

بررسی عوامل مؤثر بر مقدار تولید نانو الیاف پلی آکریلونیتریل الکتروریسی شده

Investigation of Parameters Affecting the Productivity of Electrospun Polyacrylonitrile Nanofibers

روح اله جلیلی، محمد مرشد*، سید عبدالکریم حسینی

اصفهان، دانشگاه صنعتی اصفهان، قطب علمی فناوری نانو در محیط زیست، صندوق پستی ۸۴۱۵۶

دریافت: ۸۴/۴/۱۴، پذیرش: ۸۴/۹/۲۹

چکیده

الکتروریسی، ریسیدن مستقیم نانو الیاف از محلولها و مذاب پلیمری بر اساس نیروهای الکتروستاتیک است. این پژوهش، تلاش برای یافتن عوامل افزایشدهنده مقدار تولید نانو الیاف بدون تغییر در قطر آنهاست. به منظور بررسی مقدار تولید، عوامل مؤثر بر ولتاژ بحرانی در فرایند الکتروریسی با توجه به معادله تیلور، مورد توجه قرار گرفت. برای الکتروریسی نانو الیاف، از محلول ۱۵ درصد وزنی پلی آکریلونیتریل در دی متیل فرمامید استفاده شد. افزایش ولتاژ از ۱۰ به ۲۰ kV باعث افزایش تولید نانو الیاف به مقدار ۶۰۰ درصد شد. میانگین قطری نانو الیاف بتدریج از ۳۸۵ به ۲۱۵ nm کاهش یافت. اما، توزیع قطری نانو الیاف با افزایش ولتاژ عریضتر شد. در طول ثابت سوزن سرنگ معادل ۲/۵ cm، با کاهش قطر سوزن سرنگ از ۰/۹ به ۰/۵ mm، ولتاژ بحرانی از ۷/۹ به ۶/۳ kV کاهش و مقدار تولید نانو الیاف ۷۰ درصد افزایش یافت. در قطر ثابت سوزن سرنگ برابر ۰/۷ mm، با افزایش طول سوزن سرنگ از ۱ به ۳/۵ cm، ولتاژ بحرانی از ۹/۵ به ۶/۵ kV کاهش و مقدار تولید نانو الیاف ۴۲ درصد افزایش یافت. نتایج نشان می دهد با تغییر در طول و قطر سوزن سرنگ، تغییر معنی داری در میانگین و توزیع قطری نانو الیاف مشاهده نشد. برای بررسی معنی دار بودن مقایسه نتایج، از روش تحلیل واریانس با استفاده از نرم افزار SPSS در سطح اطمینان $\alpha = 0/05$ استفاده شد. برای تعیین قطر نانو الیاف الکتروریسی شده میکروسکوپ الکترون پویشی بکار گرفته شد.

واژه‌های کلیدی

الکتروریسی، نانو الیاف، مقدار تولید، قطر سوزن سرنگ، طول سوزن سرنگ

مقدمه

میدانی الکتروستاتیک برای سرعت دادن به جریان مایع از نوک نازلی موین استفاده کرد [۱]. سطح کروی مایع معلق شده در حالت تعادل در انتهای نازل موین، در میدان الکتریکی باردار شده، از تعادل بین نیروهای دافعه بوجود آمده و پخش شده در سطح قطره به شکل

الکتروریسی، ریسیدن مستقیم نانو الیاف از محلولها و مذاب پلیمری بر اساس نیروهای الکتروستاتیک است. برای درک بهتر فرایند الکتروریسی می توان به فرایند افشاندن الکتریکی (electrospraying) اشاره کرد. در ابتدای قرن بیستم به این موضوع اشاره شد که می توان از

Key Words

electrospinning, nanofibers, productivity, syringe needle diameter, syringe needle length

الکتروریسی و افزایش مقدار تولید استفاده کرد. ضمن اینکه می توان آن را برای روشهایی که از چند سوزن سرنگ به عنوان ریسنده استفاده کرده اند، تعمیم داد.

به طور کلی تغییر در عوامل محلول ریسندگی باعث تغییر در ساختار و قطر نانوالیاف حاصل می شود [۱۱]. بنابراین، از این عوامل نمی توان برای افزایش مقدار تولید، بدون تغییر در قطر نانوالیاف استفاده کرد. بلکه باید عوامل افزایش دهنده مقدار تولید بدون تغییر در قطر الیاف را در میان متغیرهای فرایندی جستجو کرد.

نتایج قبلی نشان می دهد که برای الکتروریسی نانوالیاف با ساختاری مناسب، لازم است که در فرایند الکتروریسی، توازن جرمی در انتهای سوزن سرنگ و منشأ جت الکتروریسی حفظ شود. مقدار محلول پلیمری منتقل شده به وسیله جت الکتروریسی، تابعی از نیروهای الکتروستاتیک وارد بر منشأ جت الکتروریسی بوده، با افزایش میدان الکتریکی (ولتاژ)، افزایش می یابد. اما، افزایش سرعت خوراک اثری بر آن ندارد و باعث ایجاد آسیب در دسته نانوالیاف جمع آوری شده می شود [۱۴]. بنابراین، مقدار خوراک تابعی از عوامل مختلف محلول و فرایند تعیین شده است، با افزایش هرچه بیشتر مقدار خوراک برعکس روشهای متداول تولید الیاف، نمی توان مقدار تولید نانو الیاف را افزایش داد. در این روش، بنظر می رسد عواملی که نیروهای الکتروستاتیک وارد بر انتهای سوزن سرنگ و منشأ جت الکتروریسی را افزایش می دهند، مقدار تولید نانوالیاف را نیز افزایش می دهند.

هنگامی که اختلاف پتانسیل الکتریکی به محلول پلیمری اعمال شود، قطره ای از محلول که با فشار پمپ در نوک سوزن سرنگ ایجاد شده، به شدت باردار شده و بارهای الکتریکی در سطح قطره ایجاد و پراکنده می شوند. در نتیجه این قطره تحت اثر دو نوع نیروی الکتروستاتیک شامل دافعه الکتریکی میان بارهای الکتریکی ایجاد شده در سطح قطره و نیروی کولنی اعمال شده به وسیله میدان الکتریکی خارجی قرار می گیرد. با اعمال این دو نیرو سطح کروی مایع معلق شده در این قطره کشیده شده و به شکل مخروط تیلور در می آید. با افزایش ولتاژ و رسیدن آن به حد بحرانی، این نیرو می تواند برکشش سطحی قطره غلبه کرده، جت پایدار از نوک این مخروط خارج شود. در ولتاژ اعمالی کمتر برای غلبه سریعتر بر نیروی کشش سطحی قطره، لازم است که بارهای سطحی به مقدار کافی در قطره تشکیل شده در انتهای سوزن سرنگ، سریعتر و در ولتاژ اعمالی کمتر ایجاد شوند. تیلور عوامل مؤثر بر ولتاژ بحرانی (V_c) را با معادله (۱) ارائه کرد [۲]:

$$V_c^2 = \frac{4}{L} \frac{H^2}{R} (\ln \frac{L}{R} - 1/5) (\gamma / 117 \pi R \gamma) \quad (1)$$

مخروط که به مخروط تیلور مشهور است، کش می آید. با افزایش ولتاژ و رسیدن آن به حد بحرانی، این نیرو برکشش سطحی قطره غلبه کرده، جت پایدار از نوک این مخروط خارج می شود. جت مایعات با وزن مولکولی کم یا گرانی کم، به کمک کشش سطحی به قطره های ریز شکسته خواهد شد. این عملیات به عنوان افشاندن الکتریکی شناخته شده و در بسیاری از صنایع برای تهیه قطره هایی با توزیع قطری باریک و کوچکتر از میکرون بکار گرفته شده است [۲]. حالت دوم که می تواند برای محلولها یا مذاب پلیمری واقع شود، جت نشکسته، بلکه به سمت فلز جمع کننده سرعت می گیرد [۳]. پس از طی مسیر کوتاهی دافعه متقابل بارهای حمل شده در سطح جریان، آن را خم کرده و جت، مسیر را به طور مارپیچ و حلقه ای ادامه می دهد [۴، ۵]. بدین ترتیب جت در فاصله کم نوک نازل تا جمع کننده (فاصله ریسندگی)، می تواند مسیر بسیار زیادی را طی کرده تا نیروهای الکتریکی، آن را هزاران بار کشیده و نازک کنند. سرانجام حلال تبخیر یا مذاب سرد شده و نانوالیاف ممتد و بی بافت روی فلز جمع کننده حاصل می شوند [۳]. ساختار و قطر الیاف با شرایط فرایند کنترل شده و به عوامل زیر وابسته است [۶-۱۰]:

- خواص ذاتی محلول نظیر نوع و وزن مولکولی پلیمر، قطبیت حلال، گرانی (غلظت)، رسانایی الکتریکی و کشش سطحی محلول،
- عوامل فرایندی نظیر اختلاف پتانسیل اعمالی، فاصله ریسندگی و سرعت تغذیه محلول و

- رطوبت و دمای محیط حین الکتروریسی.

در سالهای اخیر روش الکتروریسی برای تولید نانو الیاف در محدوده وسیعی از پلیمرها و در کاربردهای مختلف نظیر تقویت کننده در کامپوزیتها، ساخت صافیها، الیاف رسانا، حسگرها، الیاف سرامیکی، قالب بافت سلولی، حمل دارو و زخم پوش به شکل بی بافت بکار گرفته شده است [۱۱]. اما، یکی از مشکلات بسیار مهم مربوط به تهیه نانوالیاف به شیوه الکتروریسی، مقدار تولید کم نانو الیاف است. برای غلبه بر این مشکل و افزایش مقدار تولید نانو الیاف الکتروریسی شده، از آرایه چند سوزن سرنگ به عنوان ریسنده استفاده شد [۱۲]. به دلیل استفاده از تعداد زیاد سوزن سرنگ در این شیوه، به منظور جلوگیری از اثر تداخل میدانهای الکتریکی بر ساختار نانو الیاف حاصل و تهیه نانوالیاف با ساختار یکنواخت، نیاز به تعیین بسیار دقیق محل ریسنده هاست که انجام این امر با دشواریهایی همراه است. به طور مشابه، تلاشهای دیگری برای افزایش مقدار تولید نانوالیاف الکتروریسی شده، انجام شد که به طور کلی بر همین اساس هستند [۱۳]. اما در منابع، توجه به این مسأله که در فرایند الکتروریسی با یک ریسنده، بدون تغییر در قطر نانوالیاف حاصل، چگونه می توان مقدار تولید را افزایش داد، پژوهشی مشاهده نشد. با تحقق این امر می توان از نتایج حاصل در بهبود فرایند

تصویربرداری از مخروط تیلور دوربین رقمی مدل DCR-PC115E ساخت شرکت SONY ژاپن بکار گرفته شد.

روشها

ابتدا محلول DMF/PAN با غلظت ۱۵ درصد درون سرنگ ریخته شد. سوزن سرنگ به قطب مثبت و صفحه آلومینیمی جمع کننده به قطب منفی متصل شد. برای عدم تغییر در میدان الکتریکی به دلیل تغییر در فاصله ریسندگی، در تمامی حالات، فاصله نوک سوزن سرنگ تا صفحات آلومینیمی ثابت و برابر ۱۵ cm تنظیم شد. سرنگ حاوی محلول پلیمری روی پمپ نصب شد. جریان محلول با پمپ طوری کنترل شد که همواره مخروط تیلور به شکل پایدار و تک شاخه‌ای در نوک سوزن سرنگ تشکیل شود. برای تعیین ولتاژ بحرانی با تغییر عوامل مختلف در هر آزمایش، ولتاژ اعمالی از صفر افزایش و ولتاژ در لحظه‌ای که جت الکترورسی از انتهای سوزن سرنگ خارج شد، به عنوان ولتاژ بحرانی ثبت شد.

برای مشخص کردن مقدار تولید نانو الیاف با تغییر عوامل مختلف در هر آزمایش، الکترورسی به مدت ۱۰ min انجام شد. نانو الیاف در حال تولید، به شدت باردار بوده، به سرعت جذب جمع کننده شدند. نانو الیاف تولیدی به وسیله صفحه آلومینیمی جمع آوری شده، به مدت ۲ h در گرمخانه با دمای ۷۰°C خشک و سپس توزین شدند.

برای تشکیل جامعه نرمال آماری هر آزمایش ۳۰ مرتبه تکرار و میانگین هر دسته با دیگر دسته‌ها مقایسه شد. معنی دار بودن مقایسه میانگینها با تحلیل واریانس در سطح اطمینان $\alpha = 0/05$ به کمک نرم افزار SPSS انجام شد.

نتایج و بحث

اثر ولتاژ اعمالی

برای مشخص کردن اثر ولتاژ اعمالی بر مقدار تولید نانو الیاف، آزمایشهای الکترورسی در ولتاژهای ۱۰ تا ۲۰ kV با افزایشهای ۲/۵ kV انجام و نانو الیاف تولید شده در مدت ۱۰ min، توزین و میانگین وزن نانو الیاف تولیدی در هر ولتاژ با یکدیگر مقایسه شد. شکل ۱ تغییر مقدار نانو الیاف تولید شده را نسبت به تغییر ولتاژ اعمالی نشان می‌دهد. با افزایش ولتاژ اعمالی و مطابق آن نیروهای الکتروستاتیک وارد بر انتهای سوزن سرنگ و منشأ جت الکترورسی، مقدار محلول پلیمری که به وسیله جت الکترورسی منتقل شده و به نانو الیاف تبدیل می‌شود، زیاد شده به طوری که مقدار تولید از ۸ mg در ۱۰ min در ولتاژ ۱۰ kV به ۲۴ mg در

در این معادله H فاصله میان نوک سوزن سرنگ تا صفحه فلزی جمع کننده (فاصله ریسندگی)، L طول سوزن ریسنده، R شعاع سوزن ریسنده و γ کشش سطحی محلول است (H، L و R برحسب cm و γ برحسب dyn/cm بیان می‌شود) [۱۱]. این مدل عوامل مؤثر بر نیروهای الکتروستاتیک وارد شده بر انتهای سوزن سرنگ و منشأ جت الکترورسی را مشخص می‌کند. در محلول، عمده ترین عامل مؤثر بر کشش سطحی، نوع حلال است [۹]. همچنین، حداقل فاصله‌ای میان نوک سوزن سرنگ و جمع کننده برای تولید نانو الیاف با ساختار مناسب، لازم است [۱۴]. بنابراین، مطابق معادله (۱)، بنظر می‌رسد مناسبترین عوامل برای تغییر این نیروها، ولتاژ اعمالی و طول و قطر سوزن سرنگ باشند.

در این پژوهش، باتوجه به عوامل معرفی شده در مدل تیلور، ابتدا اثر ولتاژ اعمالی بر مقدار تولید و قطر نانو الیاف در فرایند الکترورسی بررسی شد، سپس اثر طول و قطر سوزن سرنگ بر ولتاژ بحرانی و مقدار تولید و قطر نانو الیاف در فرایند الکترورسی ارزیابی شد.

تجربی

مواد

در این پژوهش، از پلی‌آکریلونیتریل (PAN) تجاری تهیه شده از شرکت پلی‌آکریل ایران و DMF با دمای جوش ۱۵۳°C، محصول شرکت Merk به ترتیب به عنوان پلیمر و حلال استفاده شد. وزن مولکولی متوسط وزنی (\bar{M}_w) و عددی (\bar{M}_n) پلیمر تهیه شده به ترتیب برابر ۱۰۰۰۰۰ و ۷۰۰۰۰ g/mol است. پس از خشک کردن کامل حلال و پلیمر، محلول ۱۵ درصد وزنی PAN/DMF در دمای محیط و با همزدن در دور ثابت تهیه شد.

دستگاهها

تجهیزات الکترورسی شامل پمپ سرنگ برای کنترل جریان محلول پلیمری، منبع تغذیه مستقیم با توان ایجاد اختلاف پتانسیل تا ۲۰۰۰۰ V، جمع کننده آلومینیمی، انواع سوزن سرنگ با طول ثابت ۲/۵ cm و قطرهای خارجی ۱-۳/۵ mm و انواع سوزن سرنگ با طولهای ۱-۳/۵ mm و قطر خارجی ثابت ۰/۷ mm است. هنگام استفاده از حلالهای سمی فرایند زیر هود انجام شد. برای تصویربرداری از نانو الیاف الکترورسی شده میکروسکوپ الکترون پویشی Philips مدل XL-۳۰ ساخت هلند با بزرگنمایی ۲۵۰۰، برای توزین نانو الیاف تولید شده ترازو با دقت ۰/۱ mg مدل Libror AEU-۲۱۰ ساخت شرکت Shimadzu ژاپن و به منظور

موجب تغییر در قطر و توزیع قطری نانوالیاف نهایی می شود. بدین ترتیب، اگر در کاربرد نهایی، عریض شدن توزیع قطری نانوالیاف مشکلی را ایجاد نکند، می توان با افزایش ولتاژ، مقدار تولید را به شدت افزایش داد. بنظر می رسد، اگر نیروهای الکتریکی وارد بر جت سیال، فقط در منشأ جت الکتروریسی افزایش یابد. مقدار تولید بدون تغییر در قطر نانوالیاف تولیدی افزایش می یابد.

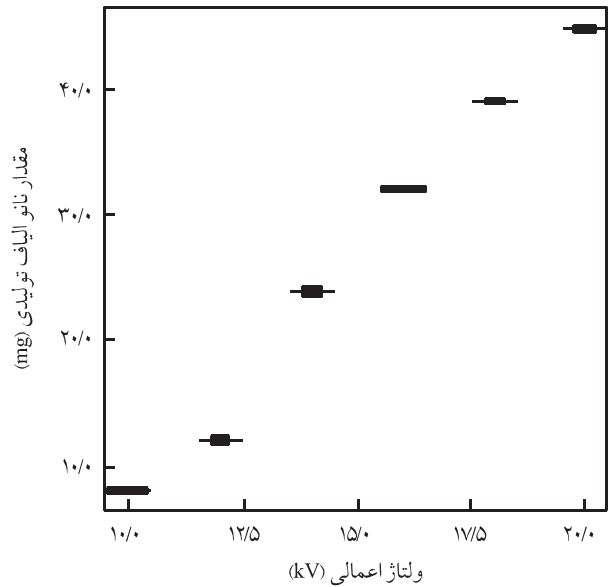
تغییر در برآمدگی نازل (nozzle protrusion) در میدان الکتریکی، در میدان الکتریکی ثابت، باعث تغییر جریان الکتریکی در فرایند الکتروریسی می شود. این اثر به تغییر در نحوه انتقال بارها در نازل نسبت داده شده است [۱۵]. در همین راستا همان طور که گفته شد، در معادله تیلور طول و قطر سوزن سرنگ عواملی مؤثر در سرعت تشکیل بارهای الکتریکی و تغییر مقدار نیروهای الکتروستاتیک وارد بر سطح قطره معلق در انتهای سوزن سرنگ هستند [۲]. بنابراین منطقی خواهد بود، اگر بتوان با تغییر این دو عامل، نیروهای الکتروستاتیک را فقط در محل منشأ جت افزایش داد، به طوری که در هر لحظه بارهای الکتریکی در محل منشأ جت سریعتر تشکیل و همراه جت منتقل شوند. بنابراین، می توان بدون تغییر در قطر الیاف نهایی مقدار تولید را در فرایند الکتروریسی افزایش داد.

اثر قطر سوزن سرنگ

برای مشخص کردن اثر قطر سوزن سرنگ، آزمایشهای الکتروریسی طبق جدول ۱، در طول ثابت سوزن سرنگ معادل ۲/۵cm و غلظت محلول برابر ۱۵ در صد وزنی انجام شد. ابتدا تغییر ولتاژ بحرانی با تغییر قطر سوزن سرنگ بررسی شد. شکل ۳ (الف) تشکیل مخروط تیلور را در لحظه ای که نیروهای الکتروستاتیک با نیروی کشش سطحی قطره در تعادل اند، نشان می دهد. با افزایش ولتاژ و رسیدن آن به حد بحرانی، این نیرو برکشش سطحی قطره غلبه کرده، جتی پرفشار از نوک مخروط

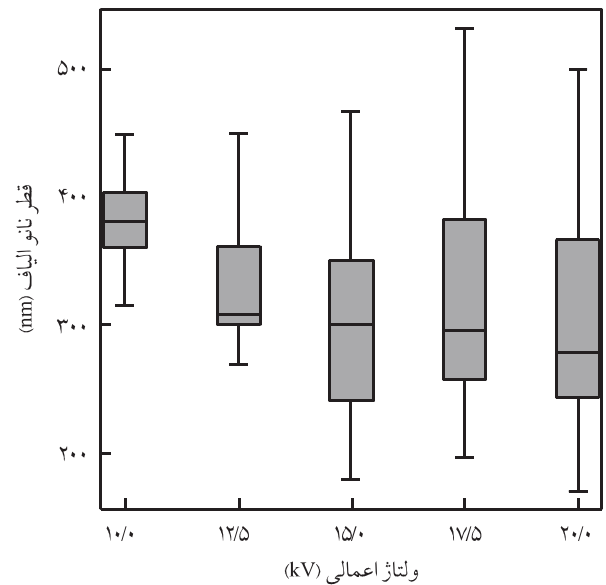
جدول ۱ شرایط الکتروریسی برای اثر قطر سوزن سرنگ بر مقدار تولید نانوالیاف PAN.

طول سوزن ریسنده (cm)	قطر سوزن ریسنده (μm)
۲/۵	۵۰۰
۲/۵	۶۰۰
۲/۵	۶۵۰
۲/۵	۷۰۰
۲/۵	۸۰۰
۲/۵	۹۰۰

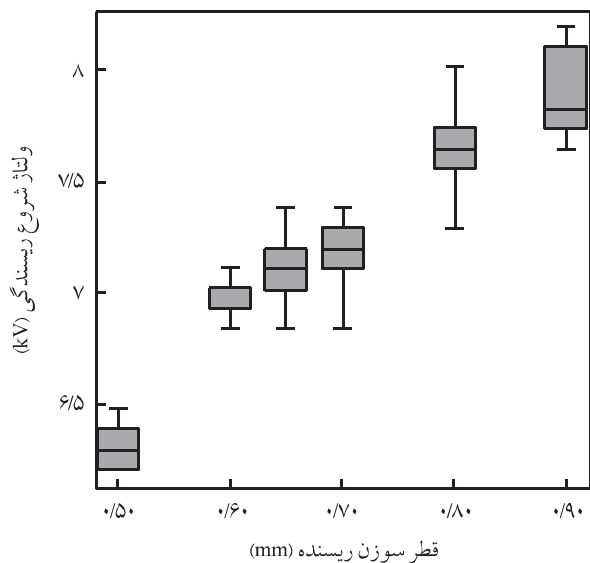


شکل ۱ اثر ولتاژ اعمالی بر مقدار تولید نانوالیاف (مقدار تولید در ۱۰ min).

ولتاژ ۲۰ kV افزایش می یابد. اما، همزمان توزیع قطری نانوالیاف تولید شده عریض می شود. شکل ۲ تغییر قطر نانوالیاف الکتروریسی شده را نسبت به افزایش ولتاژ نشان می دهد. با افزایش ولتاژ، میدان الکتریکی افزایش یافته، مطابق آن نیروهای الکتروستاتیک وارد بر انتهای سوزن سرنگ و منشأ جت الکتروریسی افزایش می یابد. اما، این افزایش در میدان الکتریکی در تمام مسیر جت الکتروریسی بر آن اثر گذاشته که

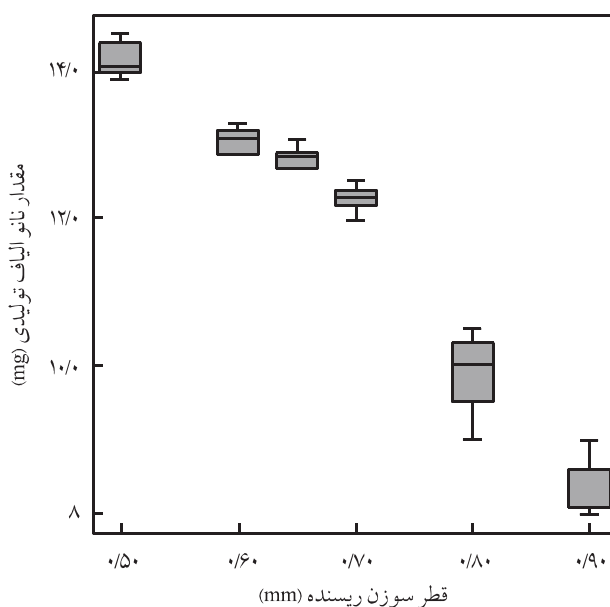


شکل ۲ تغییر قطر نانوالیاف با افزایش ولتاژ (محلول ۱۵ درصد وزنی PAN/DMF).

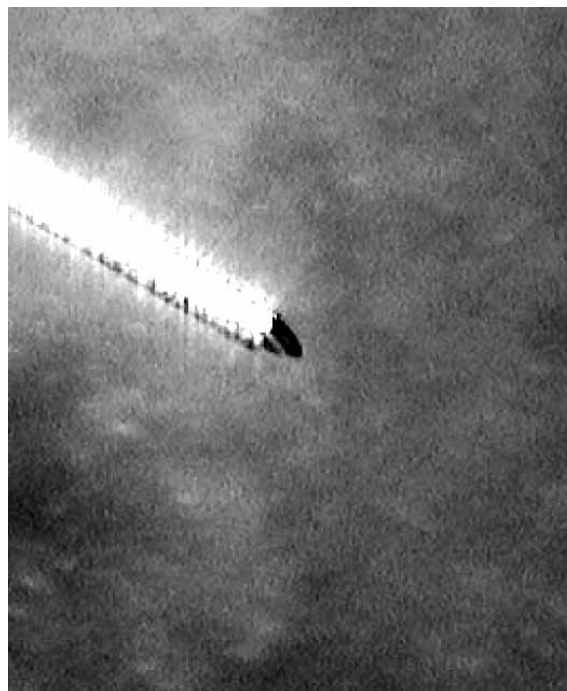


شکل ۴ اثر قطر سوزن سرنگ بر ولتاژ بحرانی (طول سوزن سرنگ معادل ۲/۵ cm).

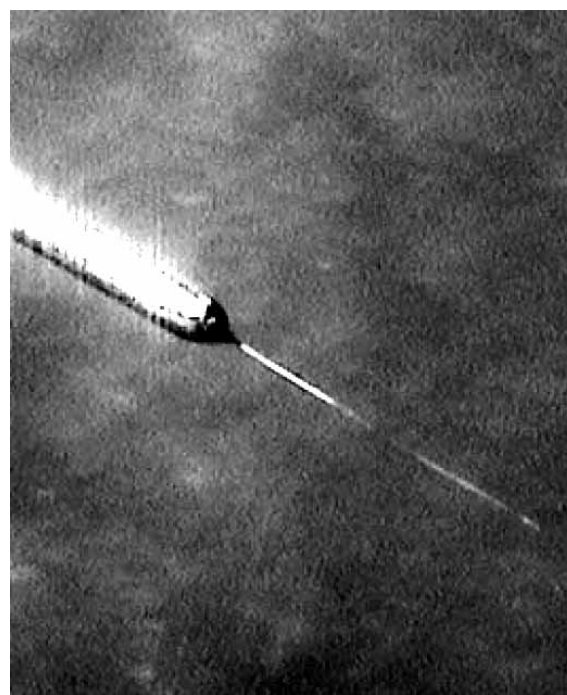
تیلور خارج می‌شود. شکل ۳ (ب)، لحظه غلبه نیروهای الکتروستاتیک را بر نیروی کشش سطحی قطره نشان می‌دهد. در این لحظه، جتی پرفشار از نوک مخروط تیلور تشکیل شده در انتهای سوزن سرنگ، خارج شده و جریان الکترورسی آغاز می‌شود. شکل ۴ اثر قطر سوزن سرنگ را بر ولتاژ بحرانی نشان می‌دهد. افزایش قطر سوزن از ۰/۵ به ۰/۹ mm در



شکل ۵ اثر قطر سوزن سرنگ بر مقدار تولید نانو الیاف الکترورسی شده (زمان تولید ۱۰ min، ولتاژ ۱۲/۵ kV و طول سوزن سرنگ ۲/۵ cm).



(الف)

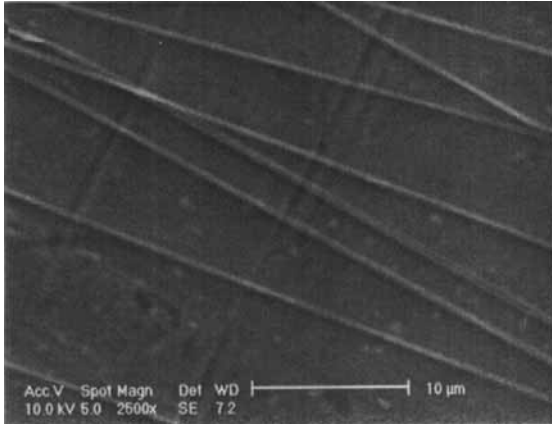


(ب)

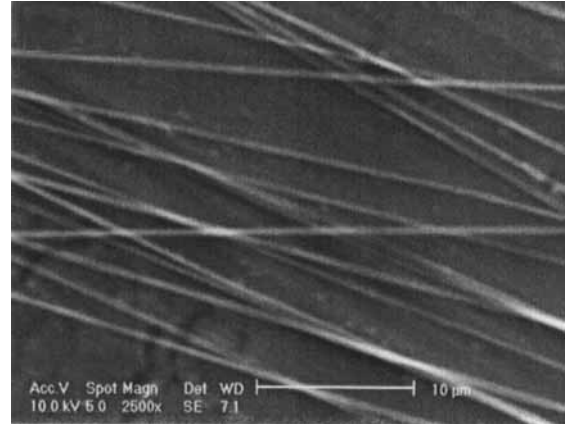
شکل ۳ تشکیل مخروط تیلور: (الف) در لحظه‌ای که نیروهای الکتروستاتیک با نیروی کشش سطحی قطره در تعادل است و (ب) لحظه رسیدن به ولتاژ حد بحرانی. در این لحظه، نیروهای الکتروستاتیک بر نیروی برکشش سطحی قطره غلبه کرده و یک جت پرفشار از نوک مخروط تیلور خارج شده است.

عوامل، بارهای سطحی الکتریکی در نوک سوزن سرنگ، کمتر تشکیل شده و باعث کمتر شدن نیروهای الکتروستاتیک برای غلبه برکشش سطحی قطره شده اند. به همین دلیل به اعمال ولتاژ بیشتری برای تشکیل

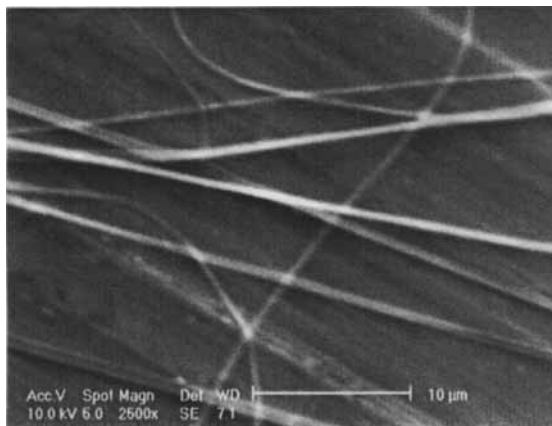
طول ثابت سوزن برابر $2/5$ cm، باعث افزایش ولتاژ بحرانی از 6300 به 7900 V مدل تیلور نیز مطابق با افزایش قطر سوزن، افزایش ولتاژ بحرانی را پیش بینی می کند. با افزایش قطر سوزن و ثابت ماندن سایر



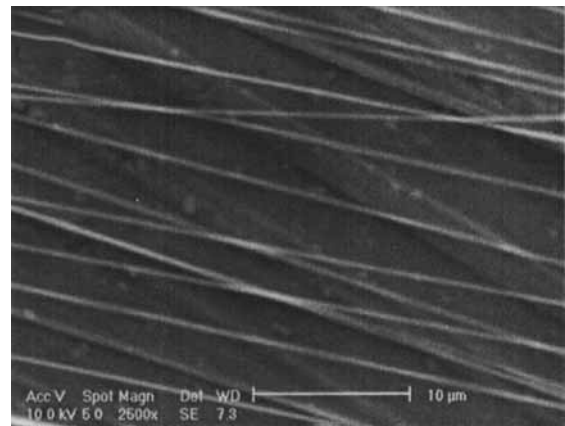
(د)



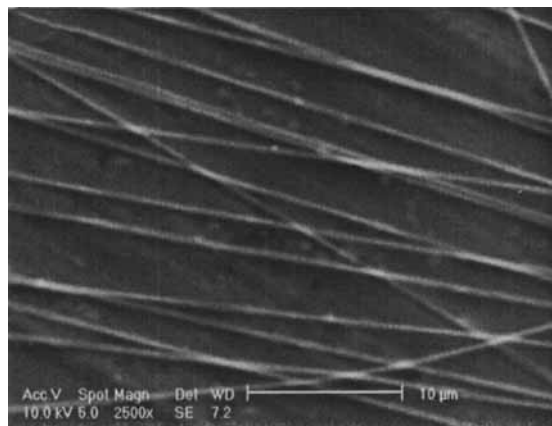
(الف)



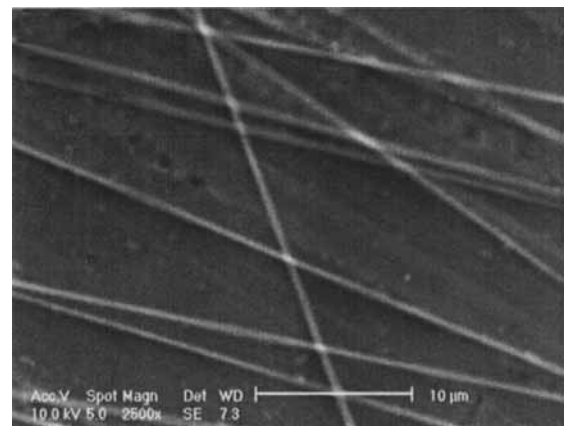
(ه)



(ب)

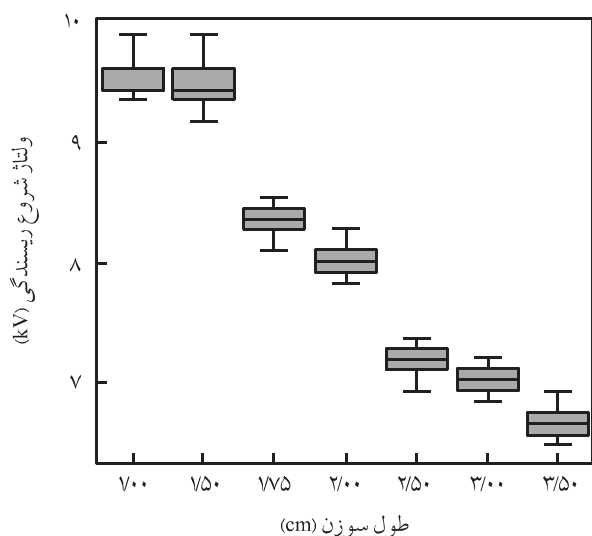


(و)



(ج)

شکل ۶ تصویر نانو الیاف PAN الکتروریسی شده در طول ثابت سوزن برابر $2/5$ cm و قطرهای مختلف سوزن با بزرگنمایی $2500\times$: (الف) $0/5$ ، (ب) $0/6$ ، (ج) $0/65$ ، (د) $0/7$ ، (ه) $0/8$ و (و) $0/9$ mm.

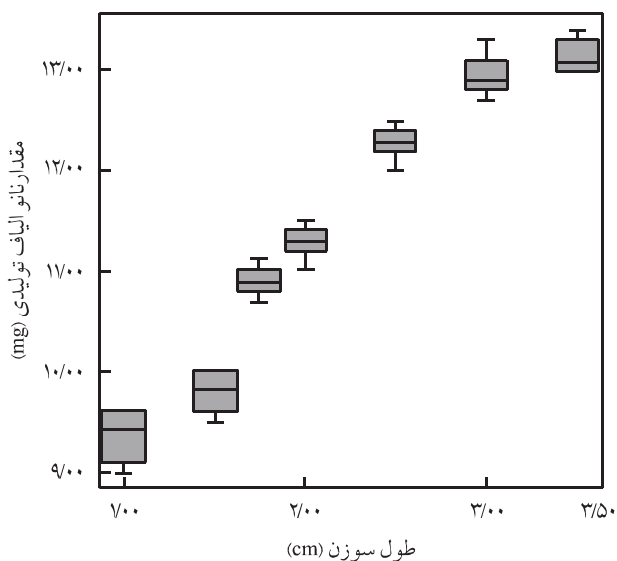


شکل ۸ اثر طول سوزن سرنگ بر ولتاژ بحرانی (قطر سوزن سرنگ ۰/۷ mm).

فرایند خوراک دهی محلول پلیمری به درون سوزن سرنگ می‌شود.

اثر طول سوزن سرنگ

برای ارزیابی اثر طول سوزن سرنگ بر مقدار تولید نانو الیاف، آزمایشهای الکتروریسی طبق جدول ۲ در قطر ثابت سوزن سرنگ معادل ۰/۷ mm و غلظت محلول برابر ۱۵ در صد وزنی انجام شد. ابتدا تغییر ولتاژ بحرانی

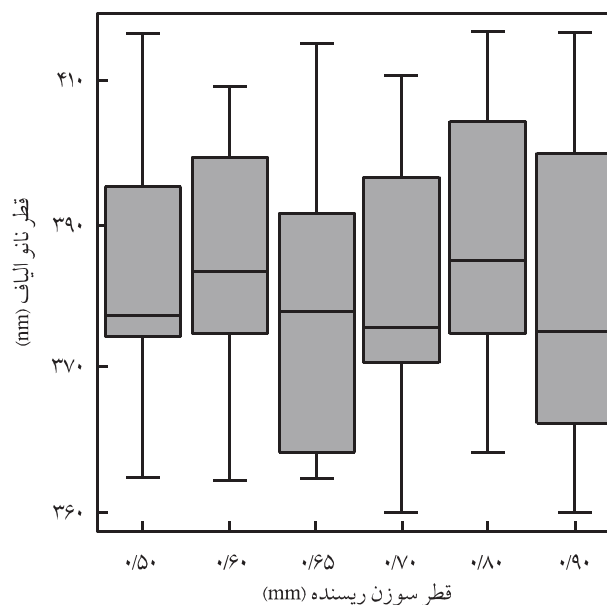


شکل ۹ اثر طول سوزن سرنگ بر مقدار تولید نانو الیاف الکتروریسی شده (زمان تولید ۱۰ min، ولتاژ ۱۲/۵ kV و قطر سوزن سرنگ ۰/۷ mm).

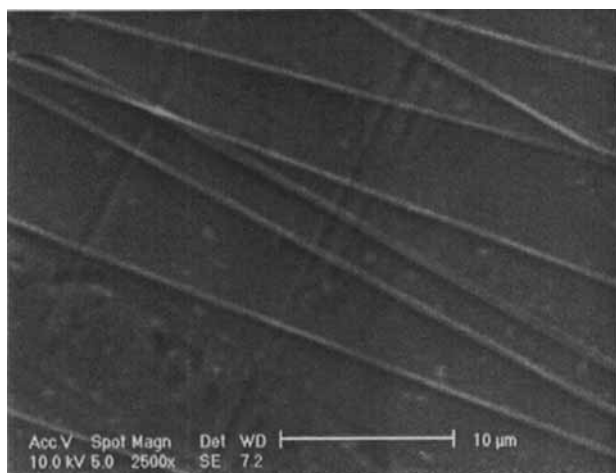
بارها به مقدار لازم برای غلبه نیروهای الکتروستاتیک بر کشش سطحی مایع و خارج شدن جت پر فشار پلیمری نیاز است.

برای بررسی اثر قطر سوزن سرنگ بر مقدار تولید نانو الیاف، آزمایشهای الکتروریسی طبق جدول ۱ و در ولتاژ ۱۲/۵ kV انجام شد. در شکل ۵ اثر قطر سوزن سرنگ بر مقدار تولید نانو الیاف الکتروریسی شده در این شرایط نشان داده شده است. افزایش قطر سوزن از ۰/۵ به ۰/۹ mm باعث کاهش مقدار تولید از ۱۴/۵ mg در مدت زمان مساوی الکتروریسی به ۸/۱ mg شده است. به عبارت دیگر، کاهش قطر سوزن از ۰/۹ به ۰/۵ mm باعث افزایش تولید نانو الیاف به مقدار ۷۰ درصد خواهد شد.

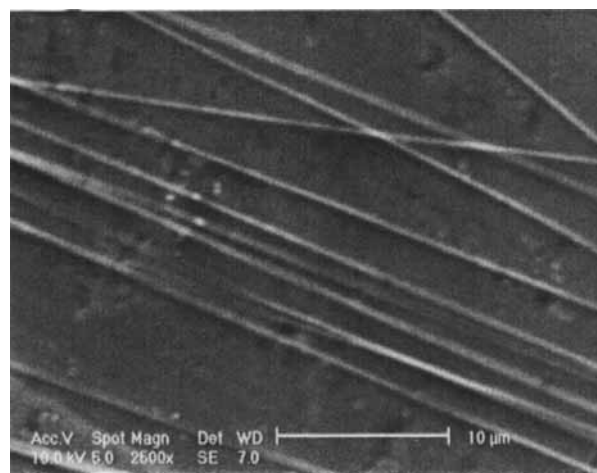
شکل ۶ تصویر نانو الیاف PAN الکتروریسی شده را در قطرهای مختلف سوزن و طول ثابت ۲/۵ cm نشان می‌دهد. شکل ۷ که با استفاده از شکل ۶ رسم شده، تغییرات قطر این الیاف را در برابر تغییر قطر سوزن نشان می‌دهد. نتایج حاکی از آن است که تغییر در قطر سوزن سرنگ اثر معنی داری بر میانگین و توزیع قطری نانو الیاف نداشته است. بنابراین، تشکیل سریعتر بارهای سطحی در نوک سوزن سرنگ، باعث می‌شود که در ولتاژی ثابت، فقط نیروهای الکتروستاتیک وارد بر انتهای سوزن سرنگ و منشأ جت الکتروریسی افزایش یابد. بدین ترتیب، بدون تغییر در قطر نانو الیاف حاصل، مقدار محلول پلیمری که با جت الکتروریسی منتقل شده و به نانو الیاف تبدیل می‌شود، افزایش یافته، نانو الیاف بیشتری تولید می‌شود. البته، کاهش زیاد قطر سوزن سرنگ، باعث سخت شدن



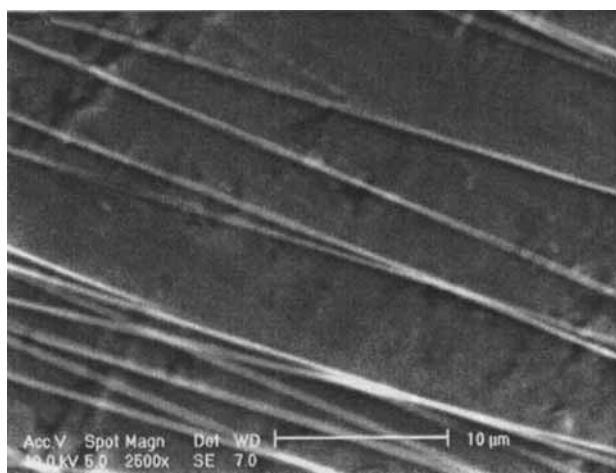
شکل ۷ تغییرات قطر نانو الیاف PAN در برابر تغییر قطر سوزن (غلظت محلول ۱۵ wt%، ولتاژ ۱۲/۵ kV و طول سوزن ۲/۵ cm).



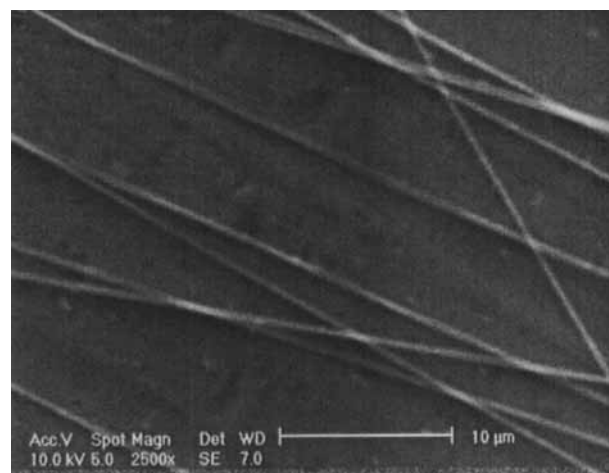
(د)



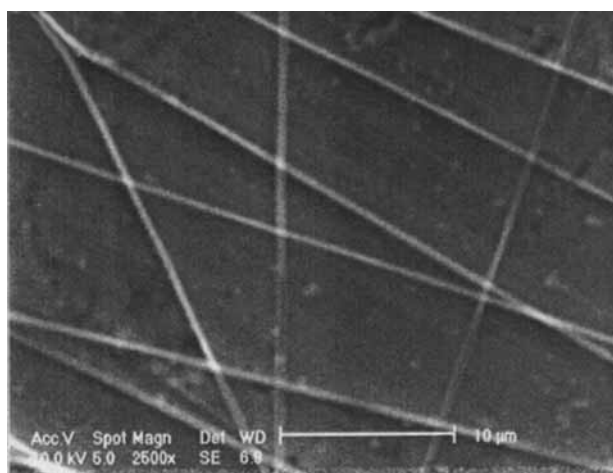
(الف)



(هـ)



(ب)



(ج)

شکل ۱۰ تصویر نانو الیاف PAN الکترورسی شده در قطر ثابت سوزن سرنگ برابر ۰/۷ mm و طولهای متفاوت سوزن با بزرگنمایی ۲۵۰۰: (الف) ۱، (ب) ۱/۵، (ج) ۲، (د) ۲/۵ و (هـ) ۳ cm.

می‌شوند. به همین دلیل به اعمال ولتاژ کمتری برای غلبه نیروهای الکتروستاتیک بر کشش سطحی مایع و خارج شدن جت پر فشار پلیمری نیاز است.

برای ارزیابی اثر طول سوزن سرنگ بر مقدار تولید نانو الیاف، آزمایشها الکترورسی طبق جدول ۲ و در ولتاژ ۱۲/۵ kV انجام شد. در شکل ۹ اثر طول سوزن سرنگ بر مقدار تولید نانو الیاف الکترورسی شده در این شرایط نشان داده شده است. افزایش طول سوزن سرنگ از ۱ به ۳/۵ cm باعث افزایش مقدار تولید نانو الیاف از ۹۳ mg در مدت زمان مساوی الکترورسی به ۱۳۲ mg شده است. به عبارت دیگر، با ثابت نگه داشتن تمامی شرایط و افزایش طول سوزن سرنگ از ۱ به ۳/۵ cm مقدار تولید نانو الیاف ۴۲ درصد افزایش یافته است.

شکل ۱۰ تصویر نانو الیاف PAN الکترورسی شده را در طولهای مختلف سوزن و قطر ثابت ۰/۷ mm نشان می‌دهد. شکل ۱۱ که با توجه به شکل ۱۰ رسم شده است، تغییر قطر این الیاف را نسبت به تغییر طول سوزن نشان می‌دهد. نتایج حاکی از آن است که تغییر در طول سوزن سرنگ اثر معنی داری بر میانگین و توزیع قطری نانو الیاف نداشته است. بنابراین، تشکیل سریعتر بارهای سطحی در نوک سوزن سرنگ، باعث می‌شود که در ولتاژی ثابت، فقط نیروهای الکتروستاتیک وارد بر انتهای سوزن سرنگ و منشأ جت الکترورسی افزایش یابد. بدین ترتیب، بدون تغییر در قطر نانو الیاف حاصل، مقدار محلول پلیمری که به وسیله جت الکترورسی منتقل شده، به نانو الیاف تبدیل می‌شود، افزایش یافته، نانو الیاف بیشتری تولید می‌شود. امکان افزایش طول سوزن محدود بوده و در این آزمایش، تغییرات مقدار تولید نانو الیاف، با افزایش طول بیش از ۳/۵ cm معنی دار نبود.

بدین ترتیب در فرایند الکترورسی با انتخاب مناسب سوزن سرنگ می‌توان به مقدار قابل ملاحظه‌ای مقدار تولید را بدون تغییر در قطر نانو الیاف حاصل افزایش داد، سپس در حالت لزوم از تعداد ریسنده بیشتر برای افزایش بیشتر مقدار تولید استفاده کرد.

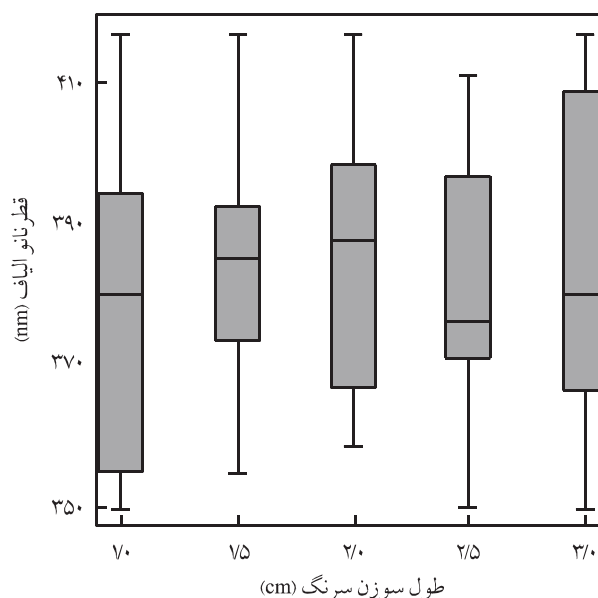
نتیجه‌گیری

در این بررسی، برای الکترورسی نانو الیاف از محلول ۱۵ درصد وزنی DMF/PAN استفاده شد. افزایش ولتاژ از ۱۰ به ۲۰ kV باعث افزایش تولید نانو الیاف به میزان ۶۰۰ درصد شد. اما، توزیع قطری نانو الیاف با افزایش ولتاژ عریضتر شد. بررسیها نشان می‌دهد می‌توان با کاهش طول سوزن سرنگ و افزایش قطر آن، نیروهای الکتروستاتیک را فقط در محل منشأ جت افزایش داد. به طوری که در هر لحظه بارهای الکترورسی

جدول ۲ شرایط الکترورسی برای مشخص کردن اثر طول سوزن سرنگ بر مقدار تولید نانو الیاف PAN.

طول سوزن ریسنده (cm)	قطر سوزن ریسنده (μm)
۱	۷۰۰
۱/۵	۷۰۰
۱/۷	۷۰۰
۲	۷۰۰
۲/۵	۷۰۰
۳	۷۰۰
۳/۵	۷۰۰

با تغییر طول سوزن سرنگ بررسی شد. شکل ۸ اثر طول سوزن سرنگ بر ولتاژ بحرانی نشان می‌دهد. افزایش طول سوزن سرنگ از ۱ به ۳/۵ cm در قطر ثابت سوزن معادل ۰/۷ mm، باعث کاهش ولتاژ بحرانی از ۹۵۰۰ به ۶۵۰۰ V شد. مدل تیلور نیز مطابق با افزایش طول سوزن، کاهش ولتاژ بحرانی را پیش‌بینی می‌کند. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش طول سوزن و در نتیجه طی مسیر طولانیتر محلول در طول سوزن و همزمان در اثر میدان الکتریکی (در میدان الکتریکی ثابت)، بارهای سطحی الکترورسی در نوک سوزن سرنگ، بیشتر تشکیل شده، باعث افزایش نیروهای الکتروستاتیک برای غلبه بر کشش سطحی قطره



شکل ۱۱ تغییرات قطر نانو الیاف PAN در برابر تغییر طول سوزن (غلظت محلول ۱۵ wt%، ولتاژ ۱۲/۵ kV و قطر سوزن ۰/۷ cm).

از ۹۵۰۰ به ۶۵۰۰ V شد. تولید نانو الیاف، با کاهش قطر سوزن سرنگ از ۰/۹ به ۰/۵ mm در ولتاژ ۱۲/۵ kV به مقدار ۷۰ درصد افزایش یافت و با افزایش طول سوزن سرنگ از ۱ به ۳/۵ cm در ولتاژ ۱۲/۵ kV به مقدار ۴۲ درصد افزایش یافت. بدین ترتیب، با تغییر در عواملی که در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفتند، می توان به مقدار قابل ملاحظه ای مقدار تولید نانو الیاف را در فرایند الکترورسی افزایش داد.

محل منشأ جت سریعتر تشکیل و همراه جت منتقل شوند. بدین ترتیب، می توان بدون تغییر در قطر نهایی الیاف حاصل، مقدار تولید را در فرایند الکترورسی به طور قابل ملاحظه ای افزایش داد. کاهش قطر سوزن از ۰/۹ به ۰/۵ mm در طول ثابت سوزن معادل ۲/۵ cm، باعث کاهش ولتاژ بحرانی از ۷۹۰۰ به ۶۳۰۰ V شد. افزایش طول سوزن سرنگ از ۱ به ۳/۵ cm در قطر ثابت سوزن برابر ۰/۷ mm، باعث کاهش ولتاژ بحرانی

مراجع

- Zeleny J., Instability of Electricfield Liquid Surfaces, *Phys. Rev.*, **3**, 69-91, 1914.
- Taylor G.I., Disintegration of Water Drops in an Electric Field, *Royal. Soc. London. A.*, **280**, 383-397, 1964.
- Doshi J. and Reneker D.H., Electrospinning Process and Applications of Electrospun Fibers, *J. Electrostatic.*, **35**, 151-160, 1995.
- Reneker D.H., Yarin A.L., Fong H. and Koombhongse S., Bending Instability of Electrically Charged Liquid Jets of Polymer Solutions in Electrospinning, *J. Appl. Phys.*, **87**, 4531-4547, 2000.
- Yarin A.L., Koombhongse S. and Reneker D.H., Bending Instability in Electrospinning of Nanofibers, *J. Appl. Phys.*, **89**, 3018-3026, 2001.
- Fong H., Chun I. and Reneker D.H., Beaded Nanofibers Formed during Electrospinning, *Polymer*, **40**, 4585-4592, 1999.
- Won K.S., Youk J.H., Taek S.L. and Won H.P., The Effects of Solution Properties and Polyelectrolyte on Electrospinning of Ultrafine Poly(ethylene oxide) Fibers, *Polymer*, **45**, 2959-2966, 2004.
- Koski A., Yim K. and Shivkumar S., Effect of Molecular Weight on Fibrous PVA Produced by Electrospinning, *Mater. Lett.*, **58**, 493-497, 2004.
- Jarusuwannapoom T., Hongrojjanawiwat W., Jitjaicham S., Wannatong L., Nithitanakul M., Pattamaprom C., Koombhongse P., Rangkupan R. and Supaphol P., Effect of Solvents on Electro-spinnability of Polystyrene Solutions and Morphological Appearance of Resulting Electrospun Polystyrene Fibers, *Eur. Polym. J.*, **41**, 409-421, 2005.
- Zhang C., Yuan X., Wu L., Han Y. and Sheng J., Study on Morphology of Electrospun Poly(vinyl alcohol) Mats, *Eur. Polym. J.*, **41**, 423-432, 2005.
- Huang Z.M., Zhang Y.Z., Kotaki M. and Ramakrishna S., A Review on Polymer Nanofibers by Electrospinning and their Applications in Nanocomposites, *Compos. Sci. Technol.*, **6**, 2223-2253, 2003.
- Fang D., Hsiao B. S. and Chu B., Multiple-Jet Electrospinning of Nonwoven Nanofiber, *Polym. Prepr., Am. Chem. Soc., Div. Polym. Chem.*, **44**, 59-66, 2003.
- Ding B., Kimura E., Sato T., Fujita S. and Shiratori S., Fabrication of Blend Biodegradable Nanofibrous Nonwoven Mats via Multi-jet Electrospinning, *Polymer*, **45**, 1895-1902, 2004.
- Jalili R., Hosseini S. A. R. and Morshed M., The Effects of Operating Parameters on the Morphology of Electrospun Polyacrylonitrile Nanofibers, *Iran. Polym. J.*, **14**, 1074-1081, 2005.
- Shin Y. M., Hohman M. M., Brenner M. P. and Rutledge G. C., Experimental Characterization of Electrospinning: The Electrically Forced Jet and Instabilities, *Polymer*, **42**, 9955-9967, 2001.