

تأثیر پارامترهای کلیدی در فرایند الکتروریسی نانو الیاف نایلون ۶ بر روی متوسط قطر الیاف و جریان الکتریکی

شمیم زرغام^{۱*}، سعید بازگیر^۲، ابوسعید رشیدی^۳، امیر توکلی^۳

۱- دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران، گروه مهندسی نساجی، تهران، ایران

۲- دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران، گروه مهندسی پلیمر، تهران، ایران

۳- دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران، گروه مهندسی شیمی، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۸۹/۰۷/۲۵ تاریخ پذیرش: ۸۹/۱۱/۲۰

چکیده

در این مقاله جهت بررسی تأثیر پارامترهای کلیدی از جمله غلظت، ولتاژ الکتریکی، فاصله و دبی بر روی جریان الکتریکی در فرآیند الکتروریسی، همچنین به دست آوردن رابطه جریان با پارامترهای ذکر شده و قطر الیاف، از غلظت های مختلف و در محدوده ۲۵-۱۰ درصد وزنی- حجمی نایلون در اسید فرمیک استفاده شد. همچنین به منظور دسترسی به قطر بهینه، آزمایشاتی در دو بخش اصلی صورت گرفت که می توان بخش اول را مربوط به بررسی روند تغییر متغیرها و بخش دوم را به بهینه سازی شرایط فرآیندی جهت حصول به الیافی با حداقل قطر، مربوط دانست. در تمامی آزمایشات از آمپرسنج، جهت بررسی جریان الکتریکی در مدت زمان ۱۲ دقیقه ریسنجی و میکروسکوپ الکترونی پویشی^۱، جهت بررسی مورفولوژی و قطر الیاف استفاده گردید. نتایج حاکی از آن بود که جریان الکتریکی با غلظت محلول پلیمری و ولتاژ الکتریکی رابطه مستقیم و با فاصله سوزن تا جمع کننده رابطه معکوس دارد؛ در حالی که دبی اثر متفاوتی را از خود بر جای می گذارد. در طول آزمایشات، جریان الکتریکی در فواصل زمانی مختلف، متغیر بود. در حالی که در نمونه بهینه که مورفولوژی آن نیز توسط دستگاه SEM مورد بررسی قرار گرفته بود، جریان به طور کاملاً یکنواخت و پایدار در آمده بود.

۱- مقدمه

مثبت منبع ولتاژ بالا، قطره کروی در سر لوله موئین پس از غلبه بر نیروهای کشش سطحی و تنش برشی سیال، تغییر شکل داده و به مخروط تیلور تبدیل می شود و پس از گذر از محدوده ولتاژ بحرانی، جریان پلیمری از سر مخروط تیلور آغاز شده و جت ریسنجی مسیر مستقیمی را می پیماید [۲]. در ولتاژهای بالاتر از ولتاژ بحرانی، جت الکتروریسی در اثر نیروی کشش سطحی پاره شده و تبدیل به قطراتی می شود، به طوری که شدت این پارگی، به شدت جریان الکتریکی اعمالی بستگی دارد. در حقیقت هر چه شدت این جریان بیشتر باشد احتمال پارگی جت و شکل گیری قطرات کمتر می گردد [۳]. پس از عبور از ناحیه پایدار، رشد ناپایداری های خمشی آغاز شده و در نهایت، جریان سیال مسیر مارپیچی را طی می کند. در روش الکتروریسی از ولتاژ بالا در

با کاهش قطر الیاف پلیمری از میکرومتر به نانومتر، خواص منحصر به فردی همچون نسبت سطح به حجم بسیار بالا، انعطاف پذیری در سطح عملکردی، تخلخل بالا و خواص مکانیکی عالی به الیاف بخشیده می شود، به طوری که گستره کاربردی آنها را وسیع تر می گرداند. تاکنون روش های متعددی برای تولید الیاف نانومتری در نظر گرفته شده که از میان آنها روش الکتروریسی علاوه بر سادگی، از بازده بیشتری نیز برخوردار است. در این روش الیاف نانومتری از طریق اعمال بارهای الکتریکی حاصل می شوند [۱]. مطابق بررسی های صورت گرفته، جریان سیال پلیمری در میدان الکتریکی از سه بخش اصلی تشکیل شده است؛ به طوری که در لحظه شروع فرآیند، پس از باردار شدن سیال پلیمری توسط قطب

کلمات کلیدی

الکتروریسنجی،
قطر نانو الیاف،
جریان الکتریکی

1- Scannig Electra Microscope (SEM)

*مسئول مکاتبات، پیام نگار: sh.zargham@gmail.com

پوشی مدل (LEO440i, England) مورد مطالعه قرار گرفت.

۲-۲- ریسندگی الیاف نانو

جهت انجام فرآیند الکتروریسی از یک سرنگ پلاستیکی با حجم ۵۰ میلی لیتر و سوزن با قطر داخلی ۰/۵۸۴ میلی متر استفاده شد. پس از پر نمودن سرنگ از محلول پلیمری نایلون ۶ با درصد های مختلف و در محدوده ۲۵-۱۰ درصد وزنی- حجمی، جهت تزریق یکنواخت محلول از یک پمپ سرنگ با مدل (Top5300-Tokyo-Japan) استفاده شد. جهت اعمال ولتاژ نیز از یک منبع تغذیه ولتاژ بالا و در محدوده ولتاژ ۲۵-۱۰ کیلو ولت با مدل (Gamma ES-60P, 60Kv, 0/085A, USA) استفاده شد؛ به طوری که قطب مثبت آن به سوزن فلزی جهت باردار کردن محلول پلیمری متصل گردید. جهت اندازه گیری جریان الکتریکی نیز از یک میکرو آمپرسنج با جریان DC در طول فرآیند استفاده شد، به طوری که قطب منفی میکرو آمپرسنج به قطب منفی ولتاژ بالا و قطب مثبت آن به جمع کننده ای ثابت و از جنس آلومینیوم متصل گردید. جهت بررسی تاثیر جریان الکتریکی بر روی ولتاژ الکتریکی، غلظت محلول پلیمری، فاصله، دبی و در نهایت قطر و مورفولوژی لیف حاصله، از یک روش ساده ماتریسی در طراحی آزمایشات استفاده گردید. در این روش پس از بررسی روند تغییر متغیرها و تاثیر پارامترها بر روی قطر الیاف، اندازه گیری جریان الکتریکی در هر مرحله و با بررسی گام به گام پارامترها، به بهینه سازی شرایط فرآیندی پرداخته تا ضمن حصول شرایط بهینه به بررسی تاثیر جریان الکتریکی در میزان یکنواختی قطر و مورفولوژی حاصله نیز، پرداخته باشیم. در این راستا و در تمامی آزمایشات، مورفولوژی لیف حاصله به کمک SEM مورد مطالعه قرار گرفت. در این پژوهش جریان های الکتریکی در هر مرحله، در مدت زمان ۱۲ دقیقه ریسندگی در فواصل منظم یادداشت و پس از میانگین گیری، مقادیر متوسط اعلام شدند.

۳- بحث و نتیجه گیری

۳-۱- بررسی تاثیر پارامترهای کلیدی بر روی جریان الکتریکی و قطر نانو الیاف

۳-۱-۱- تاثیر غلظت محلول پلیمری

همانگونه که در نمودار شکل ۱ مشاهده می شود، با افزایش غلظت محلول نایلون در محدوده ۱۰ تا ۲۵ درصد وزنی- حجمی، متوسط قطر الیاف و جریان الکتریکی دچار افزایش شده اند. افزایش قطر نانو الیاف با افزایش غلظت ناشی از افزایش گره خوردگی های فیزیکی زنجیره های پلیمری می باشد [۸]. گره خوردگی های فیزیکی زنجیره ها در محلول و افزایش آنها با افزایش غلظت، منجر به افزایش ویسکوزیته محلول شده که به تبع آن مقاومت محلول در مقابل نیروی کششی حاصله از بارهای موجود در داخل جریان نیز، افزایش یافته و در نهایت به افزایش قطر می انجامد. این افزایش در تطابق کامل با گزارشات ارائه شده توسط Deitzel و همکارانش می باشد [۸]. از طرف دیگر در نتیجه افزایش قطر نانو الیاف و با توجه به رابطه ۱، میزان بار بیشتری در واحد زمان از سطح لیف عبور خواهد کرد که منجر به افزایش جریان در یک ولتاژ ثابت می گردد [۱۹]. در این رابطه، I : جریان الکتریکی، t : شعاع جت ریسندگی، E : میدان الکتریکی مصرفی، σ : دانسیته بار سطحی و u : سرعت می باشند.

محدوده ۵۰-۵ کیلو ولت جهت باردار کردن محلول پلیمری و تولید نانو الیاف پلیمری با قطری در محدوده ۵۰۰-۵۰ نانومتر استفاده می شود [۴]. ویژگی متمایز موجود در این الیاف سبب می شود تا نانو الیاف پلیمری به عنوان مواد مناسبی در زمینه های مختلف صنعتی استفاده شوند که از آن جمله می توان به کاربرد این الیاف در ساخت نانو کامپوزیت های پلیمری، صنایع فیلتراسیون، نظامی و پزشکی اشاره نمود. قطر نانو الیاف به پارامترهای مختلفی مانند غلظت محلول پلیمری، ولتاژ الکتریکی اعمال شده، فاصله سر سوزن تا جمع کننده، دبی جریان، قطر سوزن، جریان الکتریکی نوع جمع کننده بستگی دارد [۱۳-۱۲]. در میان پارامترهای مطرح شده، جریان الکتریکی به عنوان یک پارامتر کلیدی و تاثیر گذار بر روی قطر الیاف تولیدی، طول جت (از سر قطره آویزان تا شروع ناپایداری های خمشی)، خواص سطحی و استحکام مکانیکی شناخته شده است [۱۴، ۷]. از آنجایی که تحقیقات موجود در راستای شناخت هر چه بیشتر فرآیند الکتروریسی اندک بوده است، این طور استنباط می شود که در این فرآیند، جریان الکتریکی تنها در اثر القای بارهای یونی در محلول پلیمری به وجود می آید که به دلیل کوچک بودن، قابل چشم پوشی است [۱۵]. در حالی که بر طبق مطالعات Huan و همکارانش [۱۲، ۱۰]، جریان عبوری در جت الکتروریسی از مجموع جریان های همرفتی و جریان های القایی حاصل می گردد.

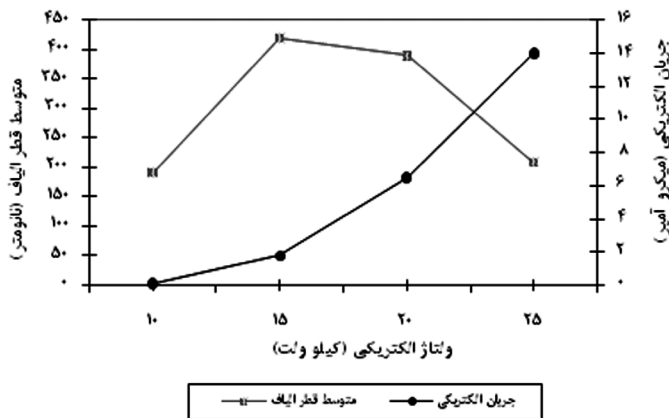
همچنین جریان الکتریکی با ولتاژ، فاصله، دبی و دیگر پارامترها در رابطه است. به طوری که میان جریان و ولتاژ الکتریکی و نیز جریان و دبی رابطه ای وجود دارد [۱۰]. در حال حاضر و در راستای شناخت ماهیت جریان الکتریکی و دسترسی به رابطه بین ولتاژ و جریان، مطالعات جدیدی آغاز شده و در حال انجام است که نخستین بار توسط Fernandez de la Mora و همکارانش [۱۶] مورد بررسی قرار گرفت. در این بررسی ثابت شد که ولتاژ و جریان دو پارامتر مجزا بوده و نقش هر کدام در فرآیند الکتروریسی بارز و در خور توجه است. در این رابطه Ganan-Calvo و همکارانش [۱۸، ۱۷] نیز نظری مشابه دارند. با توجه به اینکه تاکنون مطالعات صورت گرفته در این زمینه بیشتر معطوف به محاسبات تئوری و شناخت ماهیت جریان الکتریکی در فرآیند الکتروریسی بوده و تاکنون جنبه عملیاتی پیدا نکرده است، لذا در این پژوهش سعی بر آن شده تا با انجام آزمایشهای متعدد به بررسی تاثیر جریان الکتریکی بر چهار فاکتور کلیدی و تاثیر گذار در فرآیند الکتروریسی از جمله ولتاژ، غلظت محلول پلیمری، فاصله سوزن تا جمع کننده و دبی جریان پرداخته شود. همچنین تاثیر جریان الکتریکی بر روی قطر، مورفولوژی و یکنواختی نانو الیاف حاصله، همزمان با تغییر دیگر پارامترها از دیگر مواردی بود که مورد بررسی قرار گرفت.

۲- تجربیات

۲-۱- مواد و تجهیزات

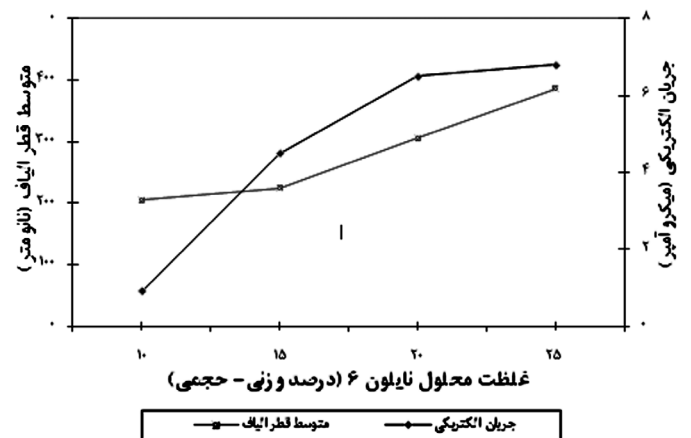
در این پژوهش از گرانول پلی آمید ۶ با نام نیران B و وزن مولکولی Mw: 12,000 g/mol، گرید الیاف ساخت شرکت الیاف تهران و اسید فرمیک ۹۹٪ مرک به عنوان حلال استفاده شد. محلول های همگن با غلظت های مختلف با استفاده از یک همزن مغناطیسی، در یک سیستم کاملاً بسته و در دمای جوش حلال تهیه شدند. جریان های الکتریکی نیز توسط آمپرسنجی در فواصل مختلف و در بازه زمانی ۱۲ دقیقه اندازه گیری شدند. مورفولوژی الیاف پس از پوشش دهی توسط لایه نازکی از طلا با میکروسکوپ الکترونی

مشاهده می شود، با افزایش ولتاژ تا ۱۵ کیلوولت، قطر متوسط الیاف افزایش و پس از آن کاهش می یابد. حال آنکه با افزایش ولتاژ، جریان الکتریکی کماکان افزایش می یابد. بدیهی است که با افزایش ولتاژ، به دلیل افزایش تعداد بارهای همنام، مقدار جریان بیشتری از واحد سطح در واحد زمان عبور نموده و چگالی سطحی بار افزایش می یابد. گفتنی است که افزایش جریان با افزایش ولتاژ، در تطابق کامل با مشاهدات Yu-Qin Wan و همکارانش می باشد [۱۱].



شکل ۲- نمودار تأثیر ولتاژ بر جریان الکتریکی و قطر الیاف با غلظت ۲۰ درصد وزنی - حجمی، فاصله ۱۰cm، دبی ۰/۱ml/hr و سوزن با قطر داخلی ۰/۵۸۴mm

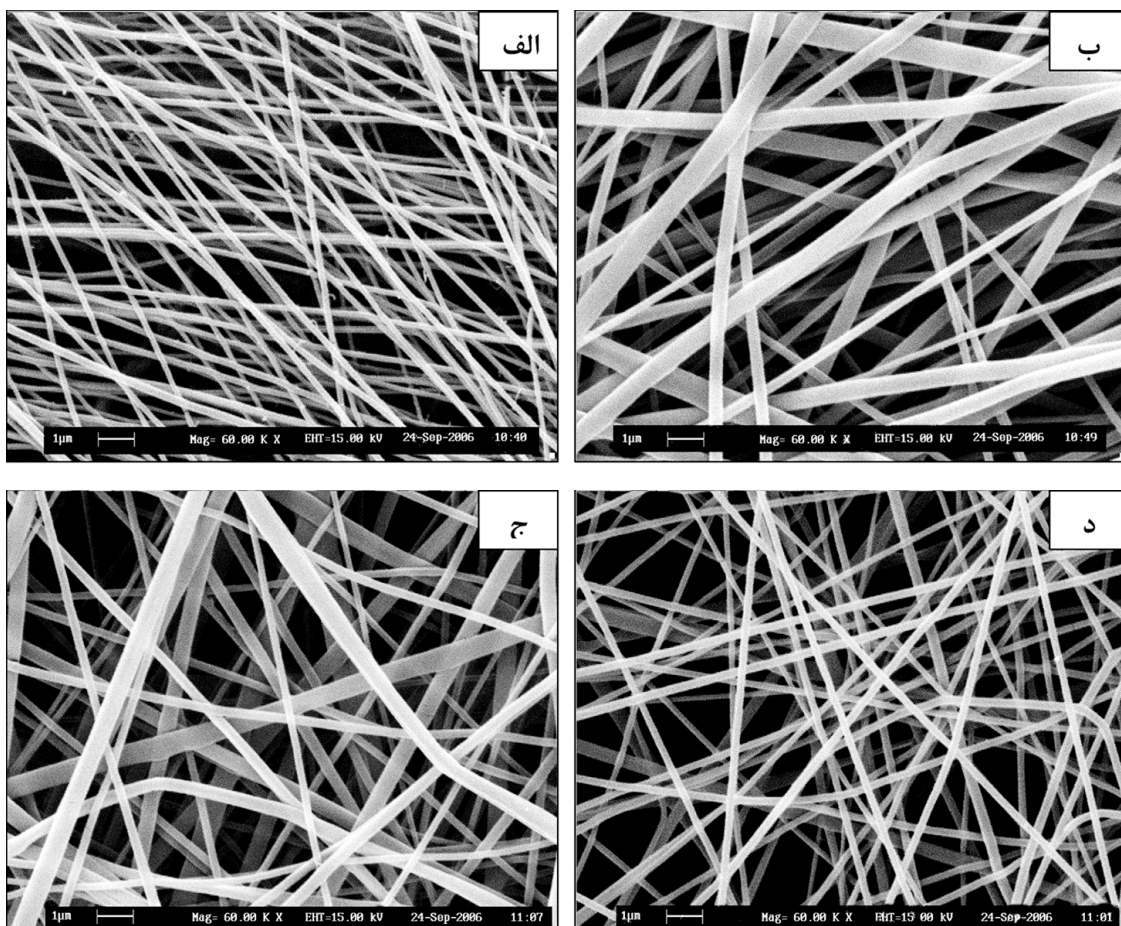
$$I = \pi r^2 KE + 2\pi r \sigma u \quad (1)$$



شکل ۱- نمودار تأثیر غلظت بر جریان الکتریکی و قطر الیاف با ولتاژ ۲۰ kv، فاصله ۱۰ cm و دبی ۰/۱ml/hr

۳-۱-۲- تأثیر ولتاژ الکتریکی

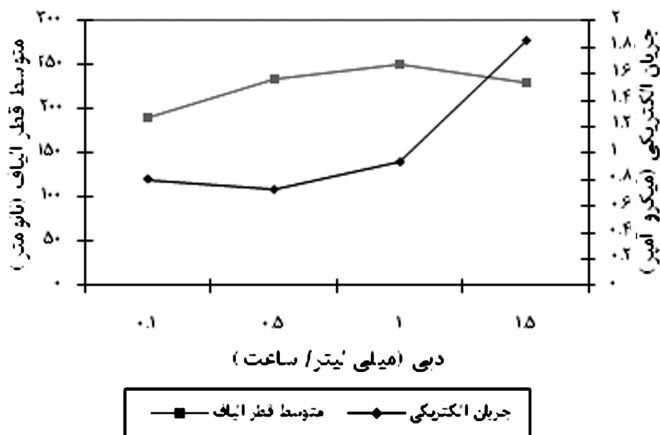
جهت بررسی تأثیر ولتاژ بر مورفولوژی و جریان الکتریکی از محلول ۲۰ درصد وزنی - حجمی نایلون ۶ در اسید فرمیک در ولتاژهای مختلف استفاده شد. ولتاژ الکتریکی یکی از پارامترهای بسیار موثر و تأثیرگذار در فرایند الکترویسندگی نانو الیاف می باشد. همانگونه که در نمودار شکل ۲ و تصاویر SEM شکل ۳



شکل ۳- تصاویر میکروسکوپ الکترونی نانو الیاف نایلون در ولتاژهای مختلف با سوزن قطر ۰/۵۸۴mm (الف) ولتاژ ۱۰Kv (ب) ولتاژ ۱۵Kv (ج) ولتاژ ۲۰Kv (د) ولتاژ ۲۵Kv

۳-۱-۴- تأثیر دبی جریان

همانطور که در نمودارهای شکل ۵ مشاهده می شود، با افزایش دبی تا ۱ ml/hr، قطر متوسط الیاف افزایش و پس از آن کاهش یافته است، حال آنکه با افزایش دبی، جریان الکتریکی از یک روند ثابت تبعیت نمی کند.



شکل ۵- نمودار تأثیر دبی بر جریان الکتریکی و قطر الیاف با غلظت ۲۰ درصد وزنی - حجمی، ولتاژ ۲۰ kv و فاصله ۱۵ cm

در حقیقت، با افزایش نرخ تغذیه حجم خروجی افزایش یافته در حالی که ولتاژ مقدار ثابتی است. ولی پس از آن در دبی ۱/۵ ml/hr به دلیل زیاد شدن ریزش قطرات رسیده نشده در اثر افزایش حجم حلال خروجی از سرسوزن، از مقدار محلولی که صرف تولید الیاف می گردد کم شده و در نتیجه قطر متوسط الیاف کاهش می یابد. نتایج حاصله از مشاهدات تجربی که در بالا بدان اشاره شد با گزارشات ارائه شده توسط Ramakrishna و همکارانش [۲]، در خصوص اثر میزان دبی بر قطر الیاف مطابقت دارد. در مورد تأثیر دبی بر جریان نیز، کاملاً مشهود است که دبی بر روی یکنواختی جریان و پایداری فرایند الکتروریسی تأثیر قابل ملاحظه ای نگذاشته است. از سوی دیگر در دبی های بالا به دلیل افزایش میزان حجم محلول خروجی از سرسوزن، به تعداد قطره پراکنی ها اضافه می شود. در واقع با ریزش هر قطره مقدار زیادی سیال از سرسوزن کنده شده و مخروطی که پس از آن تشکیل می شود در ابتدا کوچک بوده و به تدریج رشد می کند که همین مسئله باعث بروز نایکنواختی در تغییرات جریان می شود. تصاویر SEM نشان داده شده در شکل ۶ دلیلی بر این مدعا است.

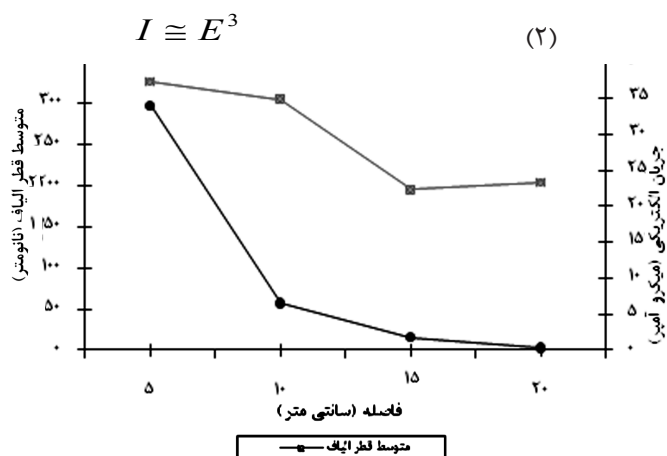
۴-۱-۴- دسترسی به لایه بهینه

در اثر این تکرار، لایه ای از نانو الیاف با قطر متوسط ۹۲ nm تولید شد که در تصاویر SEM شکل ۷ به همراه نمودار توزیع فراوانی قطر آن ارائه شده است. همانطور که مشاهده می شود، محدوده تغییر قطر در این نمونه بسیار ناچیز است. به طوری که می توان ادعا نمود جریان بسیار پایدار بوده و محلول پلیمری به یک اندازه تحت کشش قرار گرفته است. در این راستا و جهت به دست آوردن قطر بهینه، از غلظت ۱۷/۵ درصد وزنی - حجمی، ولتاژ ۲۰ kv، فاصله سرسوزن تا جمع کننده ۱۸ cm، دبی ۰/۱ ml/hr و قطر داخلی سوزن ۲۰ mm استفاده گردید. نمودار شکل ۸ نیز تاییدی بر این ادعا است که در آن جریان الکتریکی در بازه زمانی ۱۲ دقیقه ای کاملاً یکنواخت و به مقدار ۰/۳ میلی آمپر می باشد.

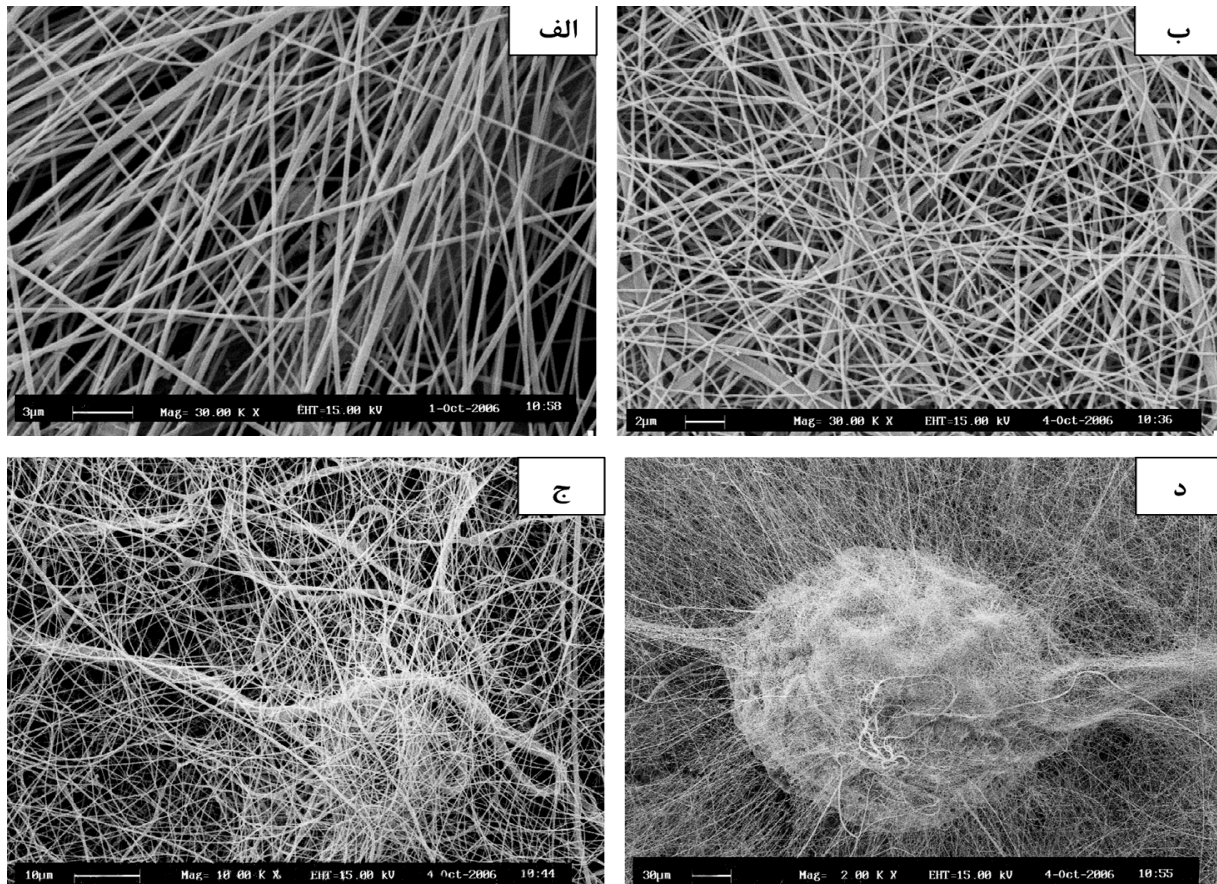
از آنجایی که با افزایش ولتاژ، سرعت سیال زیاد شده و زمان رسیدن سیال از سرسوزن به جمع کننده کم می شود، انتظار داریم قطر الیاف افزایش یابد. از طرف دیگر، به نظر می رسد که این موضوع باید با افزایش ولتاژ کماکان ادامه داشته باشد. در حالی که با افزایش ولتاژ از ۱۵ کیلوولت تا ۲۵ کیلوولت، قطر الیاف کاهش یافته است. کاهش قطر الیاف با افزایش ولتاژ در این محدوده را می توان ناشی از تقابل نیروهای کششی، نیروهای برشی در دیواره سوزن و همچنین آرایش یافتگی جت در اثر بارهای همانام دانست. در نتیجه نیروهای مخالف حرکت سیال در مقابل نیروی محرکه ناشی از اختلاف پتانسیل اهمیت یافته و اثر خود را نشان می دهند، چنین رفتاری در مشاهدات Jagannathan نیز دیده شده است [۲۰]. از سوی دیگر، در سوزن با قطر داخلی ۰/۵۸۴ میلی متر، اندازه قطره شکل گرفته در انتهای سوزن به اندازه ای بزرگ می شود که ولتاژ اعمالی قدرت کافی را جهت انتقال کامل محلول به سمت صفحه جمع کننده ندارد. با افزایش تدریجی ولتاژ، قطر قطره کاهش یافته چرا که بارهای اعمالی در این حالت افزایش و در نهایت قطر مخروط تیلور کمتر و الیاف کوچکتری شکل می گیرند. بنابراین با افزایش ولتاژ تا حدی قطر الیاف افزایش و سپس با کاهش حجم قطره، کاهش می یابد.

۳-۱-۳- تأثیر فاصله سرسوزن تا جمع کننده

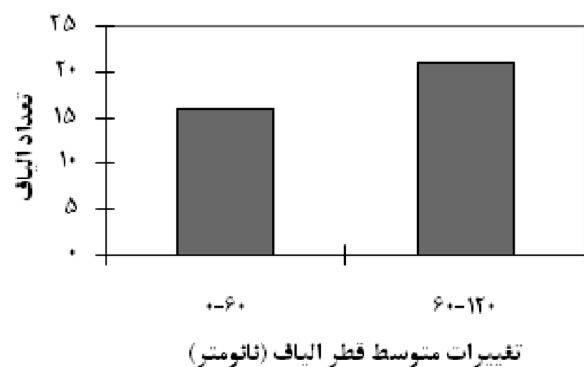
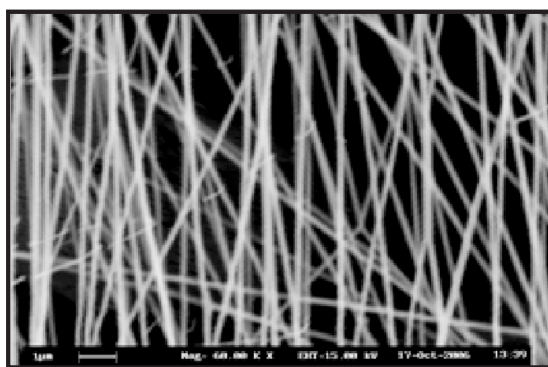
همانطور که در نمودار شکل ۴ مشاهده می شود، با افزایش فاصله بین سوزن و جمع کننده، جریان الکتریکی و قطر متوسط الیاف کاهش یافته است. در اثر افزایش فاصله، جت مسیر بیشتری را تا رسیدن به جمع کننده می پیماید و در نتیجه این عمل، الیاف در طول مسیر، بیشتر دچار کشیدگی می شوند. همچنین با افزایش فاصله، شدت میدان الکتریکی کمتر شده و در نتیجه آن، سرعت جت به سمت جمع کننده کاهش می یابد. بنابراین مدت زمان پرواز افزایش و در نهایت به کاهش قطر می انجامد اما چنانچه این فاصله بیش از اندازه زیاد باشد، به دلیل ضعیف شدن میدان الکتریکی و کشیدگی کمتر، قطر متوسط الیاف به جای کاهش، روند افزایشی از خود نشان داده که در فاصله ۲۰ سانتی متری شاهد این افزایش هستیم [۲]. از آنجا که با افزایش فاصله شدت میدان ضعیف تر می شود، جریان الکتریکی نیز کاهش می یابد که این مشاهده در تطابق کامل با رابطه ۲ می باشد [۱۲]. در این رابطه، I: جریان الکتریکی و E: میدان الکتریکی مصرفی می باشند.



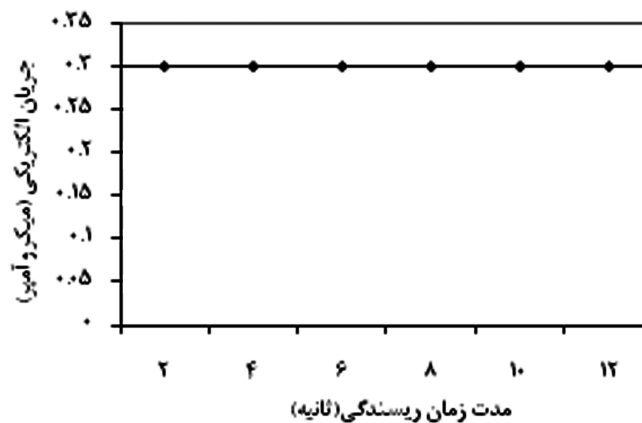
شکل ۴- نمودار اثر فاصله بر جریان الکتریکی و قطر الیاف با غلظت ۲۰ درصد وزنی - حجمی، ولتاژ ۲۰ kv و دبی ۰/۱ ml/hr



شکل ۶- تصاویر میکروسکوپ الکترونی نانو الیاف نایلون در دبی های مختلف. الف) دبی ۰/۱ ml/hr، ب) دبی ۰/۵ ml/hr، ج) دبی ۱ ml/hr، د) دبی ۱/۵ ml/h



شکل ۷- تصویر میکروسکوپ الکترونی به همراه نمودار توزیع فراوانی قطر الیاف در نانو الیاف نایلون ۶



شکل ۸- نمودار جریان الکتریکی در لایه بهینه در زمانهای مختلف ریسندگی

phology of electrospun nanofibers and textiles, Polym, 42, 261-272, 2001.

[9] J. Macossay, A. Marruffo, R. Rincon, T. Eubanks. A. Kuang, Effect of needle diameter on nanofiber diameter and thermal properties of electrospun poly (methyl methacrylate) , Polym. Adv. Technol, 18, 180-183, 2007.

[10] Ji. H. Hea, Yu. Q. Wanc, Ji. Y. Yuc, Scaling law in electrospinning: relationship between electric current and solution flow rate, Polym, 46, 2799-2801, 2005.

[11] Yu. Q. Wan, Hu. He. Ji, Ji. Y. Yu, Experimental Verification of Scaling Law between Current and Applied Voltage in Electrospinning, Iranian Polym.J, 15, 265-268, 2006.

[12] Ji. H. Hea, Yu. Q. Wanc, Allometric scaling for voltage and current in electrospinning, Polym, 45, 6731-6734, 2004.

[13] Ji. H. Hea, Yu. Q. Wanc, The effect of electric current on the processing of nanofibers formed from poly(2-acrylamido-2 methyl-1 propane sulfonic acid), Polym, 45, 6731-6734, 2004.

[14] M. M. Demir, I. Yilgor, E. Yilgor, B. Erman, Electrospinning of polyurethane fibers, Polym, 43, 3303-3309, 2002.

[15] D. H. Reneker, A.L. Yariu, H. Fong, S. Koombhongse, The influence of added ionic salt on nanofiber uniformity for electrospinning of electrolyte polymer, J Appl Phys, 87, 4531-4547, 2000.

[16] J. J. Fernandez de la Mora, The effect of charge emission from electrified liquid cones Fluid, Mech 243, 561-574, 1992.

[17] M. J. Ganan-Calvo, On the theory of electrohydrodynamically driven capillary jets, Fluid Mech, 335, 165-188, 1997.

[18] M. Ganan-Calvo, Cone-Jet Analytical Extension of Taylor's Electrostatic Solution and the Asymptotic Universal Scaling Laws in Electrospinning, Phys Rev Lett, 79, 217-220, 1997.

[19] J. J. Feng, Stretching of a straight electrically charged viscoelastic jet. J Non-Newtonian Fluid Mech, 116, 55-70, 2003.

[20] S. Jagannathan, Process - structure - property Relationships of electrospun nano fibers, A Thesis Presented for the Master of Science Degree The University of Tennessee, Knoxville, 2003.

۵- نتیجه گیری

یکی از روش‌های شناخته شده جهت تولید نانو الیاف پلیمری روش الکتروریسی است که در آن محلول پلیمری از طریق اعمال بارهای الکتروستاتیک باردار شده و پس از گذر از ناحیه ناپایدار، الیاف با قطری در محدوده نانومتر تولید می‌گردند. در شکل‌گیری نانو الیاف پلیمری پارامترهای متعددی از جمله غلظت محلول پلیمری، ولتاژ الکتریکی، فاصله، دبی، جریان الکتریکی و ... تاثیر گذارند. به طوری که با افزایش غلظت، قطر متوسط افزایش و با افزایش فاصله، قطر متوسط کاهش می‌یابد. در حالیکه ولتاژ و دبی تاثیر متفاوتی را بر روی قطر متوسط الیاف حاصله ایجاد می‌کنند. در بین پارامترهای مطرح شده، جریان الکتریکی به عنوان یک پارامتر کلیدی و تاثیر گذار بر روی قطر و مورفولوژی الیاف حاصله شناخته شده است. به طور کلی، هر چه جریان الکتریکی یکنواخت تر باشد شرایط ریسنندگی پایدارتر بوده و مورفولوژی نانو الیاف حاصله مطلوب تر خواهد شد. مطابق آزمایشات صورت گرفته با افزایش غلظت و ولتاژ، جریان الکتریکی افزایش ولی با افزایش فاصله، جریان الکتریکی کاهش می‌یابد؛ در حالی که دبی رفتار متفاوتی را از خود نشان می‌دهد.

۶- مراجع

[1] Zh-M. Huang, Y-Z. Zhang, M. Kotaki, S. Ramakrishna, A review on polymer nanofibers by Electrospinning and their applications in nanocomposites , Composites science and Technology, 63, 2223-2253, 2003.

[2] S. Ramakrishna, K. Fujihara, W-Eo. L. Zuwei, An introduction to Electrospinning and Nanofibers, World Scientific Publishing, 20-80, 2005.

[3] H. Fong, D.H. Reneker, Electrospinning and the Formation of Nanofibers, University of akron, Ohio, USA, 225-246, 2004.

[4] P. Gupta, G. Wilkes, R. Davis, Th. Ward, L. Tim, K. Erd, Processing-Structure Property Studies, Virginia polytechnic Institute and State University, 45-60, 2004.

[5] Ch-M. Hsu, Electrospinning of Poly(ϵ -Caprolactone), A Thesis for the Degree of Master of Science, In Materials Science and Engineering, Submitted to the Faculty of the Worcester Polytechnic Institute, 48-60, 2003.

[6] C. L. Casper, J. S. Stephen, N. G. Jassi, D. B. Chase, J. F. Rabolt, Controlling surface morphology of electrospun polystyrene fibers: Effect of humidity and Molecular weight in the electrospinning process, Macromolecules, 37, 573-578, 2004.

[7] S. A. Theron, A. L. Yarin, Experimental investigation of the governing parameters in the electrospinning of polymer solutions, Polym, 45, 2017-2030, 2004.

[8] J. M. Deitzel, J. Kleinmeyer, D. Harris, N. C. B. Tan, The effect of processing variables on the mor-