۹۰
دونازلی	د	۷	۰/۹۵۱	-۰/۸	-۰/۶۱
	ه	۱۳	۰/۵۶	-۰/۷	-۰/۳۴۵
	و	۱۵	۰/۶۰۹	-۰/۴۵۱	-۰/۲۶۸

جدول ۵- تحلیل آماری داده‌های متغیر غلظت محلول پلیمر ریسندگی.

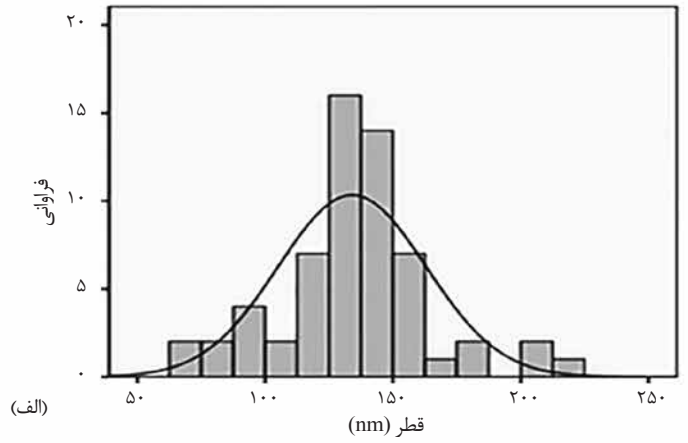
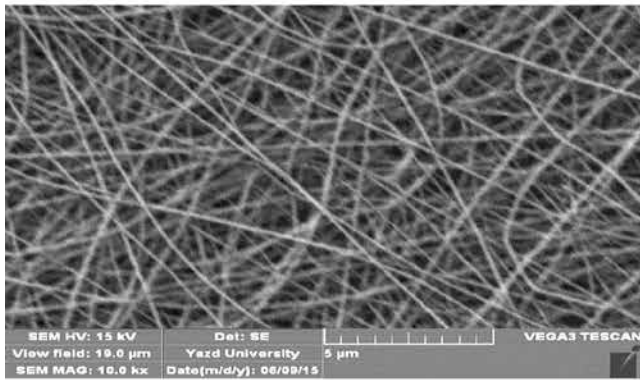
فرایند	تصویر	غلظت (%wt/v)	میانگین (nm)	انحراف معیار	ضریب تغییرات
تک‌نازلی	الف	۲۰	۱۵۷/۳۴	۱۷/۵۲	۱۱/۱۳
	ب	۳۰	۱۷۲/۱۹	۲۳/۹۲	۱۳/۸۹
دونازلی	ج	۲۰	۱۵۲/۱۱	۱۶/۱۱	۱۰/۵۹
	د	۳۰	۱۶۵/۳۴	۲۲/۱۵	۱۳/۳۱



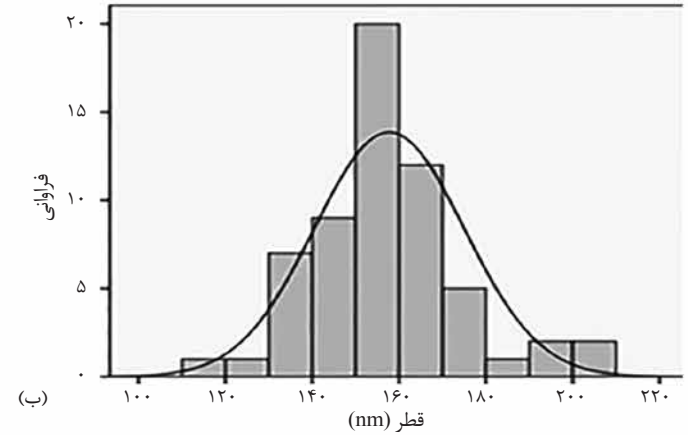
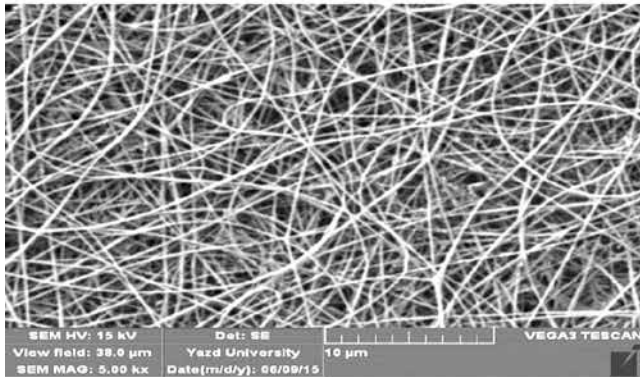
شکل ۶- بررسی ضریب تغییرات نمونه‌های تک‌نازلی و دونازلی.



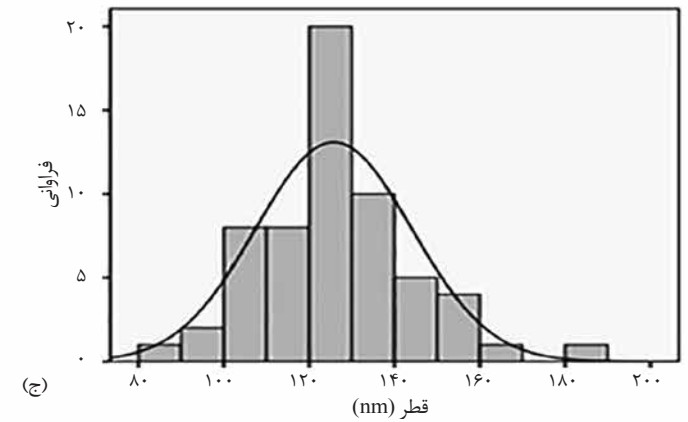
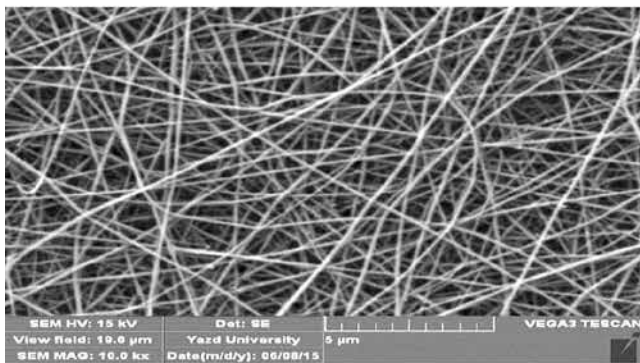
شکل ۵ - تغییرات قطر نمونه‌های تک‌نازلی و دونازلی.



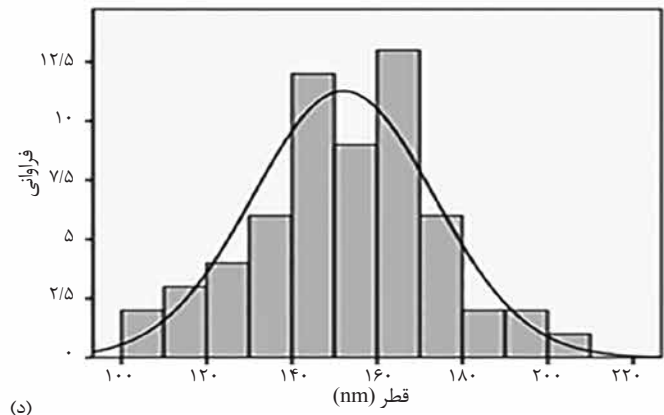
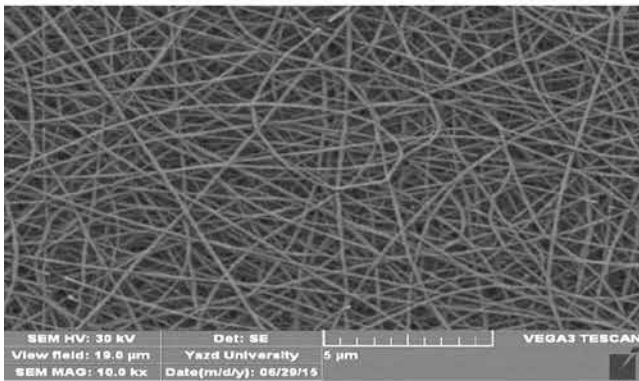
(الف)



(ب)



(ج)

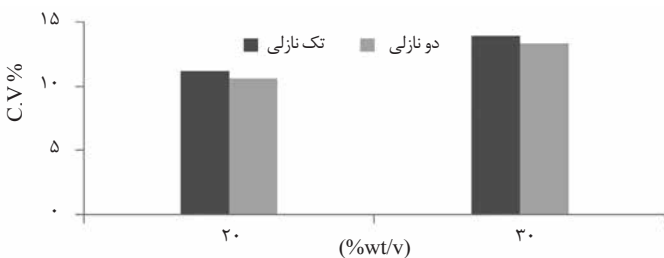


(د)

شکل ۷- تصاویر SEM از نانوالیاف الکتروریسی شده تک‌نازلی با غلظت: (الف) ۲۰٪ وزنی-حجمی، (ب) ۳۰٪ وزنی-حجمی و دو نازلی با غلظت: (ج) ۲۰٪ وزنی-حجمی و (د) ۳۰٪ وزنی-حجمی و جدول‌های توزیع فراوانی نانوالیاف.



شکل ۸- تغییرات قطر نمونه‌های تک‌نازلی و دو نازلی.



شکل ۹- ضریب تغییرات نمونه‌های تک‌نازلی و دو نازلی.

برای بررسی نرمال بودن داده‌ها، از آزمون کولموگروف-اسمیرنوف استفاده می‌شود تا از نرمال بودن داده‌ها اطمینان حاصل شود. در نتیجه با بررسی ضرایب به‌دست آمده در جدول ۶ تمام داده‌ها دارای توزیع نرمال است. در این پژوهش، با بررسی شکل‌شناسی نانوالیاف در دو فرایند تک‌نازلی و دو نازلی تفاوت‌هایی مشاهده شد که به دلیل پیچیدگی میدان الکتروریسی دو نازلی به بررسی بیشتر و دقیق‌تر نیاز دارد که در این پژوهش میسر نبود.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، اثر پارامترهای ولتاژ، فاصله بین سوزن و جمع‌کننده و غلظت محلول پلیمر ریسندگی روی شکل‌شناسی نانوالیاف تولید شده

این پژوهش میسر نبود.

متغیر غلظت محلول پلیمر ریسندگی

در جدول ۵ تحلیل آماری داده‌های غلظت محلول پلیمر ریسندگی آمده است. با توجه به جدول ۵ با افزایش غلظت، قطر نیز افزایش می‌یابد. با توجه به شکل ۸، در غلظت کم گرانیروی محلول کمتر بوده و حرکت زنجیره‌های پلیمری آسان‌تر است. از این رو، هنگامی که در میدان الکتریکی اعمالی قرار می‌گیرند، قابلیت حرکت راحت‌تری داشته و زیر کشش بیشتری قرار می‌گیرند که کشش باعث تولید الیاف با قطر کمتر می‌شود. اما، با افزایش غلظت گرانیروی محلول افزایش یافته از این رو با قرار گرفتن در میدان الکتریکی اعمالی قابلیت حرکت زنجیره‌ها سخت‌تر شده و زمان کمتری زیر کشش قرار می‌گیرد. در نتیجه، نانوالیاف با قطر بیشتر تشکیل می‌شود. با توجه به شکل ۹ با افزایش غلظت از ۲۰٪ وزنی-حجمی به غلظت ۳۰٪ وزنی-حجمی C.V.% افزایش می‌یابد که این بیانگر کمترین یکنواختی در غلظت ۳۰٪ وزنی-حجمی و بیشترین یکنواختی در غلظت ۲۰٪ وزنی-حجمی است. در غلظت زیاد سهم زنجیر پلیمری در محلول زیاد است. در نتیجه، حلال سریع‌تر تبخیر شده و نانوالیاف پیش از فرصت کافی برای کشش جامد می‌شوند و زمان لازم برای یکنواختی را پیدا نمی‌کنند.

برای تعیین نرمال بودن نمودارهای توزیع فراوانی شکل ۷ از آزمون تعیین مقدار چولگی و کشیدگی استفاده شده است. با توجه مقدار چولگی و کشیدگی به‌دست آمده از داده‌های پارامتر غلظت، نمودارهای توزیع فراوانی رسم شده نرمال است.

جدول ۶- بررسی آماری داده‌های متغیر غلظت محلول پلیمر ریسندگی.

فرایند	تصویر	غلظت (%wt/v)	ضریب نرمال	کشیدگی	چولگی
تک‌نازلی	الف	۲۰	۰/۶۴	-۰/۶۷۴	-۰/۳۰۱
	ب	۳۰	۰/۴۲	-۰/۲۷۲	-۰/۴۹۷
دو نازلی	ج	۲۰	۰/۹۵	-۰/۱۸	-۰/۶۱
	د	۳۰	۰/۸۸	۰/۹۸	۰/۳۱۳

گونه‌ای که بزرگ‌ترین قطر، در بین نمونه‌های متغیر غلظت مشاهده شد. به‌طور کلی با افزایش غلظت، میانگین قطر نانوالیاف افزایش می‌یابد. از مقایسه نمونه‌های الکترورسی شده دونازلی با نمونه الکترورسی شده تک‌نازلی مشابه آن ملاحظه شد، میانگین قطر نانوالیاف تولیدی یکنواختی بیشتری دارد که می‌تواند به‌عنوان روشی مناسب برای تولید نانوالیاف با مدت زمان تولید کمتر نسبت به الکترورسی تک‌نازلی پیشنهاد شود.

با دو روش الکترورسی تک‌نازلی و دونازلی دو سویه بررسی شد. با توجه نتایج می‌توان پی‌برد، از میان نمونه‌ها با افزایش ولتاژ یکنواختی نانوالیاف افزایش می‌یابد.

همچنین، با افزایش فاصله بین سوزن و جمع‌کننده، میانگین قطر نانوالیاف افزایش و یکنواختی نانوالیاف نیز کاهش می‌یابد. پارامتر غلظت، یکی از مؤثرترین پارامترها روی قطر نانوالیاف تولیدی مشاهده شد. به

مراجع

1. Kadomae Y., Amagasa M., Sugimoto M., Taniguchi T., and Koyama K., Effect of electric current on beads formation in electrospinning of poly(vinyl alcohol), *Int. Polym. Proce.*, 23, 377-384, 2008.
2. Merati A. and Dadgar M., *An Introduction to Electrospinning and Nanofibers*, 2005.
3. Bhardwaj N. and Kundu S.C., Electrospinning: A fascinating fiber fabrication technique, *Biotechnol. Adv.*, 28, 325-347, 2010.
4. Doshi J. and Reneker D.H., Electrospinning process and applications of electrospun fibers, *J. Electrostat.*, 35, 151-160, 1995.
5. Kilic A., Oruc F., and Dmir A., Effects of polarity on electrospinning process, *Text. Res. J.*, 78, 532-539, 2008.
6. Li Y., Huang Zh., and Lu Y., Electrospinning of nylon-6, b 66, 1010 terpolymer, *Eur. Polym. J.*, 42, 1696-1704, 2006.
7. Ren Z.F., Liu B. Z., Liu G.Q., Kang Y.X., Fan H.Y., and Li H.M., Effect of magnetic force on stability of the electrospinning process, *J. Text. Inst.*, 101, 571-574, 2010.
8. Gupta P. and Wilkes GL., Some Investigation on the Fiber formation by utilizing a side-by-side bicomponent electrospinning, *Polymer*, 44, 6353-6359, 2003.
9. Theron S.A., Multiple jets in electrospinning, experiment and modeling, *Polymer*, 46, 2889-2899, 2005.

A Morphology Study of PA 6 Electrospun Nanofibers Using a Single Nozzle and Two-Single Double Sided Nozzles

Mahsa Khavas, Mahya Zaerhosseini, Mohammadali Tavanaie*, and Abolfazl Mahmoudi

Department of Textile Engineering, Faculty of Engineering, University of Yazd, P.O. Box: 89195-741, Yazd, Iran

Abstract

In this research, the effects of important parameters (i.e., voltage, distance between nozzle and collector and polymer solution concentration) on the electrospinning of PA 6 nanofibers were studied. Under the optimized conditions of electrospinning, the morphology of electrospun nanofibrous web (i.e., fiber diameter and its uniformity) using a single nozzle or two-single double sided nozzles were investigated. The results showed that the most effective parameter on the diameter of nanofibers was the polymer solution concentration. The average fiber diameter decreased with decreasing the polymer solution concentration. The average fiber diameter of the webs produced with two-single double sided nozzles was more uniform. Therefore, this electrospinning method is recommended when higher production output is required in a shorter period of time.

Keywords

electrospinning,
single nozzle,
double sided nozzles,
morphology,
nanofibers

(*) Address Correspondence to M. Tavanaie, Email: ma.tavanaie@yazduni.ac.ir