



# الکتروریسی نانوالیاف آرایش یافته و اندازه گیری سرعت الکتروریسی با استفاده از جت چرخان

مهرداد خامفروش<sup>۱\*</sup>، فرزاد دبیریان<sup>۲</sup>، سروه ماجدی<sup>۱</sup>

۱- سنندج، دانشگاه کردستان، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی شیمی، کدپستی ۶۶۱۷۷

۲- اصفهان، دانشگاه صنعتی اصفهان، دانشکده مهندسی نساجی، کدپستی ۸۴۱۵۶

دریافت: ۸۷/۴/۱۳، پذیرش: ۸۷/۵/۲۰

## چکیده

این پژوهش، بر مبنای ایده جدیدی استوار است که از آن می توان برای تولید نانوالیاف موازی شده حول یک محور به شکل بسیار موثر و آسان بهره گرفت. در حقیقت روش متداول الکتروریسی برای تولید نانوالیاف پلیمری به منظور آرایش دادن به الیاف و موازی سازی آنها اصلاح شده است. رمز موفقیت این روش ایجاد جت چرخان با استفاده از استوانه فلزی توخالی است. در این روش، از ریسندگی ای در مرکز استوانه ای فلزی توخالی برای ریسندگی استفاده شده است. در این حالت جت خارج شده از ریسندگی شروع به چرخش می کند و نانوالیاف پلیمری روی دیواره داخلی استوانه جمع آوری می شود. مهم ترین مزیت این روش نسبت به سایر روش ها، تولید نانوالیاف موازی شده به طور پیوسته در محدوده ای گسترده تر است. در این روش، می توان نانوالیاف موازی شده را با طول های بلند در محدوده چند ده متر نیز تولید کرد. این شیوه جمع آوری، محاسبه سرعت تولید نانوالیاف را برای اولین بار میسر کرده است. از این رو، مهم ترین عوامل اثرگذار بر سرعت الکتروریسی یعنی غلظت پلیمر، قطر استوانه و ولتاژ بررسی شده است. برای این منظور ولتاژ الکتروریسی از ۶ تا ۱۶ kV تغییر داده شد، قطر استوانه از ۲۰ تا ۵۰ cm افزایش داده شد و از محلول ۱۵ تا ۱۹ درصد وزنی پلی آکریلونیتریل استفاده شد.

## واژه های کلیدی

پلی آکریلونیتریل،  
جمع کننده استوانه ای توخالی،  
نانوالیاف تک محوری،  
موازی سازی الیاف،  
الکتروریسی پیوسته

\* مسئول مکاتبات، پیام نگار:

[m.khamforoush@uok.ac.ir](mailto:m.khamforoush@uok.ac.ir)

## Alignment of Electrospun Nanofibers and Prediction of Electrospinning Linear Speed Using a Rotating Jet

M. Khamforoush<sup>1\*</sup>, F. Dabirian<sup>2</sup>, and S. Majedi<sup>1</sup>

1. Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, University of Kurdistan, Sanandaj-66177, Iran.

2. Department of Textile Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan-84156, Iran

Received 4 July 2009, accepted 11 August 2009

## Abstract

A new and effective electrospinning method has been developed for producing aligned polymer nanofibers. The conventional electrospinning technique has been modified to fabricate nanofibers as uniaxially aligned array. The key to the success of this technique is the creation of a rotating jet by using a cylindrical collector in which the needle tip is located at its center. The unique advantage of this method among the current methods is the ability of apparatus to weave continuously nanofibers in uniaxially aligned form. Fibers produced by this method are well-aligned, with several meters in length, and can be spread over a large area. We have employed a voltage range of (6-16 kV), a collector diameter in the range of 20-50 cm and various concentrations of PAN solutions ranging from 15 wt% to 19 wt %. The electrospun nanofibers could be conveniently formed onto the surface of any thin substrate such as glass sampling plate for subsequent treatments and other applications. Therefore, the linear speed of electrospinning process is determined experimentally as a function of cylindrical collector diameter, polymer concentration and field potential difference.

## Key Words

polyacrylonitrile,  
hollow cylindrical collector,  
uniaxial nanofibers,  
fiber alignment,  
continuous electrospinning

(\* To whom correspondence should be addressed.

E-mail: [m.khamforoush@uok.ac.ir](mailto:m.khamforoush@uok.ac.ir)

## مقدمه

الکتروریسی فنی است که به کمک آن می توان نانوالیاف پلیمری منفرد و ممتد را با طول های نسبتاً بلند تولید کرد. اگرچه واژه الکتروریسی برای اولین بار در سال ۱۹۹۵ توسط Doshi و Reneker [۱] به کار گرفته شد. اما، تولید لیاف پلیمری بسیار نازک با استفاده از جت پلیمری القا شده در میدان الکتروستاتیک سابقه ای طولانی دارد [۲،۳]. به طور کلی، دستگاه الکتروریسی متداول از چهار بخش اساسی تشکیل شده است [۱]:

- لوله باریک فلزی نظیر سوزن سرنگ به عنوان ریسنده،
- منبع تغذیه ولتاژ زیاد جریان مستقیم برای ایجاد میدان الکتروستاتیک،
- پمپ خوراک برای تنظیم سرعت حجمی جریان محلول یا مذاب پلیمر خروجی از ریسنده و
- جمع کننده لیاف که می تواند صفحه فلزی مسطح ایستا از جنس آلومینیم باشد.

در دستگاه الکتروریسی متداول معمولاً قطب مثبت منبع تغذیه به ریسنده و قطب منفی آن به جمع کننده فلزی متصل می شود. محلول یا مذاب پلیمری به وسیله پمپ خوراک به داخل ریسنده تزریق می شود. زمانی که قطره پلیمر آویخته شده از نوک ریسنده تحت تأثیر میدان الکتریکی ولتاژ زیاد قرار می گیرد، به شدت شارژ شده و بارهای الکتریکی در سطح قطره پراکنده می شوند. در چنین وضعیتی قطره تحت تأثیر دو نوع نیروی الکتروستاتیک قرار می گیرد، دافعه الکتریکی میان بارهای الکتریکی ایجاد شده در سطح قطره و نیروی کولن که به وسیله میدان الکتریکی اعمال می شود. در اثر برهم کنش این دو نیرو قطره کروی کشیده شده و به شکل مخروط موسوم به مخروط تیلور تغییر شکل می دهد [۴،۵]. با افزایش ولتاژ و رسیدن به ولتاژی بحرانی، نیروهای کولنی می توانند برکشش سطحی قطره پلیمر غلبه کنند و باعث ایجاد جتی پایدار از نوک مخروط تیلور شوند. جت پلیمری شکل گرفته با سرعت زیاد به سمت جمع کننده فلزی کشیده می شود. پس از طی مسیر کوتاهی دافعه متقابل شارژهای حمل شده در سطح جت باعث ایجاد ناپایداری هایی در حرکت جت می شوند. بروز این ناپایداری ها جت را خم کرده، باعث می شود مسیر مستقیم جت به شکل مسیر مارپیچ حلقوی شکل تبدیل شود. در نتیجه جت با حرکتی کاملاً شلاقی به سمت جمع کننده می رود [۶،۷]. بنابراین، جت در فاصله نسبتاً کم میان نوک ریسنده تا جمع کننده (فاصله ریسندگی)، مسیر بسیار طولانی را طی می کند. به عبارت دیگر، جت پلیمری کشسان تحت تأثیر نیروهای الکتریکی هزاران بار کشیده شده و نازک می شود. این کشیدگی بسیار زیاد، جت پلیمری را بسیار باریک می کند، قطر آن را تا زیر میکرون و حتی تا چند ده نانومتر کاهش می دهد. سرانجام، حلال تبخیر یا مذاب سرد شده و نانوالیافی ممتد و بی بافت به شکلی کاملاً تصادفی روی

جمع کننده فلزی تولید می شود. باید اضافه کرد که نانوالیاف بدون آرایش تولید شده با روش توصیف شده (روش متداول) فقط کاربردهای محدودی در ساخت غشاها [۸،۹]، داربست های مهندسی بافت [۱۰،۱۱]، حس گرها [۱۲]، کاتالیزورها [۱۳] و زخم پوش ها [۱۴] دارد.

یکی از چالش های عمده در کاربرد گسترده نانوالیاف پلیمری در عرصه های مختلف صنعتی، تولید کنترل شده نانوالیاف به شکل آرایش یافته حول یک محور است. تاکنون تلاش هایی برای موازی سازی نانوالیاف تولید شده به روش الکتروریسی انجام شده است. اما، هنوز روش های مناسب و کاملاً موفق برای کنترل و جمع آوری نانوالیاف به طور منظم به منظور انجام عملیات های تکمیلی یا بررسی خواص مختلف نانوالیاف (نظیر تعیین استحکام دسته های لیاف الکتروریسی شده) ارائه نشده است. روش های موجود را می توان در دو گروه اصلی دسته بندی کرد. روش هایی که با تغییر ساختار جمع کننده موفق به موازی سازی و جمع آوری نانوالیاف حول یک محور شده اند و روش هایی که با اصلاح و کنترل میدان الکتروستاتیک این کار را انجام می دهند. در این خصوص Doshi و Reneker [۱] از جمع کننده سیلندری چرخان با سرعت چرخش زیاد به جای صفحه فلزی مسطح برای موازی سازی نانوالیاف تولید شده استفاده کرده اند.

Sundaray و همکاران [۱۵] سوزن نوک تیزی را با پتانسیل منفی برای بهبود آرایش یافتگی لیاف در روش قبلی در داخل استوانه چرخان دقیقاً در زیر ریسنده قرار دادند.

Theron و همکاران [۱۶،۱۷] صفحه ای با لبه های تیز را به منظور جمع آوری لیاف به شکل موازی به کار گرفته اند. در این روش لیاف جمع آوری شده و لیاف در حال تولید هر دو دارای شارژ الکتریکی هم نام بودند. بنابراین، دافعه ایجاد شده میان این دو دسته از لیاف به توازی بیشتر و تک محوری شدن نانوالیاف کمک می کند.

روش های دیگر با اصلاح میدان الکتروستاتیکی و کنترل ناپایداری خم شدگی موفق به جمع آوری نانوالیاف آرایش یافته شده اند. Deitzel و همکاران [۱۸] با القای میدان الکتریکی خارجی به کمک منبع تغذیه فشار قوی هم نام با منبع تغذیه اولیه نیروی خارجی بر جت شکل گرفته وارد کرده اند و بدین ترتیب برای کنترل مقدار ناپایداری و جلوگیری از حرکت شلاقی برای الکتروریسی تلاش کرده اند.

Tan و همکاران [۱۹] استفاده از قابی فلزی را برای جمع آوری نانوالیاف پیشنهاد کرده اند. در این روش، لیف شارژ شده هنگامی که به نزدیکی قاب فلزی می رسد، از دو طرف کشیده شده و در عرض قاب قرار می گیرد.

Li و همکاران [۲۰] به جای استفاده از قاب فلزی از دو صفحه فلزی متصل شده به زمین، که بین لبه عرضی آنها فاصله خالی وجود دارد،

بر مقدار تولید نانوالیاف پلی آکریلونیتریل الکتروریسی شده با روش متداول را بررسی کرده اند. اما، سرعت خطی الکتروریسی را اندازه گیری نکرده اند. در واقع آنها تلاش کردند تا عوامل افزایش دهنده مقدار تولید نانوالیاف را بدون تغییر در قطر شناسایی کنند.

## تجربی

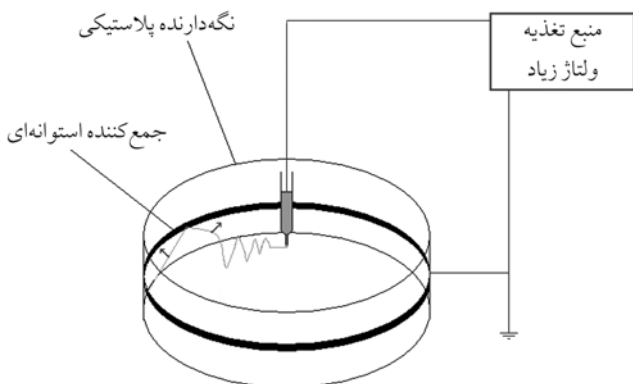
### مواد

در این پژوهش، از پلی آکریلونیتریل صنعتی (PAN) محصول شرکت پلی آکریل ایران با وزن های مولکولی متوسط وزنی و عددی ۷۰۰۰۰ به عنوان پلیمر استفاده شده است. از دی متیل فرامید (DMF) محصول شرکت Merck به عنوان حلال استفاده شده است. محلول های پلیمری با غلظت های ۱۵، ۱۶، ۱۷، ۱۸ و ۱۹ درصد وزنی از حل کردن مقادیر مختلف PAN در حلال DMF تهیه شد. این محلول های پلیمری با استفاده از هم زن مغناطیسی در دمای ۴۵-۵۰°C تهیه شدند. عمل اختلاط به مدت ۲ h به طول انجامید. به منظور تثبیت و تکمیل فرایند انحلال، محلول های تهیه شده به مدت ۲ h دیگر در حمام آب گرم یا داخل گرم خانه با دمای ۶۰°C قرار گرفتند.

### دستگاه ها

#### دستگاه الکتروریسی اصلاح شده و ساز و کار موازی سازی

نمایی از دستگاه الکتروریسی اصلاح شده در این پژوهش در شکل ۱ نشان داده شده است. دستگاه اصلاح شده شبیه همان دستگاه الکتروریسی متداول است، با این تفاوت که بخش جمع کننده الیاف به کمک استوانه ای فلزی توخالی از جنس استیل انعطاف پذیر به ارتفاع



شکل ۱ - طرح کلی دستگاه الکتروریسی اصلاح شده با جمع کننده استوانه ای توخالی برای تولید نانوالیاف موازی.

استفاده کرده اند. جلیلی و همکاران [۲۱] با قرار دادن صفحه شیشه ای به جای فاصله خالی، جمع کننده الیاف را در روش قبلی اصلاح کردند. به کارگیری صفحه شیشه ای اثری بر موازی سازی ندارد و فقط باعث حفاظت از الیاف شده، از پاره شدن در اثر جریان هوا و وزن الیاف جلوگیری می کند. هم چنین، از درهم شدن الیاف در اثر دفعه متقابل الیاف در حال تولید ممانعت می کند. مهم ترین مزیت این روش تولید الیاف با ضریب شکست مضاعف (موازی شده با آرایش یافتگی درون مولکولی) است. اما، نانوالیاف تولید شده در این روش طول های بسیار کوتاهی به اندازه فاصله بین دو صفحه (حداکثر ۳ cm تا ۴ cm) دارند.

تمام روش های یاد شده دارای نقطه ضعف هایی هستند. به عنوان مثال نمی توان از آنها برای تولید نانوالیاف موازی شده بلند استفاده کرد. هم چنین، برای تولید الیاف به هم پیوسته موازی روی سطحی نسبتاً گسترده دارای محدودیت هستند. در این پژوهش، روشی بسیار مؤثر و در عین حال ساده برای اولین بار فقط با اصلاح شکل جمع کننده فلزی و طریقه قرار گرفتن ریسنده نسبت به آن ارائه شده است. این روش محدودیت های موجود در روش های قبلی را کاملاً مرتفع کرده است. به کمک این روش می توان نانوالیاف را به طور پیوسته بدون انقطاع حول یک راستا با هر طولی تولید کرد که با روش های قبلی تولید چنین نانوالیافی امکان پذیر نیست. در این روش، می توان الیاف را روی سطحی نسبتاً گسترده و برای انجام مراحل تکمیلی روی الیاف یا عملیات دیگر نیز تولید کرد. نکته حائز اهمیت درباره این روش در مقایسه با سایر روش ها این است که در آن از هیچ نوع وسیله جانبی به جز چهار بخش اصلی دستگاه الکتروریسی که پیشتر توضیح داده شد، استفاده نمی شود. به عبارت دیگر، در روش مزبور نیازی به استفاده از موتور DC یا اعمال میدان الکتریکی خارجی نیست. از این رو، می توان با توجه به قابلیت های این روش (سادگی و کارایی زیاد) آن را به عنوان گزینه مناسبی برای تولید نانوالیاف موازی در مقیاس صنعتی در نظر گرفت. هم چنین، ساختار ویژه دستگاه الکتروریسی اصلاح شده در این جا امکان آن را می دهد که اثر عوامل مختلف فرایند الکتروریسی نظیر غلظت، ولتاژ و فاصله ریسندگی را روی سرعت الکتروریسی پیش بینی کرد. در ادامه جزئیات روش اصلاح شده الکتروریسی تشریح می شود و ساختار نانوالیاف تولید شده تک محوری به وسیله میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترون پویشی بررسی می شود. سپس اثر غلظت پلیمر، ولتاژ (قدرت میدان الکتریکی) و فاصله ریسندگی به طور تجربی روی سرعت الکتروریسی با روشی ابداعی مطالعه می شود. لازم به ذکر است، سرعت فرایند الکتروریسی تاکنون به روش تجربی اندازه گیری نشده است. البته باید اشاره کرد که جلیلی و همکاران [۲۲] در پژوهشی فقط عوامل اثر گذار

۴ cm جای گزین شده است. هم چنین، نوک ریسنده به شکل عمودی در مرکز استوانه در برابر دیواره های داخلی استوانه قرار داده شده است. این اصلاح به ظاهر ساده اثر شگرفی بر نحوه جمع آوری الیاف به شکل کاملاً آرایش یافته حول یک محور می گذارد.

در روش جمع آوری الیاف به وسیله سیلندر چرخان [۱،۱۵] جمع کننده سیلندری به کمک موتور DC پرسرعت می چرخد و الیاف روی جداره خارجی استوانه به شکل آرایش یافته جمع آوری می شوند. مهم ترین نقطه ضعف این روش کنترل سرعت چرخش موتور است، به طوری که الیاف پاره می شوند و نمی توان به سهولت الیافی پیوسته با طول بلند تولید کرد. اما در روش پیشنهاد شده در این پژوهش، با توجه به این که ریسنده در مرکز استوانه در امتداد محور استوانه دقیقاً در مقابل جداره های داخلی استوانه قرار می گیرد، الیاف روی بدنه داخلی استوانه جمع آوری می شود و سرعت الکتروریسی به کمک عوامل فرایندی به طور خود به خودی تنظیم می شود.

مهم ترین مزیت این روش نسبت به روش استوانه چرخان عدم نیاز به موتور برای چرخش استوانه است. افزون بر آن، می توان الیاف پیوسته را با هر طولی بر جداره داخلی استوانه تولید کرد. هم چنین باید اشاره کرد، در روش استفاده از استوانه چرخان، در انتخاب قطر بیرونی استوانه محدودیت وجود دارد، زیرا با انتخاب استوانه های بزرگ تر به موتورهای قوی تری برای چرخاندن آنها نیاز است. در حالی که در روش پیشنهاد شده در پژوهش حاضر، به راحتی می توان قطر استوانه ها را تا جایی که الکتروریسی امکان پذیر باشد، بدون نیاز به هیچ وسیله جانبی تغییر داد.

برای بررسی آرایش نانوالیاف تولید شده با روش الکتروریسی اصلاح شده میکروسکوپ نوری مدل Olympus-BX60, Hund Wetzlar و میکروسکوپ الکترون پویشی مدل XL-30 ساخت شرکت Philips به کار گرفته شد.

### اندازه گیری سرعت الکتروریسی

همان طور که قبلاً اشاره شد، در این مطالعه برای اولین بار سرعت خطی الکتروریسی به طور تجربی با روشی ساده بر حسب عوامل مهم اثرگذار بر فرایند الکتروریسی نظیر غلظت، ولتاژ و فاصله ریسندگی پیش بینی شد. برای این منظور از غلظت های ۱۵، ۱۶، ۱۷، ۱۸ و ۱۹ درصد وزنی پلیمر پلی آکریلونیتریل در حلال دی متیل فرامید استفاده شد. هم چنین، برای هر کدام از این غلظت ها، مگر این که قبلاً اشاره شده باشد، ولتاژ الکتروریسی از ۶ تا ۱۶ kV، با مقدار تغییر ۲ kV افزایش یافت. در این پژوهش، فاصله ریسندگی (فاصله میان نوک ریسنده تا جمع کننده) همان شعاع داخلی استوانه بود. برای بررسی اثر این عامل بر سرعت ریسندگی، چهار استوانه با چهار قطر مختلف ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ cm به کار

### روش ها

برای انجام الکتروریسی محلول پلیمری داخل سرنگ ۱ mL ریخته می شود و از سر سرنگ فلزی با ابعاد ۰/۵×۲۵ mm به عنوان ریسنده استفاده می شود. سوزن ریسنده به قطب مثبت منبع جریان مستقیم ولتاژ زیاد و قطب منفی منبع تغذیه به جمع کننده استوانه ای شکل متصل می شود. محلول پلیمری به وسیله پمپ خوراک به طور پیوسته با شدت جریانی در بازه ۰/۳ - ۰/۱ mL/h به داخل ریسنده تزریق می شود. در میدان الکتریکی مخروط تیلور شکل می گیرد و هنگامی که اختلاف پتانسیل میان قطره آویخته شده از ریسنده و جمع کننده استوانه ای توخالی افزایش می یابد در ولتاژ بحرانی (در این مطالعه محدوده ولتاژ بحرانی

چهار لام آزمایشگاهی با ابعاد  $2/5 \times 7/5$  cm دو به دو مقابل یک دیگر بر بدنه داخلی استوانه نصب شد، طوری که فاصله هر لام تا لام دیگر برابر باشد. لازم به ذکر است، امتداد طولی لام‌ها در امتداد ارتفاع استوانه قرار می‌گیرد. سپس، فرایند الکتروریسی در مدت زمان نسبتاً کوتاه بین ۵ تا ۱۰ s انجام شد. برای اندازه‌گیری زمان الکتروریسی از زمان سنج الکترونیکی با دقت  $0/01$  s استفاده شد. پس از انجام الکتروریسی بخشی از نانوالیاف تشکیل شده روی جداره داخلی استوانه در امتداد عرضی لام‌ها قرار می‌گیرند. سپس، دو سر الیاف تشکیل شده روی لام به کمک تیغی تیز بریده شده، لام‌ها همراه با نمونه‌های تشکیل شده بر سطح آنها برداشته می‌شوند.

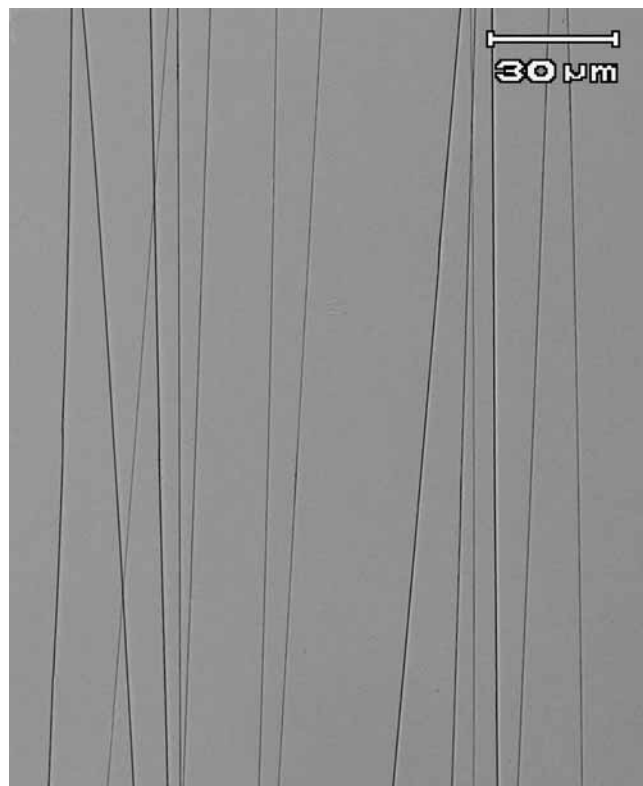
با استفاده از یک میکروسکوپ نوری تعداد الیاف تشکیل شده روی هر چهار لام شمرده شدند و تعداد متوسط الیاف روی لام‌ها محاسبه شد. همان‌طور که قبلاً اشاره شد، هر لیف قرار گرفته روی لام‌ها در واقع بخش کوچکی از لیفی بزرگ است که به شکل دایره وار بر محیط داخلی استوانه تشکیل شده است. بنابراین، برای محاسبه طول کامل هر لیف باید تعداد متوسط الیاف شمارش شده را در محیط داخلی استوانه ضرب کرد. حاصل، طول لیف الکتروریسی شده در مدت زمان نسبتاً کوتاه اندازه‌گیری شده است. از تقسیم طول لیف الکتروریسی شده بر زمان الکتروریسی به سادگی می‌توان سرعت الکتروریسی را محاسبه کرد. لازم به ذکر است، برای جلوگیری از ایجاد خطا و تشکیل جامعه آماری نرمال برای هر دسته از عوامل گفته شده هر آزمایش ۲۰ مرتبه تکرار شد و تکرارهای با تعداد الیاف کم حذف شدند. در نهایت میانگین هر دسته با سایر دسته‌ها مقایسه شد.

## نتایج و بحث

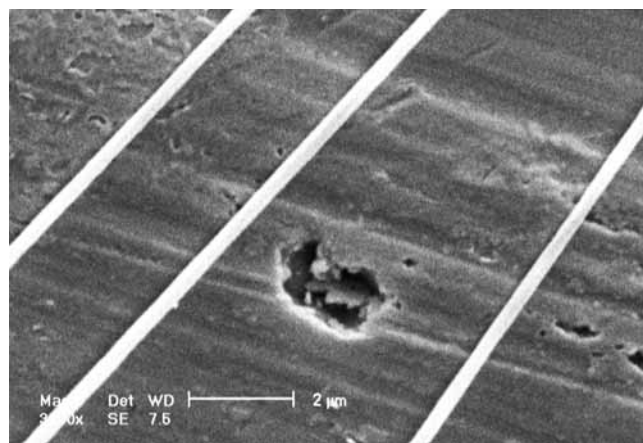
### ویژگی‌ها و آرایش نانوالیاف

برای بررسی آرایش نانوالیاف تولید شده با روش الکتروریسی اصلاح شده با جت چرخان در داخل استوانه توخالی، میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترون پویشی به کار گرفته شد.

شکل ۲- الف تصویر میکروسکوپی نمونه از نانوالیاف پلی‌آکریلونیتریل را نشان می‌دهد که به کمک محلول ۱۷ درصد وزنی تولید شده است. در این آزمایش نمونه، ولتاژ الکتروریسی  $12$  kV و قطر استوانه  $50$  cm انتخاب شده است. تصویر میکروسکوپی آشکارا نشان می‌دهد که نانوالیاف پلیمری حول محوری کشیده شده‌اند. هم‌چنین، باید تصریح کرد که هر لیف نشان داده شده در تصویر در واقع بخش کوچکی از لیفی بلند است که به شکل دایره وار بر سطح داخلی استوانه



(الف)



(ب)

شکل ۲ - تصویر میکروسکوپی از نانوالیاف پلی‌آکریلونیتریل موازی شده حول یک محور به ترتیب با غلظت‌های ۱۷ و ۱۵ درصد وزنی تولید شده در داخل جمع‌کننده با قطر  $50$  cm و اختلاف پتانسیل  $12$  kV: (الف) نوری و (ب) الکترون پویشی (با بزرگ‌نمایی  $3000\times$ ).

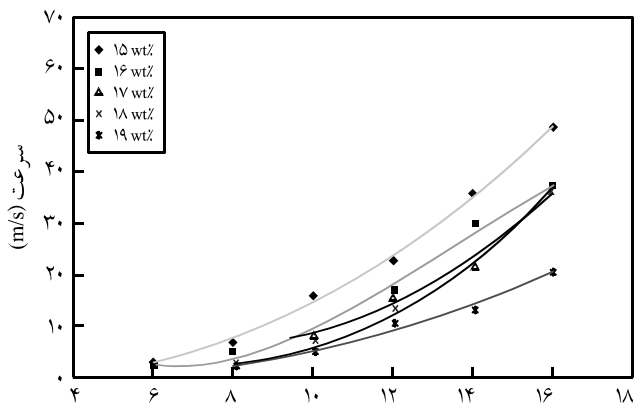
گرفته شد. هم‌چنین، در تمام آزمایش‌ها از استوانه‌هایی با ارتفاع  $4$  cm استفاده شده است. همه آزمایش‌ها در دمای  $26 \pm 1^\circ\text{C}$  و رطوبت نسبی  $40 \pm 5$  درصد انجام شده است. برای هر دسته از این عوامل سرعت خطی الکتروریسی به کمک روش ابتکاری اندازه‌گیری شد. برای این منظور

برای تهیه نمونه شکل ۲-ب از ولتاژ ۱۲kV در داخل استوانه هایی با قطر ۵۰ cm و محلول پلیمری ۱۵ درصد وزنی استفاده شده است. شایان ذکر است، در این پژوهش اثر عوامل مختلف فرایند الکترورسی بر مقدار موازی سازی الیاف بررسی نشده است. فقط به طور کیفی مشاهده شد، افزایش غلظت پلیمر و قطر استوانه در بهبود درجه موازی سازی اثر مستقیم دارد. هم اکنون، ارتباط میان این عوامل بر درجه موازی سازی در این گروه پژوهشی در حال بررسی است.

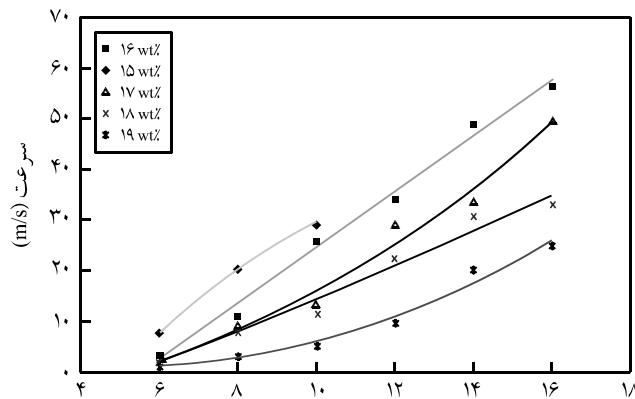
کشیده شده است، یعنی نانوالیاف الکترورسی شده با این روش بسیار بلند هستند و ده ها متر طول دارند. تصویر SEM نمونه در شکل ۲-ب نشان داده شده است. این تصویر و سایر تصاویر گرفته شده در حین آزمایش ها نشان دادند که الیاف آرایش یافته حول یک محور، هنگامی که غلظت محلول پلیمر از ۱۵ تا ۱۹ درصد وزنی تغییر می کند، دارای قطری در بازه ۴۵۰ تا ۱۰۰۰ nm هستند.

جدول ۱ - سرعت متوسط الکترورسی در جمع کننده با قطرهای مختلف بر حسب اختلاف پتانسیل و غلظت وزنی محلول پلی آکریلونیتریل (اعداد داخل پرانتز مقادیر انحراف معیار سرعت الکترورسی در ۲۰ آزمایش است).

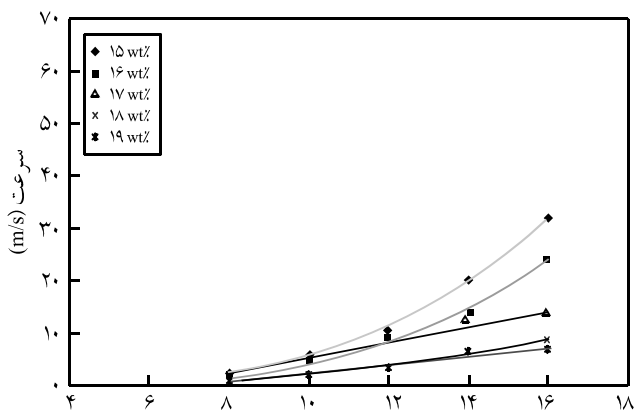
| سرعت متوسط (m/s) |                 |                 |                 |                  | اختلاف پتانسیل (kV) | قطر (cm) |
|------------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------------|---------------------|----------|
| ۱۹ wt%           | ۱۸ wt%          | ۱۷ wt%          | ۱۶ wt%          | ۱۵ wt%           |                     |          |
| ۱/۶۷(۰/۵۱)       | ۲/۷۷(۰/۵۴)      | ۲/۶۵(۰/۶۶)      | ۳/۵۱(۰/۷۶)      | ۷/۸۱(۲/۷۴)       | ۶                   | ۲۰       |
| ۳/۲۹(۰/۶۳۹)      | ۷/۹۷(۱/۷۵۴)     | ۹/۳۶(۰/۷۹)      | ۱/۱۳(۱/۲۲)      | ۲۰/۳۵(۳/۵۹)      | ۸                   |          |
| ۵/۲۵(۰/۱۴)       | ۱/۶۴(۱/۸۹۴)     | ۱۳/۴۹(۱/۵۷)     | ۲۶/۰۸(۳/۱۷)     | ۲۹/۶۶(۴/۲۸)      | ۱۰                  |          |
| ۹/۶۷(۰/۹۸)       | ۲/۲۰(۱/۸۲۴)     | ۲۹/۳۵(۱/۸۴)     | ۳۴/۰۴(۳/۶۰)     | -                | ۱۲                  |          |
| ۲۰/۴۸(۳/۴۷)      | ۳۰/۷۰(۳/۷۳)     | ۳۳/۵۵(۳/۱۰)     | ۴۸/۸۹(۹/۰۳)     | -                | ۱۴                  |          |
| ۲۴/۹۹(۲/۱۷)      | ۳۳/۳۳(۱/۸۴)     | ۴۹/۷۸(۴/۷۰)     | ۵۶/۵۰(۵/۷۳)     | -                | ۱۶                  |          |
| -                | -               | -               | ۲/۱۲(۰/۳۸)      | ۲/۹۷(۱/۰۵)       | ۶                   | ۳۰       |
| ۷/۸۲(۰/۶۱۵۰۳۱)   | ۲/۳۹(۰/۹۰۳۲۵۵)  | ۳/۱۲(۰/۷۸۶۱۱۸)  | ۴/۹۰(۰/۹۴)      | ۷/۱۳(۱/۰۹)       | ۸                   |          |
| ۴/۸۷(۱/۰۰۳۹۳)    | ۷/۱۰(۱/۱۷۹۵۵۹)  | ۸/۰۱(۱/۸۳۲۲۰۷)  | ۸/۸۵(۱/۶۹)      | ۱۵/۷۹(۱/۷۶)      | ۱۰                  |          |
| ۱۰/۳۹(۱/۵۴۱۷۹)   | ۱۳/۳۱(۳/۹۶۴۳۲)  | ۱۵/۲۴(۳/۰۸۱۲۱۸) | ۱۷/۰۰(۱/۷۱)     | ۲۲/۸۶(۲/۹۹)      | ۱۲                  |          |
| ۱۳/۱۳(۲/۱۱۴۸۵)   | ۲۰/۲۰(۶/۴۳۱۸۱۶) | ۲۱/۸۱(۶/۹۰۲۲۷۸) | ۲۹/۸۴(۶/۹۶)     | ۳۵/۸۲(۹/۸۱)      | ۱۴                  |          |
| ۲۷/۰۳(۸/۳۲۸۱۷۲۸) | ۳۶/۸۳(۱۲/۸۱۷۷۷) | ۳۶/۹۰(۶/۸۷۳۳۶۵) | ۳۷/۱۹(۵/۶۶)     | ۴۸/۸۵(۱۰/۲۸)     | ۱۶                  |          |
| -                | -               | -               | -               | ۷/۹۱(۰/۴۰۱۲۲۸)   | ۶                   | ۴۰       |
| ۱/۲۶(۰/۲۹۷۷۹)    | ۱/۷۲(۰/۴۴۴۴۸۱)  | ۱/۹۵(۰/۶۸۱۷۷۵۹) | ۲/۰۳(۰/۲۹۴۳۵۳)  | ۴/۰۹(۰/۷۴۰۳۲۷)   | ۸                   |          |
| ۲/۵۱(۰/۳۸۹۸۹۴)   | ۴/۲۵(۰/۵۰۷۲۴۳)  | ۴/۰۲(۱/۱۱۶۲۶۴)  | ۴/۶۹(۱/۱۹۶۱۶۱)  | ۶/۹۳(۱/۳۹۷۲۸)    | ۱۰                  |          |
| ۴/۹۹(۰/۵۹۹۷۸۳)   | ۶/۶۵(۱/۳۸۳۵۴)   | ۱۰/۸۰(۱/۸۹۰۶۹۶) | ۱۰/۸۷(۲/۶۰۵۷۷۲) | ۱۳/۱۳(۲/۴۳۴۲۴)   | ۱۲                  |          |
| ۷/۴۱(۱/۹۷۴۵۲۷)   | ۱/۴۳(۲/۶۶۹۸۳)   | ۱۷/۷۶(۵/۰۶۰۳۷۵) | ۱۸/۷۴(۶/۷۵۱۷۱۶) | ۲۳/۵۶(۳/۹۹۱۵۳۵)  | ۱۴                  |          |
| ۱۰/۲۶(۱/۴۲۲۶۶۳)  | ۱۲/۲۴(۳/۱۸۲۲۸۷) | ۲۳/۴۷(۶/۲۴۱۶۷۲) | ۲۶/۵۷(۵/۸۸۹۶۶۹) | ۳۶/۸۵(۶/۸۶۸۰۴۳)  | ۱۶                  |          |
| -                | -               | -               | -               | -                | ۶                   | ۵۰       |
| ۰/۸۸(۰/۲۲۵۶۶۲)   | ۰/۹۶(۰/۲۷۹۸۶۷۲) | ۱/۸۵(۰/۸۲۷۱۲۹۲) | ۲/۰۵(۰/۴۲۶۸۳۶۷) | ۲/۶۵(۰/۷۳۹۷۹۴۳)  | ۸                   |          |
| ۱/۹۲(۰/۲۱۰۲۰۶)   | ۲/۰۷(۰/۵۹۶۹۱۵)  | ۳/۸۵(۱/۰۱۳۳۷۸)  | ۴/۲۳(۰/۷۴۰۸۱۱)  | ۵/۸۱(۰/۴۰۸۰۵۸)   | ۱۰                  |          |
| ۳/۲۸(۰/۱۸۲۹۸۷)   | ۳/۲۷(۰/۹۳۰۴۲)   | ۸/۴۱(۲/۳۷۲۸۴۹)  | ۹/۰۴(۳/۳۴۱۱۴۱)  | ۱۰/۴۲(۲/۸۱۷۵۵۰۴) | ۱۲                  |          |
| ۶/۶۰(۱/۰۵۶۳۹۹)   | ۶/۶۱(۱/۶۴۳۳۶۲)  | ۱۲/۵۰(۱/۷۳۲۴۵۷) | ۱۴/۱۴(۳/۸۱۹۰۶۳) | ۲۰/۳۲(۴/۷۷۱۶۳۳)  | ۱۴                  |          |
| ۶/۶۶(۱/۳۸۴۹۵)    | ۸/۶۰(۲/۶۶۰۲۶)   | ۱۳/۱۴(۳/۶۸۰۳۴۴) | ۲۴/۱۷(۵/۳۴۲۰۴۱) | ۳۱/۸۵(۵/۴۶۶۴۷)   | ۱۶                  |          |



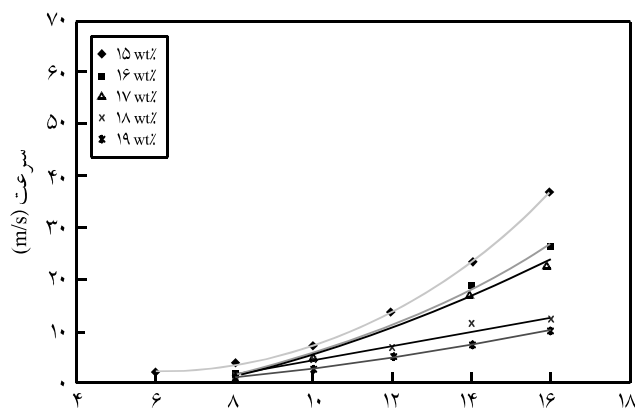
ولتاژ (kV)  
(ب)



ولتاژ (kV)  
(الف)



ولتاژ (kV)  
(د)

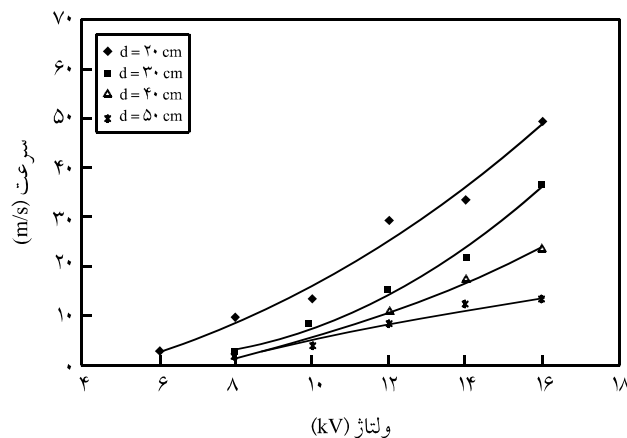


ولتاژ (kV)  
(ج)

شکل ۳- سرعت متوسط الکترورسی بر حسب ولتاژ در غلظت های وزنی مختلف محلول پلی آکریلونیتریل برای جمع کننده با قطرهای مختلف: (الف) ۲۰ cm، (ب) ۳۰ cm، (ج) ۴۰ cm و (د) ۵۰ cm.

### سرعت خطی الکترورسی

همان طور که قبلاً اشاره شد، در این پژوهش وابستگی سرعت الکترورسی به تعدادی از عوامل اثرگذار بر فرایند الکترورسی یعنی غلظت، ولتاژ و فاصله ریسندگی به طور اصولی بررسی شده است. برای این منظور ولتاژهای ۶، ۸، ۱۰، ۱۲، ۱۴ و ۱۶ kV آزموده شدند. در مواردی که ولتاژ بحرانی بیشتر از ۶ kV بود (هنگامی که غلظت پلیمر و قطر استوانه افزایش می یافت) از انجام آزمایش در ولتاژ ۶ kV صرف نظر می شد. افزون براین، در الکترورسی محلول پلیمر با غلظت ۱۵ درصد وزنی در داخل استوانه با قطر ۲۰ cm مقدار آرایش یافتگی و موازی سازی الیاف در ولتاژهای بیشتر از ۱۰ kV کاهش می یابد. بنابراین، چون شمارش تعداد الیاف برای این شرایط به سادگی امکان پذیر نیست، برای این حالت ها، ولتاژهای بیش از ۱۰ kV بررسی



شکل ۴- اثر اندازه قطر جمع کننده بر سرعت الکترورسی در ولتاژهای مختلف برای محلول ۱۷ درصد وزنی پلی آکریلونیتریل.

سرعت خطی الکتروریسی محاسبه شده با استفاده از وزن نانوالیاف تولیدی در شرایط گفته شده  $2175 \text{ m/s}$  است که با سرعت متوسط محاسبه شده با استفاده از روش جت چرخان ( $1579 \text{ m/s}$ ) حدود ۲۶ درصد اختلاف دارد. این اختلاف از آن جا ناشی می شود که نانوالیاف تولید شده دارای توزیع قطری غیریکنواخت هستند و معمولاً قطر نانوالیاف در دامنه ای عرضی تغییر می کند. بنابراین، در این جا چون فقط از مقدار میانگین قطری که متعلق به یک نمونه است، برای محاسبه سرعت خطی الکتروریسی استفاده شده است، وجود چنین خطایی طبیعی به نظر می رسد. عامل دیگر، خطای ناشی از دقت اندازه گیری در توزین وزن های بسیار سبک است. نیاز به تأکید ندارد که اندازه گیری سرعت الکتروریسی بر اساس وزن الیاف تولید شده مستلزم تهیه تصاویر دقیق به کمک میکروسکوپ الکترون پویشی است که چنین امکانی در همه جا فراهم نیست. اما، در روش جت چرخان بدون نیاز به تصاویر SEM تنها به وسیله میکروسکوپ نوری امکان تخمین سرعت الکتروریسی وجود دارد که یکی دیگر از مزایای الکتروریسی با استفاده از روش جت چرخان محسوب می شود.

### نتیجه گیری

در این پژوهش، روشی جدید و بسیار مؤثر برای تولید پیوسته الیاف بسیار ظریف پلیمری آرایش یافته حول یک محور با قطری کمتر از  $1 \mu\text{m}$  تشریح شد. با استفاده از روش معرفی شده می توان نانوالیاف موازی با طول های بلند را در دامنه ای گسترده تر نسبت به روش هایی که تاکنون معرفی شده اند، جمع آوری کرد. رمز موفقیت این روش ایجاد جت چرخان به وسیله جمع کننده استوانه ای توخالی است که نوک سوزن ریسنده در مرکز استوانه در مقابل دیواره های داخلی استوانه واقع شده است. به دلیل اثر القایی نیروهای مختلف الکتروستاتیک، الیاف باردار به شکل افقی روی دیواره داخلی استوانه کشیده شده، جمع آوری می شوند، به طوری که آرایشی نسبتاً منظم و تقریباً موازی از نانوالیاف پلیمری در امتداد ارتفاع استوانه شکل می گیرد. باید اشاره کرد، نانوالیاف الکتروریسی شده در این روش را به سادگی می توان روی هر سطح دیگری نظیر لام های میکروسکوپی یا سطوح دیگر، برای انجام مراحل تکمیلی یا عملیات های بعدی تولید کرد. هم چنین در این پژوهش، آثار عوامل مختلف فرایند الکتروریسی نظیر غلظت محلول پلیمر، ولتاژ الکتروریسی و فاصله ریسندگی روی سرعت تولید نانوالیاف یا سرعت خطی الکتروریسی به طور اصولی بررسی شد. مقایسه نتایج نشان می دهد:

نشده. نتایج نهایی و مقادیر عددی سرعت متوسط الکتروریسی برای مقادیر مختلف عوامل فرایند الکتروریسی در جدول ۱ داده شده است. اثر عوامل مختلف فرایند بر سرعت خطی الکتروریسی در شکل های ۳ و ۴ نشان داده شده است. همان طور که انتظار می رود، سرعت الکتروریسی یا سرعت تولید الیاف با افزایش غلظت محلول پلیمری کاهش می یابد. این رفتار به وضوح در شکل های ۳-الف تا د مشاهده می شود. باید گفت که افزایش قطر جمع کننده استوانه ای در غلظت ثابت همان طور که در شکل ۴ نشان داده شده است، باعث کاهش سرعت الکتروریسی می شود. به عنوان مثال، سرعت الکتروریسی برای محلول با غلظت ۱۵ درصد وزنی در ولتاژ ثابت  $10 \text{ kV}$  هنگامی که قطر جمع کننده از  $20 \text{ cm}$  تا  $50 \text{ cm}$  افزایش می یابد، به ترتیب از  $2966 \text{ m/s}$  تا  $581 \text{ m/s}$  کاهش پیدا می کند. هم چنین در غلظت ثابت، افزایش ولتاژ همان طور که در شکل های ۳-الف تا د مشاهده می شود، سرعت خطی الکتروریسی را افزایش می دهد. مثلاً برای محلول پلی آریلونیتریل با غلظت ۱۷ درصد وزنی با استفاده از جمع کننده با قطر  $20 \text{ cm}$  افزایش صددردی ولتاژ از  $6 \text{ kV}$  تا  $12 \text{ kV}$  باعث  $10$  برابر شدن سرعت الکتروریسی می شود.

برای اطمینان از صحت نتایج به دست آمده به روش پیشنهاد شده در این پژوهش، اگر قطر الیاف الکتروریسی شده در شرایط فرایندی مشابه (ولتاژ، غلظت و فاصله ریسندگی یکسان) در دسترس باشد، می توان با استفاده از وزن الیاف تولید شده در مدت زمان مشخص سرعت خطی الکتروریسی را محاسبه کرد. برای این منظور ورق آلومینیمی به ابعاد  $12 \times 16 \text{ cm}$  به عنوان جمع کننده ایستا در فاصله  $15 \text{ cm}$  ریسنده افقی قرار داده شد و با استفاده از محلول پلیمر ۱۵ درصد وزنی و ولتاژ  $10 \text{ kV}$  برای مدت  $12 \text{ min}$  الکتروریسی انجام شد. سپس، وزن الیاف تولید شده به کمک ترازوی رقمی با دقت  $0.1 \text{ mg}$  اندازه گیری شد. برای افزایش دقت اندازه گیری آزمایش  $20$  مرتبه تکرار و وزن متوسط نانوالیاف در حدود  $0.4 \text{ mg}$  اندازه گیری شد.

برهانی و همکاران [۲۳] قطر متوسط نانوالیاف پلی آریلونیتریل تولید شده در شرایط گفته شده را در حدود  $523 \text{ nm}$  اندازه گیری کرده اند. بدین ترتیب با داشتن چگالی پلی آریلونیتریل ( $1.2 \text{ g/cm}^3$ ) می توان سرعت خطی الکتروریسی را به کمک معادله (۱) محاسبه کرد:

$$V = \frac{m}{\rho t \pi d^2 / 4} \quad (1)$$

در این معادله،  $m$  وزن نانوالیاف (kg)،  $\rho$  چگالی پلی آریلونیتریل ( $\text{kg/m}^3$ )،  $t$  مدت زمان الکتروریسی (s)،  $d$  قطر نانوالیاف (m) و  $V$  سرعت خطی الکتروریسی (m/s) است.



به ترتیب باعث کاهش ۸۷، ۸۲، ۸۰، ۸۸ و ۷۳ درصدی سرعت الکترورسی شده است.

- افزایش ولتاژ باعث افزایش سرعت الکترورسی می شود، به عنوان مثال افزایش ولتاژ از ۸ به ۱۶ kV برای محلول با غلظت ۱۸ درصد وزنی در داخل جمع کننده با قطرهای ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ cm، سرعت الکترورسی به ترتیب در حدود ۴/۱، ۶/۶، ۱۲/۱ و ۱۰/۸ برابر افزایش می یابد.

- با افزایش غلظت پلیمر از ۱۵ به ۱۹ درصد وزنی در اختلاف پتانسیل ثابت، به عنوان مثال در اختلاف پتانسیل ۱۰ kV، سرعت الکترورسی در جمع کننده با قطرهای ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ cm به ترتیب ۸۲، ۶۹، ۶۴ و ۶۷ درصد کاهش می یابد.

- افزایش قطر جمع کننده استوانه ای از ۲۰ تا ۵۰ cm در اختلاف پتانسیل ثابت، به عنوان مثال در اختلاف پتانسیل ۸ kV، برای محلول های پلیمر با غلظت های مختلف ۱۵، ۱۶، ۱۷، ۱۸ و ۱۹ درصد وزنی

## مراجع

- Doshi J. and Reneker D.H., Electrospinning Process and Applications of Electrospun Fibres, *J. Electrostat.*, **35**, 151-160, 1995.
- Formhals A., Process and Apparatus for Preparing Artificial Threads, *US Pat. 1*, 975,504, 1934.
- 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.*, **63**, 2223-2253, 2003.
- Taylor G., Electrically Driven Jets, *Proc. Royal Society of London A*, **313**, 453-475, 1969.
- Reneker D.H. and Chun I., Nanometre Diameter Fibers of Polymer, Produced by Electrospinning, *Nanotechnology*, **7**, 216-223, 1996.
- 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.
- Ritcharoen W., Supaphol P., and Pavasant P., Development of Polyelectrolyte Multilayer-Coated Electrospun Cellulose Acetate Fiber Mat as Composite Membranes, *Eur. Polym. J.*, **44**, 3963-3968, 2008.
- Duan B., Yuan X., Zhu Y., Zhang Y., Li X., Zhang Y., and Yao K., A Nanofibrous Composite Membrane of PLGA-Chitosan/PVA Prepared by Electrospinning, *Eur. Polym. J.*, **42**, 2013-2022, 2006.
- Yang X., Ogbolu, K.R., and Wang H., Multifunctional Nanofibrous Scaffold for Tissue Engineering, *J. Exp. Nanosci.*, **3**, 329-345, 2008.
- Lannutti J., Reneker D., Ma T., Tomasko D., and Farson D., Electrospinning for Tissue Engineering Scaffolds, *Mater. Sci. Eng. C*, **27**, 504-509, 2007.
- Wang X., Drew C., Lee SH, Senecal KJ, Kumar J., and Samuelson L.A., Electrospun Nanofibrous Membranes for Highly Sensitive Optical Sensors, *Nano Letters*, **2**, 1273-1275, 2002.
- Formo E., Lee E., Campbell D., and Xia Y., Functionalization of Electrospun TiO<sub>2</sub> Nanofibers with Pt Nanoparticles and Nanowires for Catalytic Applications, *Nano Letters*, **8**, 668-672, 2008.
- Ignatova M., Manolova N., and Rashkov I., Electrospinning of Poly(vinyl pyrrolidone)-Iodine Complex and Poly(ethylene oxide)/Poly(vinyl pyrrolidone)-Iodine Complex-a Prospective Route to Antimicrobial Wound Dressing Materials, *Eur. Polym. J.*, **43**, 1609-1623, 2007.
- Sundaray B., Subramanian V., and Natarajan T.S., Electrospinning of Continuous Aligned Polymer Fibers, *Appl. Phys. Lett.*, **84**, 1222-1224, 2004.
- Theron A., Zussman E., and Yarin A.L., Electrostatic Field Assisted Alignment of Electrospun Nanofibres, *Nanotechnology*, **12**, 384-390, 2001.
- Theron A., Zussman E., and Yarin A.L., Formation of Nanofiber Crossbars in Electrospinning, *Appl. Phys. Lett.*, **82**, 973-975, 2003.
- Deitzel J.M., Kleinmeyer J.D., Hirvonen J.K., and Tan N.C.B., Controlled Deposition of Electrospun Poly(ethylene oxide) Fibers, *Polymer*, **42**, 8163-8170, 2001.
- Tan E.P.S., Ng S.Y., and Lim C.T., Tensile Testing of a Single Ultrafine Polymer Fiber, *Biomaterials*, **26**, 1453-1456, 2005.

20. Li D., Wang Y., and Y. Xia., Electrospinning of Polymeric and Ceramic Nanofibers as Uniaxially Aligned Arrays, *Nano Letters*, **3**, 1167-1171, 2003.
21. Jalili R., Hosseini S.A.R., and Morshed M., Electrospinning of Uniaxially Aligned and Molecularly Oriented Polyacrylonitrile Nanofibers with Divided Collectors, *Iran. J. Polym. Sci. Technol. (In Persian)*, **4**, 241-248, 2006.
22. Jalili R., Morshed M., and Hosseini S.A.R., Investigation of Parameters Affecting the Productivity of Electrospun Polyacrylonitrile Nanofibers, *Iran. J. Polym. Sci. Technol. (In Persian)*, **2**, 121-130, 2006.
23. Borhani S., Hosseini S.A.R., and Etemad S.G., Evaluation of Surface Roughness of Polyacrylonitrile Nanowebs, *Iran. J. Polym. Sci. Technol. (In Persian)*, **1**, 61-69, 2008.