

مروری بر عملکرد رشته‌سازها در الکتروریسی بدون سوزن

A Review on Performance of Spinnerets in Needleless Electrospinning

ایمان اسماعیل‌زاده، وحید متقی‌طلب^{*}، اکبر خداپرست حقی

رشت، دانشگاه گیلان، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی نساجی، صندوق پستی ۳۷۵۶-۴۱۶۳۵

تاریخ دریافت: ۹۲/۱۱/۱۲ تاریخ پذیرش: ۹۲/۱۲/۱۷

چکیده

الکتروریسی فرایندی ساده و ارزان، برای تولید نانوالیاف پیوسته با قطرهایی در محدوده زیر میکرون تا مقیاس نانومتر، به کمک جت باردار شده از محلول پلیمری است. در گذشته، بیشتر آزمون‌های الکتروریسی با استفاده از یک سوزن انجام می‌شد که از نظر سرعت تولید، حتی در مقیاس آزمایشگاهی پژوهشگران را دچار چالش می‌کرده است. کاربردهای گسترده این روش منحصر به فرد، لزوم توسعه روش‌های الکتروریسی با سرعت تولید صنعتی را بیش از پیش نمایان می‌سازد. سامانه الکتروریسی بدون سوزن، قابلیت تولید نانوالیاف را در مقیاس صنعتی با سرعت تولید قابل قبول دارد و امکان ساخت ساختارهای نانولیفی را با خواص قابل قبول فیزیکی و مکانیکی فراهم می‌سازد. رشته‌ساز در الکتروریسی بدون سوزن، نقش اساسی در تولید نانوالیاف دارد و پارامترهایی نظیر شکل، اندازه و سرعت چرخش به عنوان پارامترهای عملیاتی امکان کنترل خواص نانوالیاف را فراهم می‌کند. در مقاله حاضر تلاش بر این است، انواع رشته‌سازها در الکتروریسی بدون سوزن معرفی شوند. همچنین، اثر رشته‌ساز بر فرایند الکتروریسی، کیفیت الیاف و بازده بررسی شود.

مقدمه

نسبت مساحت به حجم زیاد، انعطاف‌پذیری در تولید الیاف با شکل‌ها و اندازه‌های مختلف، تخلخل و قابلیت کنترل در تشکیل نانوالیاف متناسب با نیاز برخوردار است. به‌طور کلی، سامانه الکتروریسی از سه جزء منبع تأمین ولتاژ زیاد، رشته‌ساز (افشانک) و صفحه جمع‌کننده (معمولاً از فویل آلومینیمی استفاده می‌شود) تشکیل شده است [۱-۳].

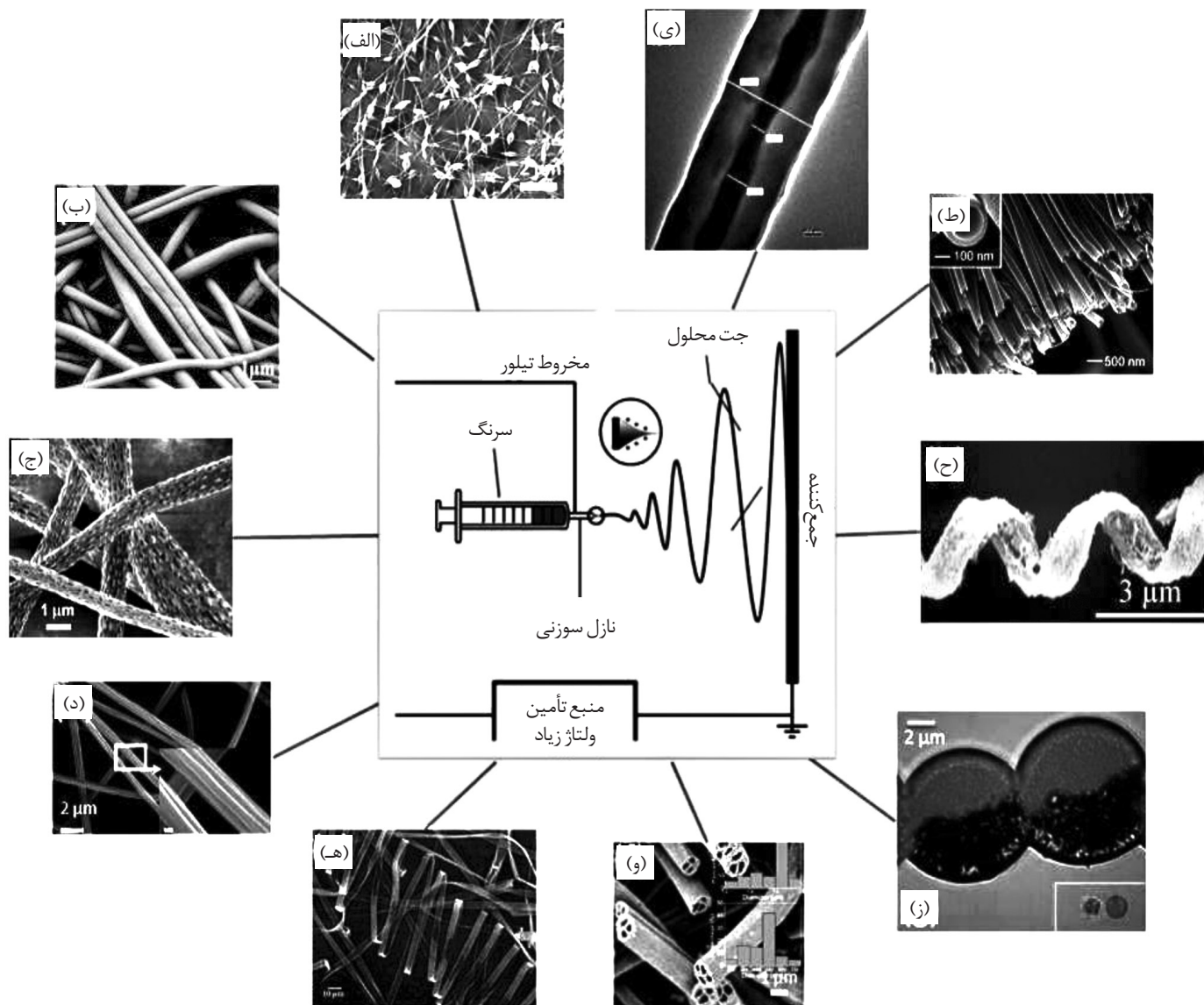
نانوالیاف الکتروریسی شده پتانسیل کاربرد گسترده و متنوعی در حوزه‌های مختلف، از جمله داربست‌های مهندسی بافت، ره‌ایش کنترل شده دارو، فیلتر کردن، لباس‌های محافظ، حسگرها و ذخیره و تبدیل انرژی دارند [۴، ۵].

الکتروریسی، فناوری استفاده از نیروی الکتریکی برای تولید الیاف با قطر نانومتر از محلول‌های پلیمری است. Riley الکتروریسی را برای اولین بار، مشاهده کرد و Zeleny جزئیات آن را در سال ۱۹۱۴، روی الکتروافشاندن مطالعه کرد. در نهایت، Formhals در سال ۱۹۳۴، الکتروریسی را ثبت کرد. این روش، برای محدوده گسترده‌ای از پلیمرها مشتمل بر پلیمرهای مصنوعی، پلیمرهای طبیعی یا ترکیبی از هر دو کاربرد دارد که تاکنون بیش از ۲۰۰ نوع پلیمر به این روش به نانوالیاف تبدیل شده‌اند. نانوالیاف الکتروریسی شده از امتیازات زیادی همچون

کلمات کلیدی

الکتروریسی سوزنی،
رشته‌ساز،
نانوالیاف

*مستول مکاتبات، پیام‌نگار: motaghtalab@guilan.ac.ir



شکل ۱- تصویر مرکزی دستگاه متداول الکتروریسی با سوزن و تصاویر بیرونی، تصاویر نانوالیاف با شکل‌شناسی مختلف: (الف) الیاف بیدار یا مهره‌دار، (ب) الیاف مدور، (ج) الیاف با سطح متخلخل، (د) الیاف شیاردار، (ه) الیاف روبانی، (و) الیاف چندکانالی، (ز) الیاف پهلو به پهلو (ساید بای ساید)، (ح) الیاف مجعد، (ط) الیاف توخالی، (ی) الیاف هسته پوسته (الف) تا (ی) حاصل از دستگاه الکتروریسی سوزنی، (ط) و (ی) حاصل از رشته‌ساز سوزنی ویژه الکتروریسی [۹].

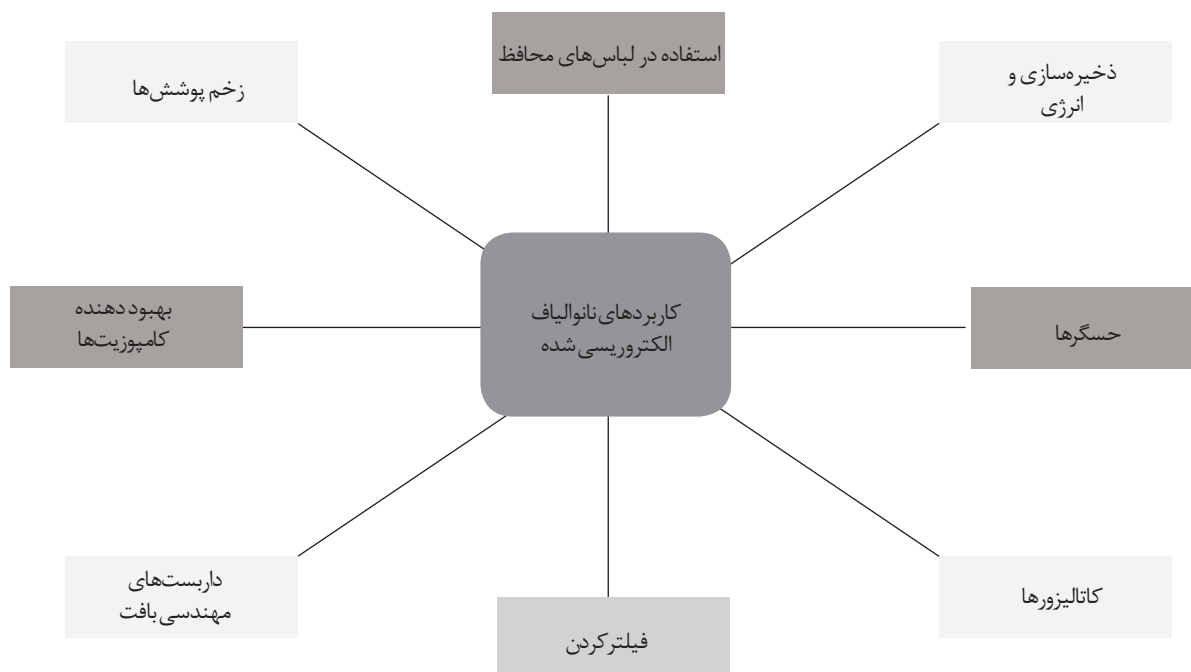
الکتروریسی سوزنی

افشانک و صفحه جمع‌کننده کشیده شده و به شکل رشته‌های بسیار ظریف، روی صفحه جمع‌کننده جمع می‌شود. در فضای بین افشانک و صفحه جمع‌کننده، با تبخیر حلال نانوالیاف جامد روی جمع‌کننده تشکیل می‌شوند [۸-۶]. تصویر مرکزی در شکل ۱، دستگاه الکتروریسی را نشان می‌دهد که از منبع تأمین ولتاژ زیاد، منبع تغذیه، افشانک سوزنی و جمع‌کننده تشکیل شده است.

نانوالیاف الکتروریسی شده سطح مقطع دایره‌ای با سطحی صاف دارند. با وجود این، نانوالیاف با شکل‌شناسی‌های مختلف را می‌توان تولید کرد که به نوع پلیمر مصرفی، خواص محلول پلیمری، ساختار افشانک و شرایط عملیات بستگی دارد [۱۰].

شکل ۱، برخی از نانوالیاف تولید شده با شکل‌شناسی‌های مختلف را

بیشتر پلیمرها پیش از الکتروریسی، به شکل محلول پلیمری یکنواخت در حلال مناسب حل می‌شوند. در الکتروریسی سوزنی، محلول پلیمری به وسیله پمپ ریسندگی به افشانک منتقل می‌شود و در ادامه محلول پلیمری تحت کشش سطحی خود، در انتهای افشانک نگه داشته می‌شود. با اعمال ولتاژ با قطبیت مخالف به افشانک (nozzle) و جمع‌کننده، میدان الکترومغناطیسی بین افشانک و جمع‌کننده شکل می‌گیرد. با افزایش میدان الکتریکی و با غلبه بر نیروهای کشش سطحی محلول پلیمری، سیال از حالت قطره‌ای واقع بر افشانک، به شکل مخروطی موسوم به جت مخروطی تیلور درمی‌آید. سیال پلیمری تحت تأثیر میدان الکترومغناطیس و جاذبه میان قطب‌های متضاد در



شکل ۲- نقشه کاربرد نانوالیاف الکتروریسی شده.

چندسوزنی، راهکاری آسان برای افزایش بازده الکتروریسی است. با وجود این، دستگاه الکتروریسی چندسوزنی معمولاً به فضای عملیاتی زیادی نیاز دارد و موقعیت مکانی سوزن‌ها نسبت به هم، برای جلوگیری از نیروی الکتریکی دافعه بین آن‌ها باید تنظیم شود و بهبود یابد. از طرفی دیگر، نانوالیاف به شکل پوششی نایکناخت جمع می‌شوند. وسیله تمیزکننده منظم نیز برای جلوگیری از بسته‌شدن افشانک‌ها حین الکتروریسی برای هر سوزن باید به کار رود که وقتی هزاران سوزن برای تولید نانوالیاف استفاده می‌شود، این امر ناممکن است [۱۶، ۱۷].

استفاده از لوله‌های متخلخل با سوراخ‌های بزرگ روی سطح آن نیز به عنوان تولیدکننده متناوب الیاف برای بهبود بازده الکتروریسی گزارش شده است. این سوراخ‌ها یا تخلخل‌ها محلول را به سطح لوله انتقال می‌دهند، سپس قطره‌های محلول در میدان الکتریکی بسیار قوی به شکل جت کشیده شده و سپس به رشته تبدیل می‌شوند. در مقایسه با الکتروریسی چندسوزنی، الکتروریسی لوله‌ای متخلخل فضای کمتری را اشغال می‌کند و شرایط عملیات راحت‌تر است.

در این روش، مدیریت ارتباط مناسب بین جت‌ها هنوز سخت است [۹، ۱۸، ۱۹]. به‌تازگی، دستگاه‌های الکتروریسی بدون سوزن، برای افزایش سرعت تولید نانوالیاف گزارش شده است که در آن به جای تولید از یک سوزن لبه‌دار یا یک سطح کوچک، جت‌ها از یک سطح گسترده مابعد باز تشکیل می‌شوند [۱۶].

تاریخچه الکتروریسی بدون سوزن

الکتروریسی بدون سوزن اولین بار در سال ۱۹۷۰ با استفاده از یک حلقه

نشان می‌دهد. الیاف بیدار را می‌توان با همه پلیمرهای قابل ریسندگی الکتروریسی کرد. اما این موضوع، نوعی نقص برای الیاف به‌شمار می‌آید. برای بعضی از پلیمرها یا محلول‌های پلیمری، با استفاده از حلال‌های ویژه و نوع افشانک می‌توان نانوالیاف شیاردار، متخلخل، روبانی، پهلوی به پهلوی، هسته پوسته، توخالی و ساختار مجعد را با فرایند الکتروریسی مستقیم تولید کرد.

نانوالیاف الکتروریسی شده مشخصات بی‌نظیری همچون نسبت سطح به جرم یا حجم زیاد، قابلیت تشکیل غشای لیفی با تخلخل زیاد، به هم پیوستگی عالی منافذ، قطر کنترل شده، شکل‌شناسی سطح مطلوب، ساختار لیفی و قابلیت افزایش گروه‌های عاملی با استفاده از پلیمرهای عامل‌دار یا گروه‌های عاملی را دارند. این خواص که از نانوالیاف الکتروریسی شده به‌دست می‌آید، قابلیت استفاده از آنها را برای کاربرد در رشته‌های مختلف فراهم می‌کند. شکل ۲، کاربردهای مهم نانوالیاف الکتروریسی شده را نشان می‌دهد [۱۳-۱۱، ۹].

استفاده از نانوالیاف در مقیاس صنعتی

در گذشته، بیشتر آزمون‌های الکتروریسی با استفاده از یک سوزن انجام می‌شد. با وجود این، خروجی کم سیال در ریسندگی تک‌سوزنی که به‌طور عمده کمتر از 0.3 g/h است، استفاده از آن را در مقیاس صنعتی محدود کرده است. برای الکتروریسی سوزنی، هر افشانک معمولاً فقط یک جت تولید می‌کند. در نتیجه، سرعت تولید کمتر از مقدار مورد نیاز برای کاربردهای تجاری است. پیشنهاد‌های مختلفی برای بهبود بازده الکتروریسی بر پایه اصول مختلف انجام شده است. مثل افزایش تعداد سوزن‌ها که دستگاه چندسوزنی نامیده می‌شود [۱۴، ۱۵]. الکتروریسی

آزاد با استفاده از محلول پلیمری گرانبه، سرعت تولید الیاف افزایش می‌یابد [۲۵]. Lukas اثبات کرد، تولید چند جت از سطح مایع باز، ناشی از تقویت الکتریکی امواج مایع است. برای تخمین یک‌بعدی از سطح سیال، طول موج λ که معین‌کننده فاصله بین جت‌های مجاور است، می‌تواند به شکل معادله (۱) بیان شود:

$$\lambda = \frac{12\pi\gamma}{2\epsilon E_0^2 + \sqrt{(2\epsilon E_0^2)^2 - 12\gamma\rho g}} \quad (1)$$

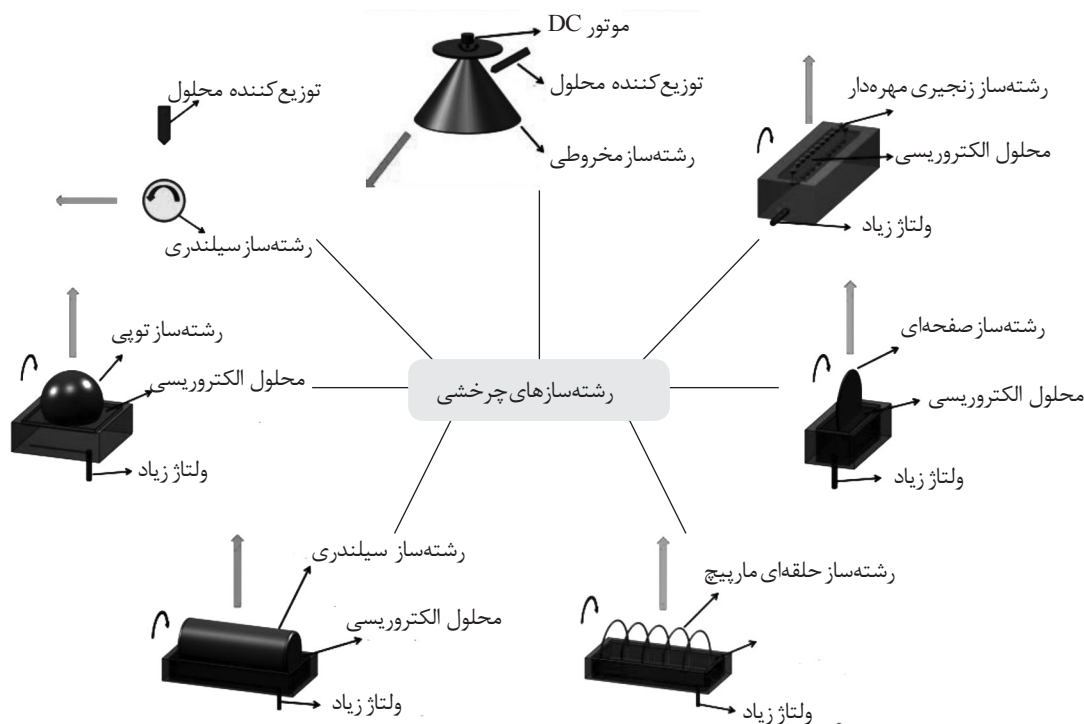
که E_0 قدرت میدان بیرونی، γ کشش سطحی مایع، ρ چگالی مایع و g شتاب گرانشی است. وی به‌وضوح نشان داد، تشکیل جت‌ها در الکتروریسی بدون سوزن، بیشتر تحت تأثیر قدرت میدان الکتریکی خارجی است [۲۶]. امتیاز اساسی این فناوری، شکل‌گیری طبیعی جت‌ها در حد بهینه است. تشکیل جت‌ها در الکتروریسی بدون سوزن را می‌توان در چهار بخش به ترتیب زیر توضیح داد:

- ۱- لایه‌ای نازک از محلول پلیمری روی سطح رشته‌ساز تشکیل می‌شود که نتیجه غوطه‌وری و چرخش رشته‌ساز در محلول است.
- ۲- همچنین، چرخش رشته‌ساز باعث آشفته‌گی و تحریک لایه محلول تشکیل شده روی آن و در نتیجه تشکیل مخروط‌های اولیه روی سطح محلول می‌شود.
- ۳- وقتی که ولتاژ زیاد اعمال می‌شود، تمرکز نیروی الکتریکی روی مخروط‌های ایجاد شده در سطح محلول، باعث تشدید آشفته‌گی و در نتیجه تشکیل مخروط تیلور می‌شود.

برای الیاف اسپین الکتروستاتیکی به منظور کاربرد در فیلتر کردن گزارش شده است [۲۰]. Jirsak، طراحی الکتروریسی بدون سوزن را با استفاده از سیلندر یا غلتک به عنوان تولیدکننده الیاف (رشته‌ساز)، توسط شرکت Elmarco با نام تجاری Nanospider تجاری‌سازی کرد [۲۱]. استفاده از صفحه (disc) به عنوان رشته‌ساز برای تولید نانوالیاف و مقایسه آن با عملکرد رشته‌ساز سیلندری، در پژوهش دیگری انجام شد [۴]. Zussman و Yarin، از سیالی مغناطیسی در زیر محلول پلیمری برای آغاز الکتروریسی بدون سوزن استفاده کردند [۲۲]. Liu، از حباب‌های هوا برای تولید نانوالیاف در الکتروریسی از سطح مایع کمک گرفت [۲۳].

الکتروریسی بدون سوزن

به‌تازگی، دستگاه الکتروریسی بدون سوزن به عنوان فناوری الکتروریسی، با هدف تولید نانوالیاف در مقیاس صنعتی در فضای فشرده معرفی شده است. الکتروریسی بدون سوزن، در واقع تشکیل نانوالیاف به‌طور مستقیم از سطح باز مایع است. جت‌های بی‌شماری که به‌طور هم‌زمان از رشته‌ساز بدون سوزن تولید می‌شوند، بدون اثر لوله مویین و شبیه به افشانک‌های سوزنی هستند. از آنجا که تشکیل جت اولیه در الکتروریسی بدون سوزن بر سطح آزاد مایع، تحت فرایند خودآرایش یافتگی اتفاق می‌افتد، کنترل فرایند ریسندگی سخت است. رشته‌سازها در الکتروریسی بدون سوزن، نقش اساسی را در فرایند الکتروریسی، کیفیت الیاف و بازده آن ایفا می‌کنند [۹، ۲۴]. مطالعات نظری نیز اثبات کرده است، به وسیله الکتروریسی از سطح



شکل ۳- طرح کلی رشته‌سازهای چرخشی بدون سوزن (جهت الکتروریسی در امتداد خط قرمز نشان داده شده است) [۹].

سیلندری، صفحه‌ای و توپی نشان می‌دهد. رشته‌ساز سیلندری مساحت سطح بیشتری دارد، اما توزیع میدان الکتریکی در سطح آن ناهمگن است [۳۱]. رشته‌سازهای توپی میدان الکتریکی با شدت کمتر را تشکیل می‌دهند که در نتیجه، جت‌های معدودتری در مقایسه با انواع سیلندری و صفحه‌ای تشکیل می‌شود. نتایج تجربی و بررسی نظری، بینش جدیدی را برای طراحی رشته‌ساز در الکتروریسی بدون سوزن فراهم می‌آورد. طبق نتایج به‌دست آمده، در مقایسه با الکتروریسی سوزنی این رشته‌سازها بازده بیشتری دارند (سیلندری $8/6 \text{ g/h}$ ، صفحه‌ای $6/2 \text{ g/h}$ و توپی $3/1 \text{ g/h}$). میدان الکتریکی نیز به روش اجزای محدود بررسی و مشخص شد که میدان الکتریکی در بین این رشته‌سازها، با شدت زیاد و توزیع باریک‌تر در بالای رشته‌ساز صفحه‌ای قرار دارد که باعث می‌شود، جت‌های محلول در الکتروریسی با رشته‌ساز صفحه‌ای، با سرعت بیشتری کشیده شوند. در شرایط عملیاتی یکسان، نانوالیاف تولید شده با صفحه $(257 \pm 75 \text{ nm})$ در مقایسه با نوع توپی $(344 \pm 105 \text{ nm})$ و سیلندری $(357 \pm 127 \text{ nm})$ ظریف‌تر و با توزیع قطر باریک‌تر، گزارش شده‌اند [۳۰].

رشته‌ساز حلقه‌ای مارپیچ

Lin در دستگاه الکتروریسی بدون سوزن از حلقه‌های مارپیچ به عنوان رشته‌ساز استفاده کرد. رشته‌ساز حلقه‌ای مارپیچ و نحوه فرایند الکتروریسی مربوط، در شکل ۵ نشان داده شده است. جت‌های پلیمری بی‌شماری از سطح سیم‌های فلزی تولید می‌شوند. نانوالیاف تولید شده از رشته‌ساز حلقه‌ای مارپیچ در مقایسه با الکتروریسی سوزنی بسیار نازک‌تر و با توزیع قطر باریک‌تر هستند. با وجود این، نانوالیاف تولید شده از رشته‌سازهای صفحه‌ای، توپی و سیلندری معمولاً زبرتر از الکتروریسی سوزنی هستند. سرعت تولید نانوالیاف حاصل از حلقه‌های مارپیچ نسبت به نوع سیلندری با همان ابعاد، بیشتر است.

برای یک حلقه مارپیچ با 8 cm قطر و 16 cm طول، مقدار تولید نانوالیاف پلی‌وینیل الکل متناسب با تغییر ولتاژ حین الکتروریسی متغیر است. به طوری که با افزایش ولتاژ از 45 kV به 60 kV ، مقدار تولید از $2/49 \text{ g/h}$ به $9/24 \text{ g/h}$ افزایش می‌یابد [۳۱]. در واقع، با ازدیاد

۴- جت‌های کشیده شده از مخروط تیلور خارج شده و در نهایت الیاف تشکیل می‌شود [۹،۲۷].

رشته‌سازها برای الکتروریسی بدون سوزن

رشته‌سازها برای الکتروریسی بدون سوزن را می‌توان به دو گروه چرخشی و ثابت دسته‌بندی کرد. انواع چرخشی می‌توانند ارتعاش مکانیکی اولیه را در محلول پلیمری ایجاد کنند. در واقع، با ایجاد آشفتگی در محلول پلیمری، به تشکیل جت‌های آغازی کمک می‌کنند. رشته‌سازهای چرخشی بیشتر به‌طور پیوسته کار می‌کنند. برای آغاز فرایند الکتروریسی در رشته‌ساز ثابت، اغلب از نیروی کمکی (مثل میدان مغناطیسی، گرانش و حباب گاز) استفاده می‌شود [۹،۲۸].

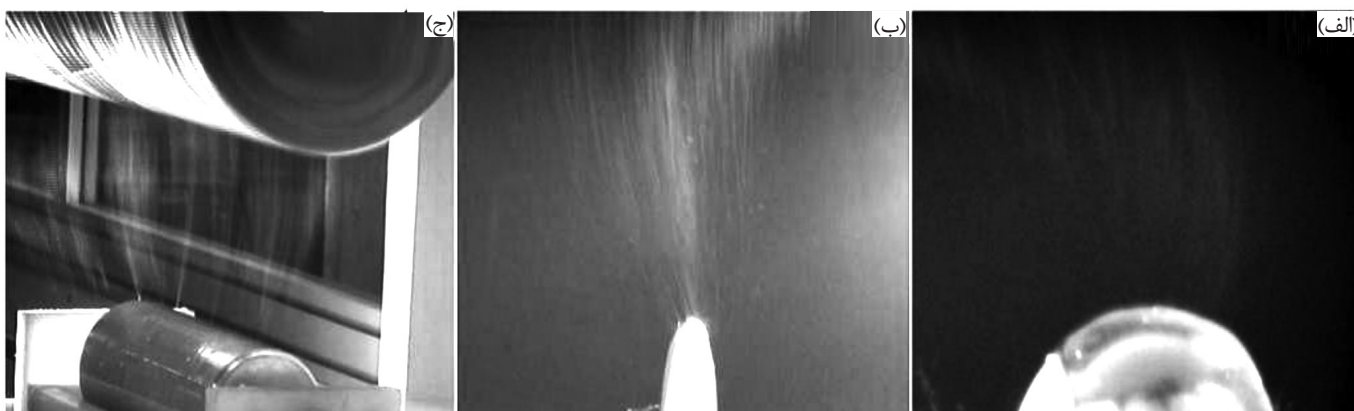
رشته‌سازهای چرخشی

انواع رشته‌سازهای چرخشی در الکتروریسی بدون سوزن با قابلیت چرخش در حمام محلول پلیمری، باعث انتقال محلول پلیمری به روی رشته‌ساز و نیز ایجاد نوعی آشفتگی و تحرک در محلول می‌شوند که این تحرک می‌تواند برای ایجاد مخروط تیلور اولیه حین الکتروریسی مثبت واقع شود [۲۹]. طرح کلی انواع رشته‌سازهای چرخشی، در شکل ۳ نشان داده شده است.

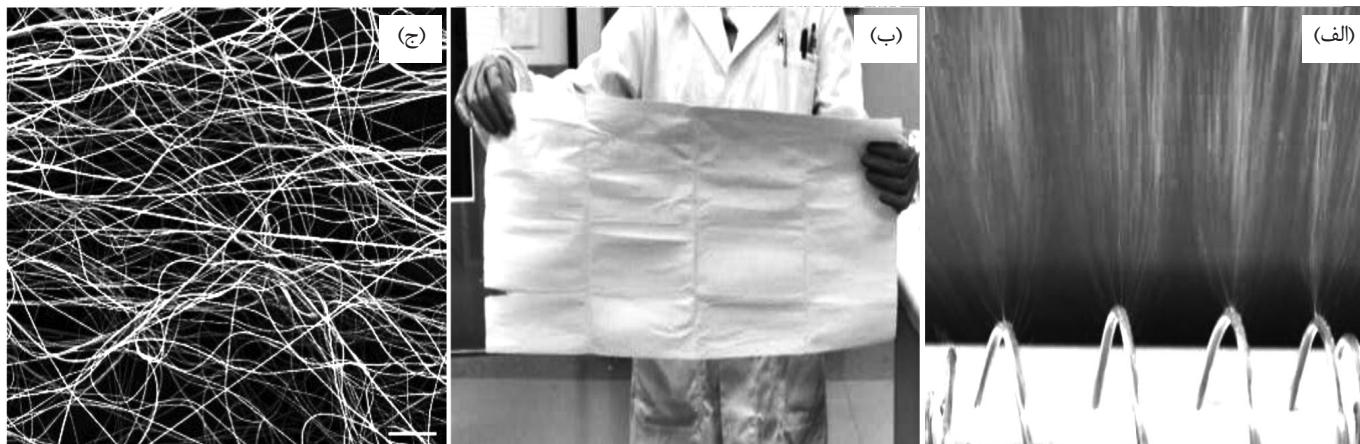
رشته‌سازهای سیلندری، توپی و صفحه‌ای

Niu، از رشته‌سازهای سیلندری، توپی و صفحه‌ای چرخشی در دستگاه الکتروریسی بدون سوزن برای تولید نانوالیاف استفاده کرد و نتایج آن‌ها را با پلی‌وینیل الکل، به عنوان پلیمر نمونه مقایسه کرد. در دستگاه‌های الکتروریسی بدون سوزن استفاده شده توسط Niu، ولتاژ به وسیله سیمی فلزی در داخل وان محلول به سامانه متصل بود. وی مشاهده کرد، وقتی که نیروی الکتریکی به اندازه کافی زیاد باشد، جت‌های بی‌شماری از سطح رشته‌ساز تولید شده و در نهایت الیاف الکتروریسی شده روی سطح جمع‌کننده تشکیل می‌شوند [۲۸].

شکل ۴، نحوه تولید نانوالیاف را به وسیله رشته‌سازهای چرخشی



شکل ۴- تصاویر فرایند الکتروریسی با رشته‌سازهای: (الف) توپی، (ب) صفحه‌ای و (ج) سیلندری (قطر سیلندر 80 mm ، شعاع لبه 5 mm ، قطر توپی و صفحه‌ای 80 mm و ضخامت 2 mm) [۳۰].



شکل ۵- (الف) تصویری از رشته‌ساز حلقه‌ای ماریچ و فرایند الکتروسی، (ب) تصویری از پوشش نانوالیاف پلی‌آکریلو نیتریل تولید شده با الکتروسی حلقه‌ای و (ج) تصویر میکروسکوپ الکترونی از نانوالیاف پلی‌آکریلو نیتریل الکتروسی شده با رشته‌ساز حلقه‌ای (طول مقیاس $10 \mu\text{m}$).

ولتاژ تعداد جت‌های تولیدی در سطح رشته‌ساز زیاد می‌شود و در نتیجه سرعت تولید نهایی نیز افزایش می‌یابد.

رشته‌ساز زنجیری مهره‌دار

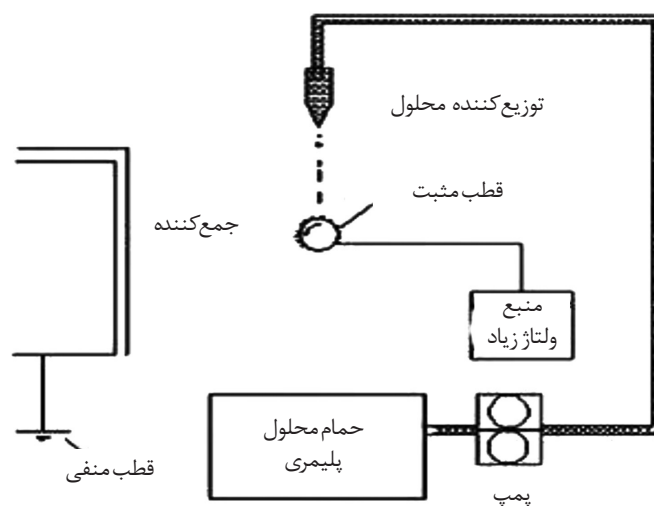
به‌تازگی، از رشته‌ساز زنجیری مهره‌دار افقی برای تولید نانوالیاف در حالت رو به بالا، در الکتروسی بدون سوزن استفاده شده است. در این دستگاه، زنجیر مهره‌دار چرخشی شامل دو بخش موازی است. بخش کوچک‌تر در محلول پلیمری غوطه‌ور است، در حالی که بخش بالاتر عامل تولیدکننده الیاف است. وقتی که ولتاژ زیادی به سامانه اعمال می‌شود، مهره‌هایی از زنجیر که در بخش بالایی قرار دارند، الیاف ظریف‌تر را تولید کرده و مهره‌های کوچک‌تر میدان الکتریکی با استحکام زیاد را تولید می‌کنند که در نتیجه، باعث بهبود عملکرد الکتروسی می‌شود [۹].

رشته‌ساز غلتک چرخشی در الکتروسی رو به پایین Tang، از غلتکی چرخشی به عنوان تولیدکننده الیاف در دستگاه الکتروسی بدون سوزن استفاده کرد. همان‌طور که در شکل ۶ نشان داده شده است، در این طراحی، محلول ریسندگی در خلال الکتروسی از توزیع‌کننده محلول، به روی غلتک می‌افتد. وقتی که محلول روی رشته‌ساز ریخته شد و با توجه به اتصال غلتک فلزی به بار الکتریکی، جت‌ها از سطح غلتک آغشته به محلول خارج شده و در نتیجه آن، نانوالیاف تولید می‌شود.

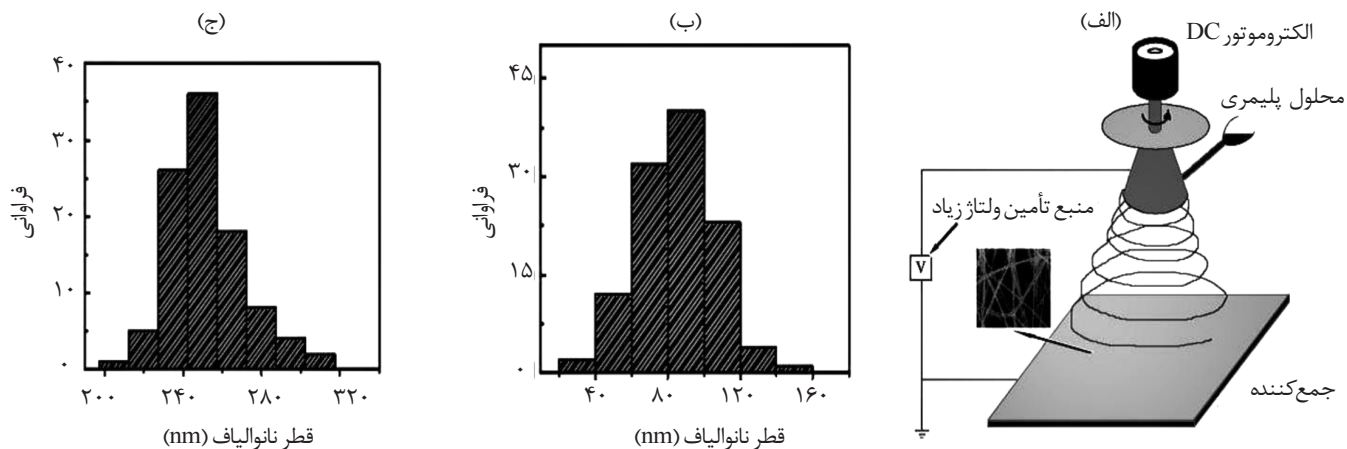
غلظت محلول، ولتاژ اعمالی، فاصله بین رشته‌ساز غلتکی با جمع‌کننده و سرعت چرخش آن از عوامل کلیدی در فرایند الکتروسی و قطر الیاف، به این روش است. این دستگاه ۲۴ تا ۴۵ مرتبه بازده تولید بیشتری از سامانه‌های الکتروسی سوزنی متداول دارد [۹،۳۲]. نحوه طراحی آزمون در این روش، باید به گونه‌ای باشد که ریختن دوباره محلول به حمام، هنگام خروج محلول از توزیع‌کننده به روی غلتک، کمترین مقدار ممکن شود. اگرچه امکان هیچ کاهش در مقدار محلول نهایی وجود ندارد، اما زمان انجام آزمون را نسبت به سایر روش‌ها طولانی‌تر می‌کند. از طرفی، با توجه به وجود نیروی گرانش رو به پایین هنگام چرخش غلتک، امکان تغییر ضخامت محلول روی نواحی مختلف از غلتک که در تولید نانوالیاف نقش دارند، وجود دارد.

رشته‌ساز مخروطی

Lu و همکاران، سامانه الکتروسی بدون سوزن با استفاده از مخروطی چرخشی را به عنوان رشته‌ساز به‌کار گرفتند. آنها گزارش کردند، رشته‌ساز مخروطی دو‌بار و میدان الکتریکی، از پارامترهای معین‌کننده و مؤثر بر تولید الیاف هستند. از محلول پلی‌وینیل پیرولیدین برای انجام آزمون استفاده شد. در شکل ۷، نشان داده شده است که محلول مورد نیاز برای رشته‌ساز مخروطی به وسیله لوله شیشه‌ای تأمین می‌شود تا الکتروسی به‌طور پیوسته انجام شود. با توجه به شرایط هندسی مخروط، میدان الکتریکی در لبه‌های آن ایجاد می‌شود. در نتیجه، مکان‌های تولید نانوالیاف در این روش را می‌توان لبه‌های مخروط دانست. محلول پلی‌وینیل پیرولیدین



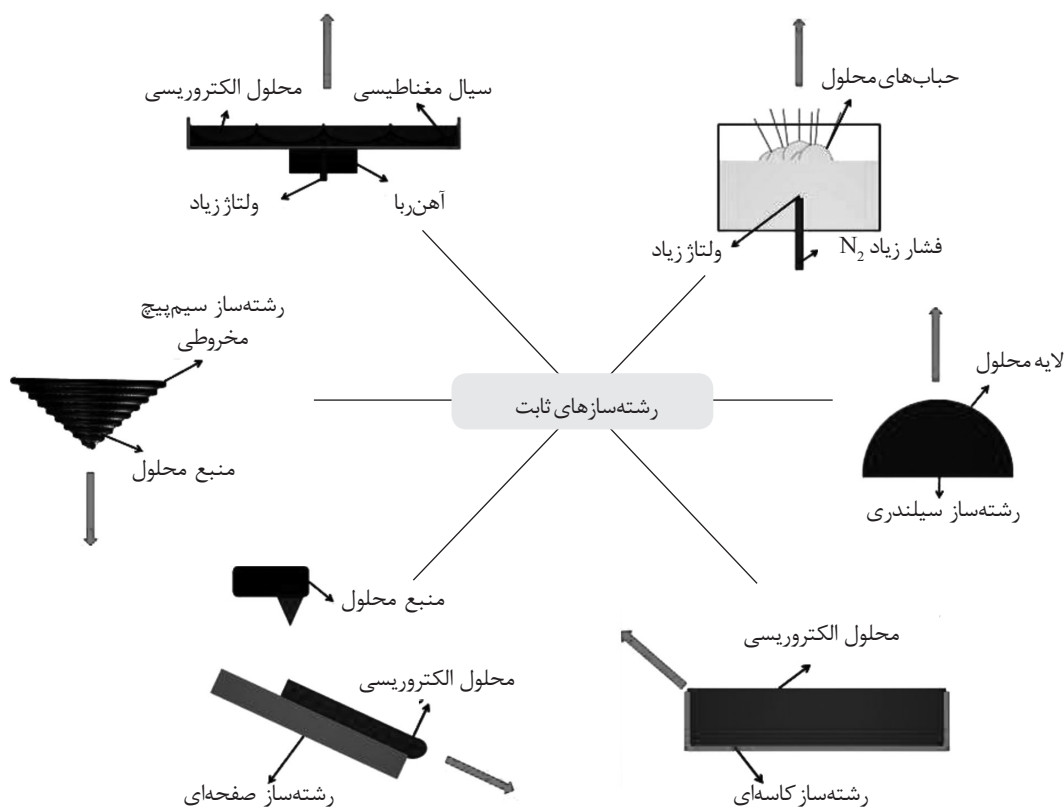
شکل ۶- طرح کلی دستگاه الکتروسی بدون سوزن رو به پایین با استفاده از غلتک چرخشی به عنوان رشته‌ساز [۳۲].



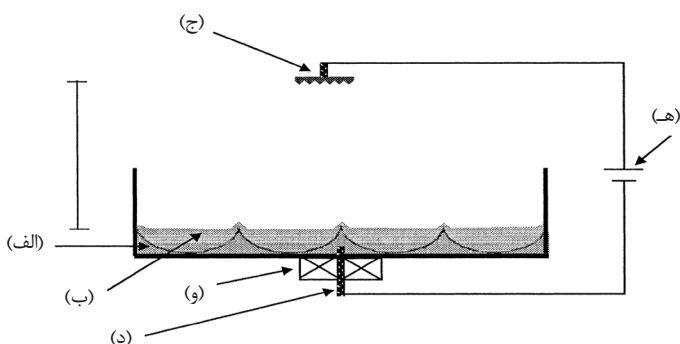
شکل ۷- (الف) طرح کلی از دستگاه الکتروریسی با مخروط چرخشی (تصاویر میکروسکوپ الکترونی از نانوالیاف پلی‌وینیل پیرولیدین جمع شده، سرعت چرخش مخروط ۱۰۰ rpm، ولتاژ ۳۰ kV، فاصله جمع‌کننده ۲۰ cm و خروجی محلول ۱۰ g/min)، (ب) توزیع قطر الیاف الکتروریسی شده سوزنی و (ج) توزیع قطر الیاف الکتروریسی شده با مخروط چرخشی.

در این روش، امکان کنترل توزیع محلول الکتروریسی برای جلوگیری از ریختن روی جمع‌کننده بسیار دشوار است. مزیت این روش، رو به پایین بودن سامانه الکتروریسی است. امکان آرایش و یک راستاشدن محلول به واسطه نیروی گرانش، در این روش بیشتر است. در واقع، در این بخش خاصیت گرانبه‌کشسانی (viscoelastic) محلول بیشتر تحت تأثیر قرار می‌گیرد. البته اثر کشش سطحی نیز در این روش بیشتر نمایان می‌شود.

تحت نیروی گرانش، به لبه‌های مخروط در طول سطح آن منتقل می‌شود. وقتی که ولتاژ اعمال شده زیاد باشد و سرعت چرخش مخروط به بیش از ۵۰ rpm/min برسد، جت‌های محلول از لبه مخروط تولید و الکتروریسی در حالت پایدار انجام می‌شود. در مقایسه با سامانه الکتروریسی سوزنی، این سامانه نانوالیافی با همان کیفیت، اما با سرعت ۱۰۰۰ برابر بیشتر تولید می‌کند (شکل ۷). وقتی که ولتاژ بیشتر اعمال می‌شود، نانوالیاف یکنواخت با قطرهای کوچک‌تر به دست می‌آید [۳۳].



شکل ۸- طرح کلی انواع رشته‌سازهای بدون سوزن ثابت (جهت الکتروریسی در جهت خط قرمز کشیده شده است).



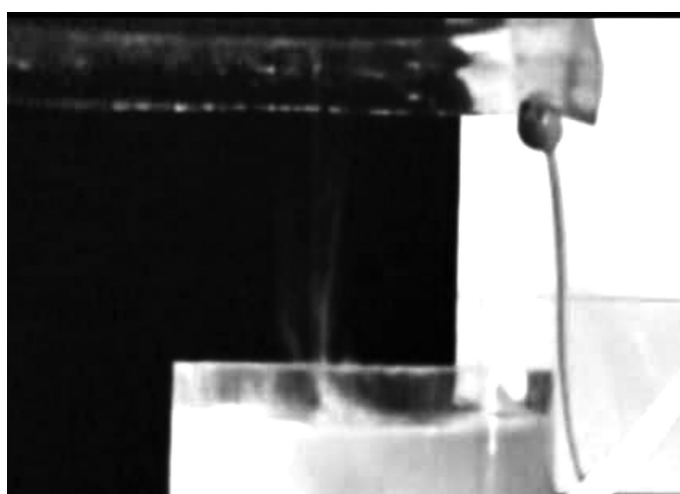
شکل ۱۰- طرح کلی دستگاه الکتروریسی استفاده شده توسط Yarin و Zussman: (الف) لایه مایع مغناطیسی، (ب) لایه محلول پلیمری، (ج) الکتروود معکوس که در فاصله H از سطح پلیمر قرار دارد، (د) الکتروود غوطه‌ور شده در سیال مغناطیسی، (ه) منبع ولتاژ زیاد و (و) آهن‌ربای قوی [۲۲].

با وجود این، دستگاه الکتروریسی ساخته شده بسیار پیچیده است و نانوالیاف الکتروریسی شده نیز به نسبت خشن تر و با توزیع قطر بزرگ ترند. طرح کلی دستگاه الکتروریسی استفاده شده توسط Yarin و Zussman در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

استفاده از دمش گاز به عنوان رشته‌ساز

Lu در سال ۲۰۰۷، از دمش گاز به محلول پلیمری برای تشکیل جت‌های اولیه از سطح محلولی باز استفاده کرد. به این روش، الکتروریسی حبابی، گفته می‌شود. حین الکتروریسی حبابی وقتی که گاز به مخزن محلول تزریق و در همان زمان ولتاژ زیاد اعمال می‌شود، حباب‌ها در سطح محلول تولید می‌شوند. حباب‌های گاز ایجاد شده باعث تمرکز میدان الکتریکی در سطح حباب‌ها و تشکیل اولیه جت‌های ترکیبی می‌شوند.

در شکل ۱۱، تصویری از فرایند الکتروریسی حبابی نشان داده شده است. فشار گاز، خواص محلول و ولتاژ به کار رفته از پارامترهای اثرگذار بر سرعت تولید الیاف‌اند [۳۴، ۳۵].



شکل ۱۱- تصویری از فرایند الکتروریسی حبابی.

رشته‌سازهای ثابت (ساکن)

در الکتروریسی با رشته‌ساز ثابت برخلاف نوع چرخشی، ویژگی چرخش اولیه در سامانه که به تشکیل مخروط‌های تیلور اولیه کمک می‌کند، وجود ندارد. به همین دلیل، برای کمک به تشکیل مخروط‌های تیلور در سامانه الکتروریسی بدون سوزن با رشته‌سازهای ثابت، از نیروی خارجی مثل نیروی مغناطیسی، جریان گاز با فشار زیاد و گرانش استفاده می‌شود. در شکل ۸، طرح کلی انواع رشته‌سازهای ثابت نشان داده شده است.

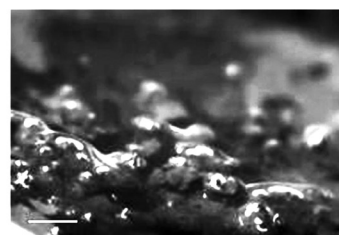
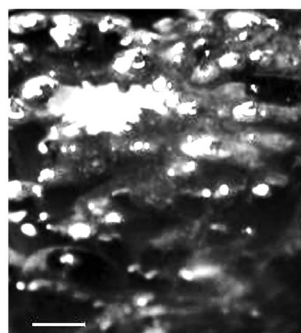
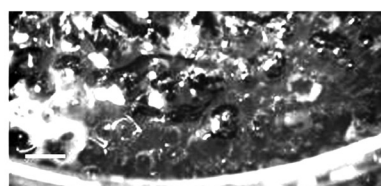
استفاده از سیال مغناطیسی به عنوان رشته‌ساز

Yarin و Zussman، سامانه الکتروریسی بدون سوزن را به کار گرفتند که در آن از سیال مغناطیسی برای تشکیل جت استفاده شده بود. در این سامانه، از سیال فرومغناطیسی به عنوان لایه پایینی و از محلول پلیمری در لایه بالایی استفاده شد.

وقتی که یک سیال مغناطیسی خارجی برای سامانه سیالی به کار می‌رود و میدان الکتریکی نیز به طور هم‌زمان به لایه محلول پلیمری اضافه می‌شود، سیال فرومغناطیسی آزاد و مخروط‌های تیلور اولیه را تشکیل می‌دهد. این مسئله باعث آشفته‌گی و تحریک سطوح بین دو لایه می‌شود. به نوعی، همان کار چرخش را در رشته‌سازهای چرخشی انجام می‌دهد. آن‌ها سیال مغناطیسی را به وسیله مخلوط کردن پودر مغناطیسی در نفت سفید با اولئیک اسید، به عنوان پایدارکننده آماده کردند.

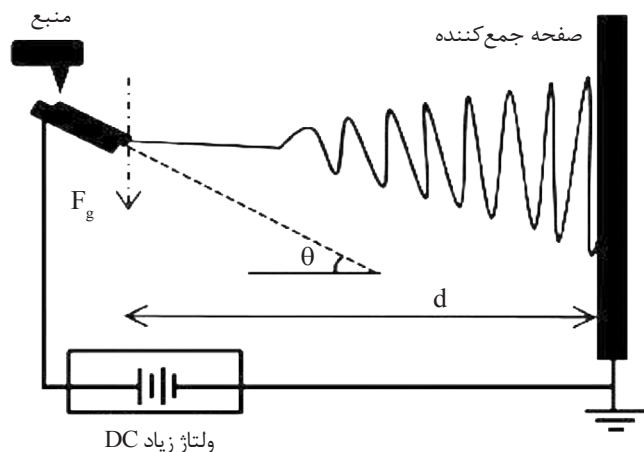
در شکل ۹، نحوه قرارگیری محلول پلیمری روی سیال مغناطیسی و نحوه تشکیل مخروط‌های تیلور اولیه، از جوانب مختلف نشان داده شده است [۲۲].

آن‌ها از محلول پلیمری پلی‌اتیلن اکسید برای الکتروریسی استفاده و مشاهده کردند، در مقایسه با الکتروریسی چندسوزنی، سرعت تولید نانوالیاف ۱۲ برابر بیشتر است.



شکل ۹- تصاویر جوانب مختلف از وجود محلول پلیمری روی سیال مغناطیسی و تشکیل مخروط‌های تیلور اولیه [۲۲].

هندسه رشته‌ساز صفحاتی زاویه‌دار

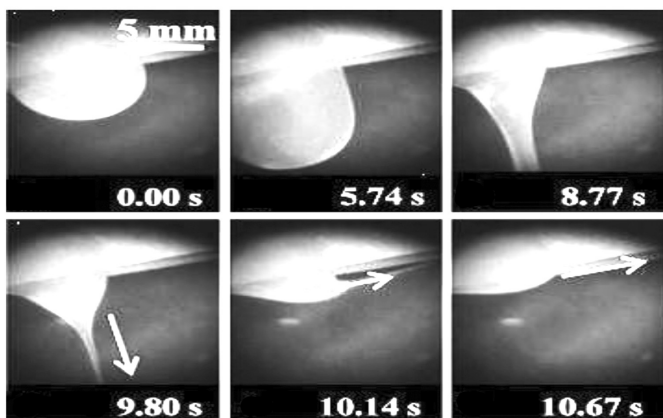


شکل ۱۴- طرح کلی الکتروریسی با صفحه لبه‌ای [۳۸].

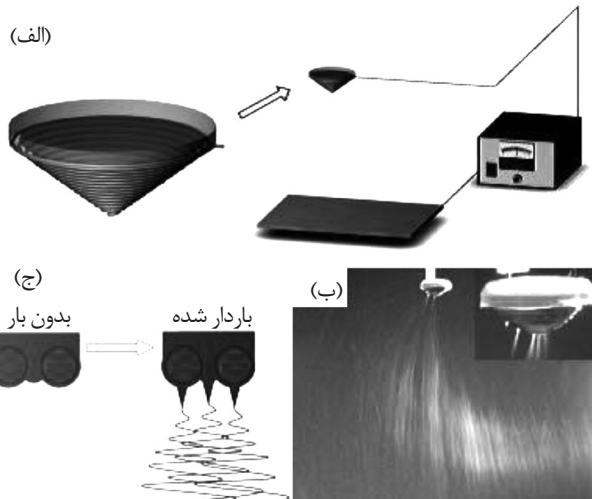
شکل ۱۳، مقایسه‌ای بین نتایج حاصل از الکتروریسی سوزنی و الکتروریسی با حلقه سیم‌پیچ مخروطی را در تولید نانوالیاف پلی‌وینیل الکل نشان می‌دهد.

رشته‌ساز صفحاتی زاویه‌دار

Thoppey، با استفاده از صفحه‌ای با زاویه افقی مشخص، برای نگهداری محلول ریسندهی و تولید نانوالیاف از لبه این صفحه، روشی نوین را در الکتروریسی بدون سوزن گزارش کرده است. مخزنی که عایق الکتریکی است، برای تأمین محلول پلیمری استفاده شده روی صفحه، به یک یا تعداد بیشتری پیپت پلاستیکی متصل است. هر پیپت جریانی از محلول را تشکیل می‌دهد که همان جت‌های اولیه است. از آنجا که محلول پلیمری رفتار گرانبه‌گوشان نشان می‌دهد، شکل سیال در زمان تشکیل جت حفظ می‌شود. وقتی که محلول به لبه صفحه می‌رسد، به شکل تیک یا باریکه در می‌آید و سپس کشیده می‌شود. در اثر میدان الکتریکی قوی به کار رفته در لبه صفحه، تشکیل جت‌های اولیه



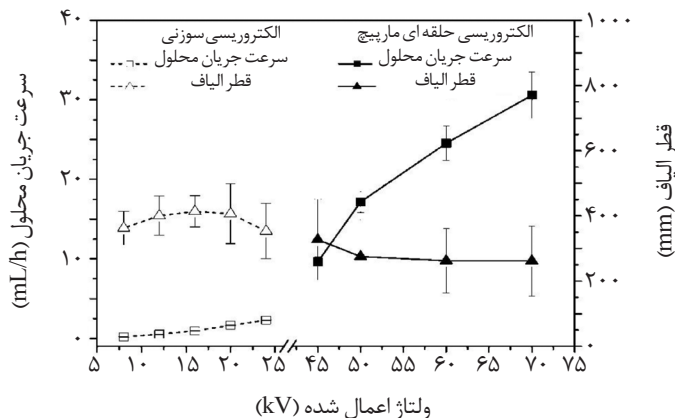
شکل ۱۵- نحوه تشکیل جت‌های اولیه محلول پلی‌اتیلن اکسید در الکتروریسی با صفحه لبه‌ای [۳۸].



شکل ۱۲- (الف) طرح کلی دستگاه الکتروریسی حلقه سیم‌پیچ مخروطی، (ب) تصویر فرایند الکتروریسی و (ج) نحوه تشکیل جت در سطح مخروط [۳۶].

رشته‌ساز حلقه سیم‌پیچ مخروطی

Wang در سال ۲۰۰۹، استفاده از حلقه سیم‌پیچ مخروطی را به عنوان رشته‌ساز گزارش کرده است که هم منبع تأمین محلول و هم تولیدکننده الیاف است. وقتی که ولتاژ زیاد به سیم‌های حلقه‌ای اعمال می‌شود، محلول به خارج از هر دو سطح سیم کشیده شده و فاصله ایجاد شده بین سیم‌ها، باعث تشکیل جت‌ها از محلول می‌شود. این دستگاه قابلیت کار کردن در ولتاژ بیش از ۷۰ kV را دارد، بدون اینکه تخلیه الکتریکی انجام شود. همچنین، می‌تواند بازده الکتروریسی را تا ۱۳ برابر بهبود دهد و نانوالیاف ریزتر را در مقایسه با الکتروریسی سوزنی متداول تولید کند. Wang، دو دلیل را برتری روش خود نسبت به روش استفاده از سطح باز می‌داند. اول اینکه سیم‌پیچ مخروطی، قابلیت نگهداری محلول پلیمری را بیشتر از سطح باز دارد و دوم اینکه پتانسیل میدان الکتریکی در سیم‌پیچ مخروطی، بیشتر است. تنها اشکال این روش الکتروریسی، ناپیوسته‌بودن تولید نانوالیاف است [۳۶،۳۷]. شکل ۱۲، طرح کلی و نحوه تولید نانوالیاف را به این روش نشان می‌دهد.



شکل ۱۳- مقایسه نتایج الکتروریسی سوزنی با الکتروریسی حلقه سیم‌پیچ مخروطی [۳۶].

در نتیجه، قطر جت از $1/2$ mm به $0/3$ mm در طول فرایند الکترورسی کاهش می‌یابد [۴۰، ۴۱]. طرح کلی دستگاه الکترورسی استفاده شده توسط Wu، به همراه بررسی میدان الکتریکی در سطح رشته‌ساز، در شکل ۱۶ و نحوه تشکیل جت در سطح رشته‌ساز سیلندری ثابت در شکل ۱۷ نشان داده شده است.

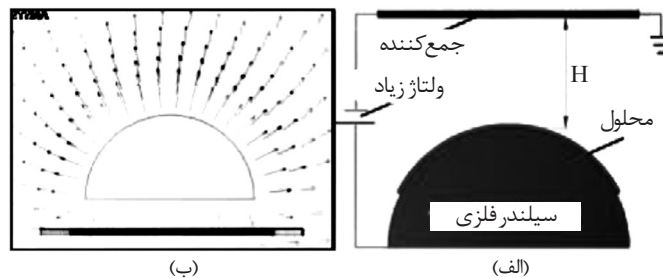
مقایسه کلی رشته‌سازهای چرخشی و ثابت

جدول ۱ انواع مختلف رشته‌سازهای ثابت و چرخشی در الکترورسی بدون سوزن از لحاظ مقدار بازده، سرعت تولید و قطر را در مقایسه با الکترورسی سوزنی نشان می‌دهد.

مقایسه بین رشته‌ساز سیلندری و صفحه‌ای

با توجه به شرایط طراحی، هزینه، بازده و مصرف انرژی در بین تمام رشته‌سازهایی که در الکترورسی بدون سوزن استفاده می‌شوند، رشته‌سازهای سیلندری، صفحه‌ای و حلقه‌ای مارپیچ نسبت به سایر انواع رشته‌ساز بیشتر استفاده می‌شوند. رشته‌سازهای سیلندری، صفحه‌ای و حلقه‌ای مارپیچ دارای طراحی آسان‌تر، مصرف انرژی کمتر و بازده بیشتری هستند. در ادامه سعی بر آن شده تا نتایج حاصل از کار با این رشته‌سازها بیشتر توضیح داده شود.

Lin و Wang، Niu از دو رشته‌ساز صفحه‌ای و سیلندری برای تولید نانوالیاف پلی‌وینیل الکل در دستگاه الکترورسی بدون سوزن استفاده کردند. ابعاد رشته‌ساز سیلندری استفاده شده توسط آن‌ها 20 cm طول و 8 cm قطر داشت. در حالی که رشته‌ساز صفحه‌ای با همان قطر سیلندر، اما دارای ضخامت 2 mm بود. لبه‌های هر دو رشته‌ساز سیلندری و صفحه‌ای اریب و شیب‌دار بوده و شعاع ناحیه اریب در حدود 5 mm بود. از پلی‌وینیل الکل با متوسط وزن مولکولی $186000-146000$ استفاده شد. غلظت پلی‌وینیل الکل استفاده شده در محدوده $1\%-8\%$ وزنی بود. شکل ۱۸، رشته‌سازهای صفحه‌ای و سیلندری را با تصاویری از تشکیل فرایند نشان می‌دهد. محول پلیمری در داخل وان حمام ریخته می‌شود. سپس، رشته‌سازها در داخل حمام به چرخش در می‌آید و محلول پلیمری

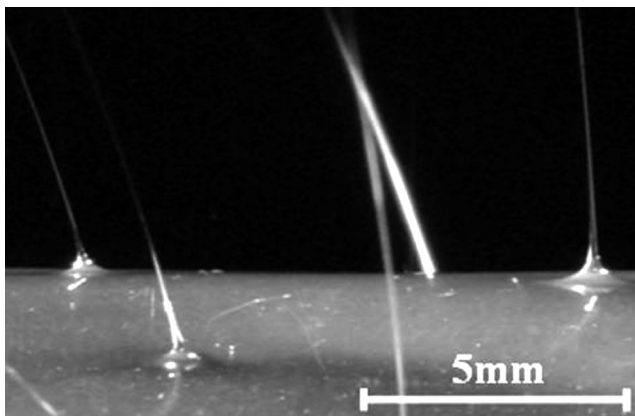


شکل ۱۶- (الف) طرح کلی دستگاه الکترورسی با رشته‌ساز سیلندری ثابت و (ب) شبیه‌سازی میدان الکتریکی در سطح رشته‌ساز سیلندری ثابت [۴۰].

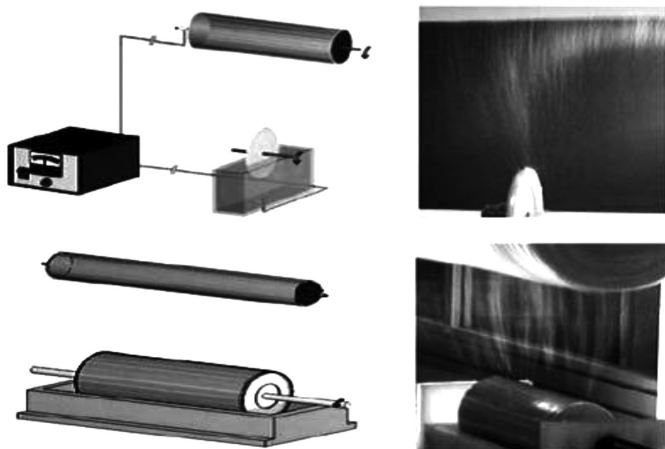
اتفاق می‌افتد. سرعت تولید الکترورسی ۵ برابر بیشتر از الکترورسی سوزنی متداول است. نانوالیاف تولیدی به این روش، همان کیفیت لیاف تولیدی به روش الکترورسی سوزنی متداول، با شرایط تولید یکسان را دارند. در شکل ۱۴، طرح کلی دستگاه استفاده شده در این روش نشان داده شده است [۳۸، ۳۹]. در این روش، سرعت تولید نسبت به سایر روش‌های الکترورسی بدون سوزن کمتر بوده و نیز برای تولید جت‌های اولیه نیاز به تأمین ولتاژ زیاد است. از طرفی، کنترل ضخامت محلول پلیمری روی لبه و جلوگیری از ریختن آن از روی لبه بسیار مشکل است و به طراحی ویژه در اندازه زاویه و مقدار ولتاژ نیاز دارد. شکل ۱۵، نحوه تشکیل جت‌های اولیه محلول پلی‌اتیلن اکسید را به این روش نشان می‌دهد.

رشته‌ساز سیلندری ثابت

Wu، در سامانه‌ای جدید با استفاده از رشته‌ساز سیلندری ثابت الکترورسی بدون سوزن را رو به بالا انجام داد. این کار، مشابه روش رشته‌ساز چرخشی است، با این تفاوت که فرایند ناپیوسته انجام می‌شود. شکل ۱۴، جت‌های آغازی در خلال الکترورسی را نشان می‌دهد. نانوالیاف پلی‌اتیلن اکسید تولید شده با این دستگاه، 260 مرتبه سرعت تولید بیشتری نسبت به الکترورسی سوزنی متداول دارند. مخروط تیلور در این دستگاه، روی سطح محلول باز، با مکش محلول از پیرامون تشکیل می‌شود. چون هیچ محلول پلیمری اضافی به تولیدکننده لیاف اضافه نمی‌شود، ضخامت لایه محلول در سطح رشته‌ساز به تدریج کاهش می‌یابد.


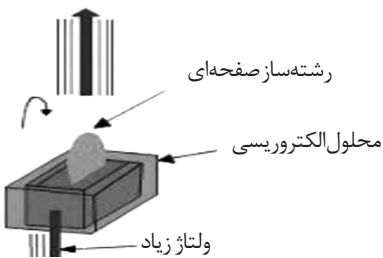
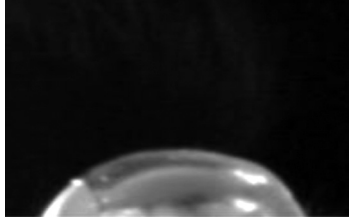
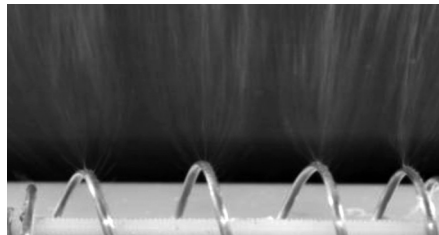
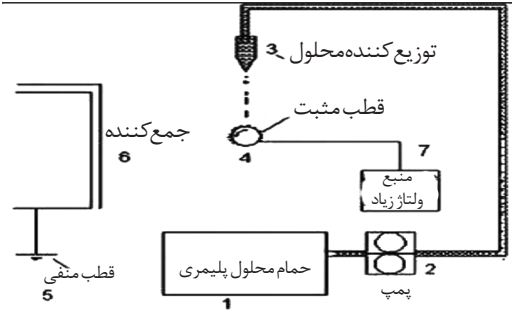
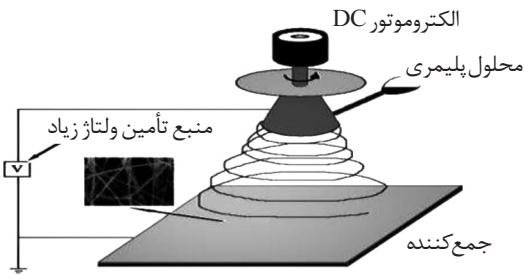


شکل ۱۷- تشکیل جت در سطح رشته‌ساز سیلندری ثابت [۴۰].

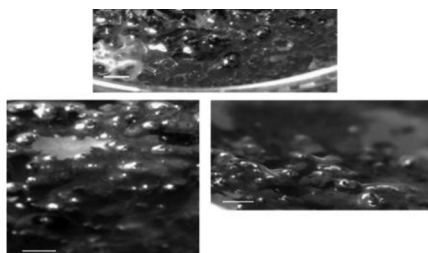
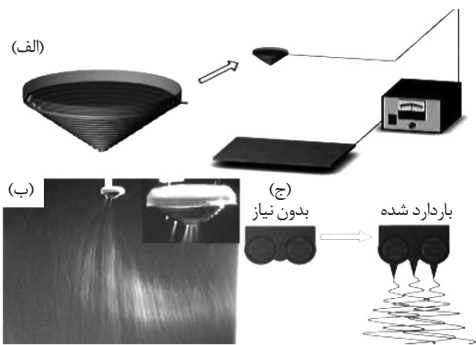
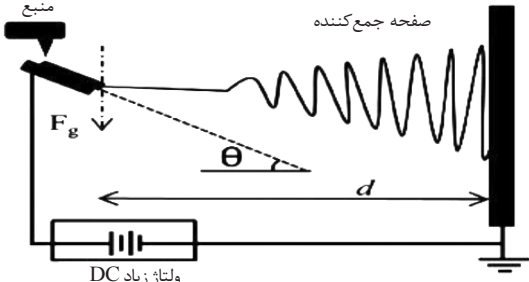
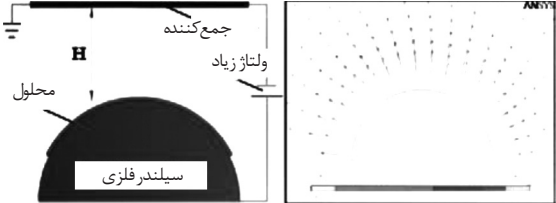


شکل ۱۸- دستگاه الکترورسی برای رشته‌ساز صفحه‌ای و سیلندری و تصاویری از دو فرایند الکترورسی [۴].

جدول ۱- مقایسه کلی انواع مختلف رشته‌سازهای الکتروریسی بدون سوزن.

شکل رشته‌ساز	قطر نانوالیاف (nm)	مقدار تولید در مقایسه با الکتروریسی سوزنی (برابر)	بازده (g/h)	نوع رشته‌ساز
	357 ± 127	۳۰	۸/۶	سیلندری
	257 ± 77	۲۰	۶/۲	صفحه‌ای
	344 ± 105	۱۰	۳/۱	توپی
	250 ± 50	۸ تا ۳۰	۹/۲۴ تا ۲/۴۹	حلقه‌ای ماریچ
	-	۲۴ تا ۴۵ بار	۱۳ تا ۷	غلتک چرخشی در الکتروریسی رو به پایین
	-	۱۰۰۰	۳۰۰	مخروطی

ادامه جدول ۱.

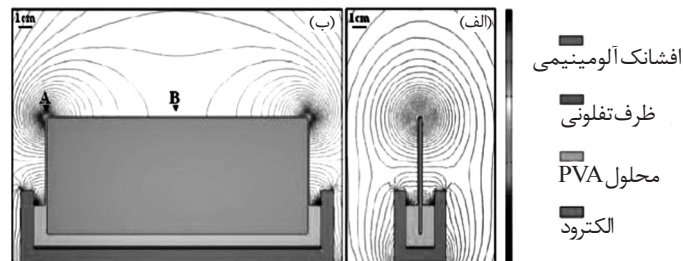
	-	۱۲	۴	استفاده از سیال مغناطیسی به عنوان رشته‌ساز
	۲۰۰-۳۰۰ nm	۱۳	۴	حلقه سیم پیچ مخروطی
<p>هندسه رشته‌ساز صفحه‌ای زاویه‌دار</p> 	-	۵	۱/۵	صفحه‌ای زاویه‌دار
	-	۲۶۰	۷۸ g/h	سیلندری ثابت

صفحه‌ای ۴۲ kV است. ولتاژ بحرانی، بیانگر حداقل ولتاژ مورد نیاز برای تشکیل جت است. تشکیل جت در رشته‌ساز سیلندری ابتدا در گوشه‌های آن و با افزایش ولتاژ تشکیل جت‌ها در وسط سیلندر نیز شروع می‌شود. این تفاوت‌ها در نحوه تشکیل جت‌ها و ولتاژ بحرانی دو رشته‌ساز را با بررسی میدان الکتریکی، می‌توان تشریح کرد. منحنی میدان الکتریکی دو رشته‌ساز و اطراف آن، به روش اجزای محدود در شکل ۱۹ نشان داده شده است. میدان الکتریکی، محرک اصلی برای تشکیل اولیه جت پلیمری است. برای سامانه صفحه‌ای، میدان الکتریکی نزدیک لبه صفحه، چند سانتی‌متر اول پس از رشته‌ساز به سرعت کاهش می‌یابد و به سمت جمع‌کننده پایدار می‌شود. برای رشته‌ساز سیلندری، منحنی شدت میدان الکتریکی در انتهای سیلندر

روی سطح رشته‌ساز قرار می‌گیرد. ولتاژ زیاد به وسیله سیم مسی به داخل حمام و در نتیجه محلول پلیمری متصل می‌شود و آن را باردار می‌کند. برای تشکیل میدان الکتریکی بین جمع‌کننده و رشته‌ساز، ولتاژ منفی نیز به جمع‌کننده متصل می‌شود. با اعمال ولتاژ و چرخش رشته‌ساز جت‌های بی‌شماری ایجاد و نانوالیاف روی جمع‌کننده تشکیل می‌شود. سرعت چرخش رشته‌ساز، ولتاژ به کار رفته و غلظت پلیمر از عوامل اثرگذار در تشکیل جت‌هاست.

بررسی میدان الکتریکی رشته‌سازهای سیلندری و صفحه‌ای
وابستگی رشته‌ساز سیلندری به مقدار ولتاژ، از نوع صفحه‌ای بیشتر بوده و ولتاژ بحرانی برای تشکیل جت در نوع سیلندری ۴۷ kV و برای

افزایش و سپس وقتی غلظت بیش از ۹٪ وزنی شود، روند کاهش می‌یابد. وقتی غلظت زیاد می‌شود، در رشته‌ساز سیلندری به ولتاژ بیشتر برای غلبه بر گرانی محلول پلیمری نیاز است و با توجه به ثابت بودن ولتاژ، بازده کاهش می‌یابد. با اینکه رشته‌ساز سیلندری نسبت به نوع صفحه‌ای مساحت بیشتری دارد، اما بازده آن در ولتاژهای زیاد شبیه به هم است و این نیز، به دلیل شدت میدان الکتریکی بیشتر در لبه‌های صفحه است که باعث تولید جت‌های بیشتر در زمان یکسان نسبت به نوع سیلندری می‌شود.



شکل ۱۹- منحنی میدان الکتریکی در اطراف افشانک: (الف) صفحه‌ای و (ب) سیلندری [۴].

مقایسه تصاویر میکروسکوپ الکترونی نانوالیاف پلی‌وینیل الکل حاصل از رشته‌سازهای صفحه‌ای و سیلندری

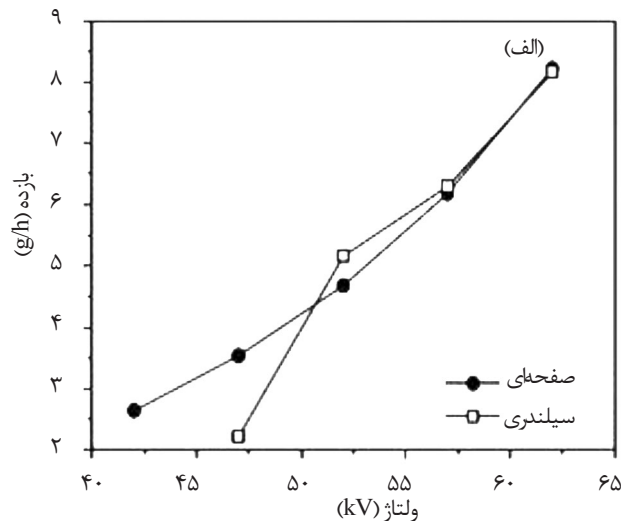
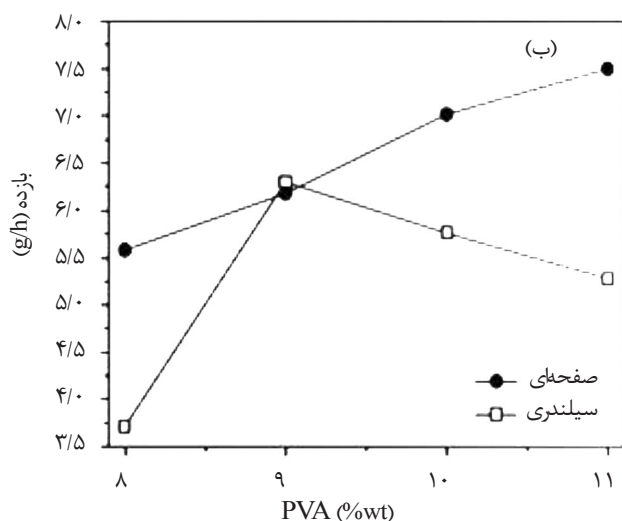
تصاویر نانوالیاف الکتروسی شده از رشته‌ساز صفحه‌ای نشان‌دهنده ساختار لیفی بدون مهره است. با افزایش ولتاژ اعمالی از ۴۷ kV به ۶۲ kV متوسط قطر الیاف از ۳۴۰ nm به ۱۹۴ nm کاهش می‌یابد و توزیع قطر هم باریک‌تر می‌شود. برای رشته‌ساز سیلندری متوسط قطر الیاف و توزیع قطر وابستگی بسیار کمی به ولتاژ اعمالی نشان داد. به کار بردن ولتاژهای مختلف بین ۴۷ kV تا ۶۲ kV اثر کمی بر متوسط قطر الیاف و توزیع آن دارد. اگرچه، الیاف در انتهای سیلندر فقط زمانی تولید می‌شوند که ولتاژ به کمتر از ۵۷ kV برسد. در همین ولتاژ، نانوالیاف الکتروسی شده از رشته‌ساز صفحه‌ای، اندکی ظریف‌تر از نانوالیاف تولیدی از رشته‌ساز سیلندری‌اند. در حالی که در ولتاژهای بیشتر، نانوالیاف تولیدی از رشته‌ساز صفحه‌ای در مقایسه با نوع سیلندری ظریف‌ترند. تصاویر میکروسکوپ نانوالیاف الکتروسی شده از پلی‌وینیل الکل به وسیله رشته‌سازهای صفحه‌ای و سیلندری، در شکل ۲۱ نشان داده شده است.

بررسی نحوه تولید نانوالیاف با استفاده از رشته‌ساز حلقه‌ای مارپیچ
طرح کلی و نحوه تولید نانوالیاف با استفاده از رشته‌ساز حلقه‌ای مارپیچ در سامانه الکتروسی بدون سوزن، در شکل ۲۲ نشان داده شده است. این حلقه مارپیچ از سیم مسی ساخته شده است که با چرخش

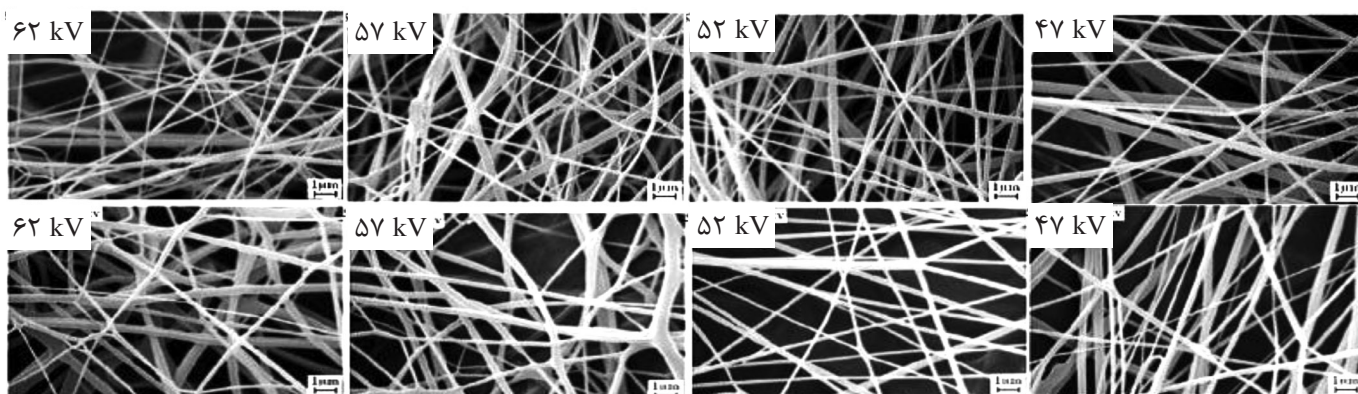
شبیه به نوع صفحه‌ای است. اما، شدت میدان الکتریکی کمتر از لبه‌های صفحه است. شدت میدان الکتریکی در وسط سطح سیلندر به مراتب کمتر از انتهای سیلندر است و شدت میدان الکتریکی به سمت جمع‌کننده، به آهستگی کاهش می‌یابد. توزیع شدت میدان الکتریکی در طول سطح رشته‌ساز سیلندری، باعث تولید نانوالیاف خشن‌تر و زبرتر از سطح وسط سیلندر، در مقایسه با تولید از انتهای سیلندر می‌شود. در نتیجه، الیافی که از داخل رشته‌ساز سیلندری جمع می‌شوند، دارای نانوالیاف با توزیع قطر پهن‌تری هستند، چون کمتر تحت تأثیر ولتاژ قرار دارند. در مقایسه، توزیع شدت میدان الکتریکی در بالای لبه صفحه تیزتر و همانند انتهای سیلندر است [۴۲].

مقایسه بازده رشته‌سازهای صفحه‌ای و سیلندری در تولید نانوالیاف پلی‌وینیل الکل

بازده نانوالیاف سیلندری و صفحه‌ای برای دو حالت مختلف، در شکل ۲۰ نشان داده شده است. بازده و بهره‌وری الکتروسی سیلندری، تحت تأثیر ولتاژ اعمالی و غلظت پلیمر است. با افزایش ولتاژ اعمالی، سرعت تولید برای هر دو سامانه الکتروسی افزایش می‌یابد که شیب تغییرات در رشته‌ساز صفحه‌ای نسبت به سیلندری کمتر است. با افزایش غلظت پلیمر، بازده الکتروسی صفحه‌ای نیز به‌طور ثابت افزایش می‌یابد. در حالی که در سامانه الکتروسی سیلندری بازده ابتدا با افزایش غلظت



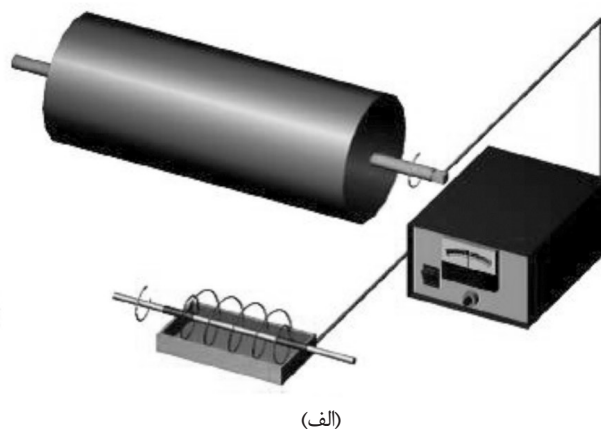
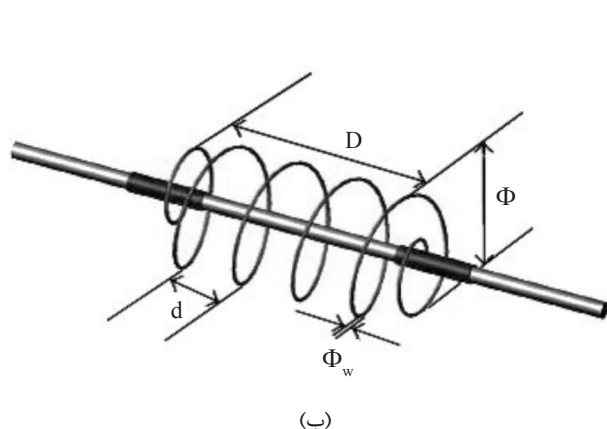
شکل ۲۰- بازده تولید نانوالیاف در شرایط مختلف: (الف) ولتاژ اعمالی (PVA = ۹ wt %) و (ب) غلظت PVA (ولتاژ ۵۷ kV) [۴].



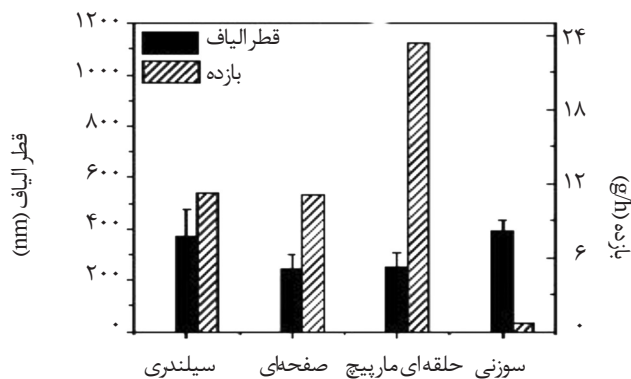
شکل ۲۱- تصاویر میکروسکوپ الکترونی از نانوالیاف الکترورسی شده پلی‌وینیل الکل به وسیله رشته‌ساز صفحه‌ای (بالا) و سیلندری (پایین) با ولتاژهای مختلف (۹۰٪ وزنی پلی‌وینیل الکل و فاصله ریسندگی ۱۳ cm) [۴].

از سطح حلقه تشکیل می‌شود. نتایج محاسبه میدان الکتریکی در شکل ۲۳ نشان می‌دهد، توزیع میدان الکتریکی در طول سطح حلقه نایکنواخت و ابعاد حلقه در میدان الکتریکی بالاتر اثرگذار است. همان‌طور که در این شکل نشان داده

حلقه در حمام، محلول روی سیم مسی قرار می‌گیرد. خواص گرانیروی محلول پلیمری، به تشکیل لایه‌ای با توزیع یکنواخت از محلول روی حلقه کمک می‌کند. ولتاژ بحرانی برای تشکیل جت پلی‌وینیل الکل و در سطح حلقه حدود ۴۰ kV است. با افزایش ولتاژ، جت‌های بیشتری



شکل ۲۲- (الف) طرح کلی دستگاه الکترورسی حلقه‌ای ماریبیچ، (ب) بزرگ‌نمایی تصویر حلقه و تصاویری از فرایند الکترورسی حلقه‌ای ماریبیچ (ج) تصویر جلو و (د) تصویر کناری [۱۶].



شکل ۲۴- قطر و بازده الیاف الکتروسی شده PAN [۳۰].

استحکام کم نانوالیاف حاصل از الکتروسی با سوزن، استفاده از آن‌ها را برای کاربرد در فیلترها محدود می‌کند [۴۳]. با گسترش استفاده از الکتروسی بدون سوزن این محدودیت برداشته شد و استفاده از نانوالیاف در صنعت فیلتر به‌طور گسترده‌ای در حال فزونی است. شرکت Donaldson در آمریکا که از شرکت‌های بزرگ در تولید فیلتر است، به پیشرفت‌های بزرگی در تولید فیلتر طی ۲۰ سال اخیر دست یافته است. این شرکت، روزانه ۱۰ هزار متر مواد الکتروسی شده تولید می‌کند [۴۴، ۴۵]. محصولات الکتروسی شده به شکل وب از الیاف زیر میکرون، در فرایند یک‌مرحله‌ای تشکیل می‌شوند. با استفاده از دستگاه‌های الکتروسی بدون سوزن می‌توان وب‌های بزرگ‌تر تولید کرد. وب‌های نانوالیاف پلیمری، دارای چند خاصیت مثل وزن پایه کم، نفوذپذیری زیاد و اندازه منافذ کوچک هستند که برای کاربرد در فیلتر کردن بسیار سودمند و باصرفه‌اند. از جمله امتیازهای استفاده از مواد لیفی برای فیلتر کردن، افزایش کارایی فیلتر و کاهش مقاومت هواست [۴۶، ۴۷]. کارایی فیلتر کردن به عنوان مهم‌ترین پارامتر در فیلتر، وابسته به ظرفیت الیاف است. از آنجا که عناصر ساختاری و کانال‌های فیلتر باید با اندازه ذرات، به منظور نگهداری آن‌ها در فیلتر مطابقت داشته باشند، یک راه مستقیم برای افزایش کارایی و اثربخشی فیلتر، استفاده از الیاف در اندازه نانومتر، در ساختار آنهاست [۴۸-۵۰].

نتیجه‌گیری

در این مقاله، پژوهش‌های انجام شده در حوزه الکتروسی بدون سوزن به منظور افزایش مقدار تولید مرور شده است. افزایش تولید امکان کاربرد مواد الکتروسی شده را در عمل افزایش می‌دهد. تقریباً با تمام رشته‌سازهای بدون سوزن (چرخشی و ثابت) امکان تولید در مقیاس زیاد فراهم شده است. بسیاری از روش‌های گفته شده فقط در مرحله آزمون قرار دارند و امکان استفاده از آن‌ها، برای همه محلول‌های قابل الکتروسی وجود ندارد. در بسیاری از روش‌ها، کنترل تأمین محلول پلیمری روی رشته‌ساز و محصول نهایی به راحتی امکان‌پذیر نیست. از لحاظ مقدار انرژی مصرفی، زمان، هزینه، کم خطر بودن و راحتی در

شده است، سطح حلقه شدت میدان الکتریکی بیشتری دارد، چون سیم حلقه‌ای شعاع کمتری دارد. بدین ترتیب، شدت میدان الکتریکی را می‌توان در همه بخش‌های حلقه پیدا کرد. پیک شدت میدان الکتریکی در بالای حلقه، بیشتر است [۱۶].

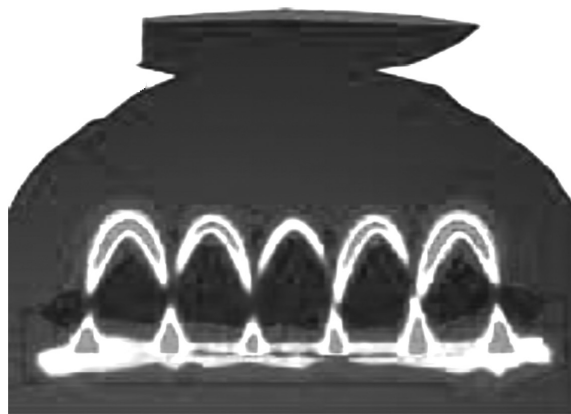
مقایسه بازده و قطر نانوالیاف پلی‌آکریلو نیتریل برای رشته‌سازهای حلقه‌ای، سیلندری، صفحه‌ای و سوزنی

توزیع میدان الکتریکی برای سامانه صفحه‌ای و حلقه‌های مارپیچ باریک‌تر و در نتیجه میدان الکتریکی در ناحیه‌های تولید الیاف با همپوشانی بیشتر، الیافی ظریف‌تر از سامانه‌های متداول تولید می‌کند. بررسی میدان الکتریکی، می‌تواند برای درک رفتار الکتروسی استفاده شود. الکتروسی در رشته‌ساز سیلندری، در دو ناحیه با شدت میدان الکتریکی متفاوت مطابق شکل ۱۹ انجام می‌شود که در نتیجه الیاف تولید شده از این دو ناحیه تفاوت زیادی را در متوسط قطر و توزیع آن نشان می‌دهند. در رشته‌سازهای صفحه‌ای و حلقه‌ای، الیاف به‌طور عمده در ناحیه با شدت میدان الکتریکی زیاد تولید می‌شوند. نه تنها الیاف ظریف‌تر، بلکه توزیع قطر باریک‌تری نیز دارند. حلقه‌های مارپیچ که ترکیبی از ناحیه‌های تولید الیاف با شدت میدان الکتریکی زیادند، ممکن است، تا حدی سرعت تولید بیشتری نسبت به رشته‌ساز صفحه‌ای داشته باشند [۳۰].

همان‌طور که در شکل ۲۴ مشاهده می‌شود، با توجه به بیشتر بودن شدت میدان الکتریکی در رشته‌ساز حلقه‌ای، سرعت تولید نسبت به انواع سیلندری و صفحه‌ای بیشتر است. از طرف دیگر، بیشتر بودن شدت میدان الکتریکی، باعث کشیده شدن بیشتر جت نانوالیاف در سطح رشته‌ساز حلقه‌ای می‌شود و در نهایت قطر نانوالیاف تولیدی نسبت به بقیه ظریف‌تر است.

کاربرد نانوالیاف حاصل از الکتروسی بدون سوزن در فیلترها

صنعت فیلتر از صنایعی است که امروزه در حال استفاده گسترده از نانوالیاف است. از پارامترهای مهم در استفاده از نانوالیاف برای تولید فیلتر، سرعت تولید در مقیاس زیاد است، چرا که حجم، ضخامت و



شکل ۲۳- منحنی شدت میدان الکتریکی رشته‌ساز حلقه‌ای مارپیچ [۳۰].

ندارد و این موضوع از نواقص عمده استفاده از آن‌ها به‌شمار می‌آید. پیچیدگی طراحی در رشته‌سازهای ثابت نیز نسبت به انواع چرخشی بسیار بیشتر است.

الکتروریسی، استفاده از رشته‌سازهای سیلندری، صفحه‌ای و حلقه‌ای مارپیچ چرخشی، می‌توانند در الکتروریسی بدون سوزن بهترین پیشنهاد باشند. در اکثر رشته‌سازهای ثابت، امکان تولید پیوسته نانوالیاف وجود

مراجع

- Bhardwaj N. and Kundu S.C., Electrospinning: A fascinating fiber fabrication technique, *Biotechnol. Adv.*, 28, 325-347, 2010.
- Reneker D.H. and Chun I., Nanometre diameter fibres of polymer, produced by electrospinning, *Nanotechnology*, 7, 216-223, 1996.
- Greiner A. and Wendorff J.H., Electrospinning: A fascinating method for the preparation of ultrathin fibers, *Angew. Chem. Int. Ed.*, 46, 5670-5703, 2007.
- Niu H., Lin T., and Wang X., Needleless electrospinning. I. A comparison of cylinder and disk nozzles, *J. Appl. Polym. Sci.*, 114, 3524-3530, 2009.
- Baji A., Mai Y.W., Wong S.C., Abtahi M., and Chen P., Electrospinning of polymer nanofibers: Effects on oriented morphology, structures and tensile properties, *Compos. Sci. Technol.*, 70, 703-718, 2010.
- Moridi Mahdiah Z., Mottaghitalab V., Piri N., and Haghi A.K., Conductive chitosan/multiwalled carbon nanotubes electrospun nanofiber feasibility, *Korean J. Chem. Eng.*, 29, 111-119, 2012.
- Theron S., Zussman E., and Yarin A., Experimental investigation of the governing parameters in the electrospinning of polymer solutions, *Polymer*, 45, 2017-2030, 2004.
- Vonch J., Yarin A., and Megaridis C., Electrospinning: A study in the formation of nanofibers, *J. Undergrad. Res.*, 1, 1-6, 2007.
- Niu H. and Lin T., Fiber generators in needleless electrospinning, *J. Nanomater.*, 2012, 12, 2012.
- Cengiz F., Krucińska I., Gliścińska E., Chrzanowski M., and Goektepe F., Comparative analysis of various electrospinning methods of nanofibre formation, *Fibres Text. East Eur.*, 17, 13-19, 2009.
- Gorji M., Jeddi A., and Gharehaghaji A., Fabrication and characterization of polyurethane electrospun nanofiber membranes for protective clothing applications, *J. Appl. Polym. Sci.*, 125, 4135-4141, 2012.
- 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.
- Fang J., Niu H., Lin T., and Wang X., Applications of electrospun nanofibers, *Chinese Sci. Bull.*, 53, 2265-2286, 2008.
- Theron S., Yarin A., Zussman E., and Kroll E., Multiple jets in electrospinning: Experiment and modeling, *Polymer*, 46, 2889-2899, 2005.
- Varesano A., Carletto R.A., and Mazzuchetti G., Experimental investigations on the multi-jet electrospinning process, *J. Mater. Proc. Tech.*, 209, 5178-5185, 2009.
- Wang X., Niu H., Wang X., and Lin T., Needleless electrospinning of uniform nanofibers using spiral coil spinners, *J. Nanomater.*, 2012, 3, 2012.
- Li D. and Xia Y., Electrospinning of nanofibers: Reinventing the wheel, *Adv. Mater.*, 16, 1151-1170, 2004.
- Dosunmu O., Chase G., Kataphinan W., and Reneker D., Electrospinning of polymer nanofibres from multiple jets on a porous tubular surface, *Nanotechnology*, 17, 1123, 2006.
- Yang Y., Jia Z., Li Q. Hou L., Gao H., Wang L., and Guan Z., Multiple jets in electrospinning, Properties and applications of Dielectric Materials, Proceeding of 8th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, 440-443, 2006.
- Jirsak O., Sanetnik F., Lukas D., Kotek V., Martinova L., and Chalopek J., A method of nanofibers production from a polymer solution using electrostatic spinning and a device for carrying out the method, *W. Pat. 2,005,024,101*, 2005
- Jirsak O., Sanetnik F., Lukas D., Kotek V., Martinova L., and Chaloupek J., A method of nanofibres production from a polymer solution using electrostatic spinning and a device for carrying out the method, *E. Pat. 1,673,493*, 2009.
- Yarin A. and Zussman E., Upward needleless electro-

- pinning of multiple nanofibers, *Polymer*, 45, 2977-2980, 2004.
23. Liu Y., He J.H., and Yu J.Y., Bubble-electrospinning: A novel method for making nanofibers, *J. Phys: Conference Series*, 96, 2008.
 24. Badrossamay M.R. McIlwee H.A., Goss J.A., and Parker K.K., Nanofiber assembly by rotary jet-spinning, *Nano Lett.*, 10, 2257-2261, 2010.
 25. Forward K.M. and Rutledge G.C., Free surface electrospinning from a wire electrode, *Chem. Eng. J.*, 183, 492-503, 2012.
 26. Lukas D., Sarkar A., and Pokorny P., Self-organization of jets in electrospinning from free liquid surface: A generalized approach, *J. Appl. Phys.*, 103, 084309-084309-7, 2008.
 27. Kostakova E., Meszaros L., and Gregor J., Composite nanofibers produced by modified needleless electrospinning, *Mater Lett.*, 63, 2419-2422, 2009.
 28. Niu H., Wang X., and Lin T., *Nanofibers-Production, Properties and Functional Applications*, InTech, Chapt. 2, 2011.
 29. Wang X., Niu H., Wang X., and Lin T., Large-scale electrospinning of polymer nanofibers using needleless nozzle, Proceedings of the 38th Textile Research Symposium, 117-122, 2009.
 30. Niu H., Wang X., and Lin T., Upward needleless electrospinning of nanofibers, *J. Eng. Fiber. Fiber.*, 7, 17-22, 2012.
 31. Cengiz F., Dao T.A., and Jirsak O., Influence of solution properties on the roller electrospinning of poly(vinyl alcohol), *Polym. Eng. Sci.*, 50, 936-943, 2010.
 32. Tang S., Zeng Y., and Wang X., Splashing needleless electrospinning of nanofibers, *Polym. Eng. Sci.*, 50, 2252-2257, 2010.
 33. Lu B., Wang Y., Liu Y., Duan H., Zhou J., Zhang Z., Wang Y., Li X., Wang W., and Lan W., Superhigh-throughput needleless electrospinning using a rotary cone as spinneret, *Small*, 6, 1612-1616, 2010.
 34. Liu Y. and He J.H., Bubble electrospinning for mass production of nanofibers, *Int. J. Nonlinear Sci.*, 8, 393-396, 2007.
 35. Yang R., He J., Xu L., and Yu J., Bubble-electrospinning for fabricating nanofibers, *Polymer*, 50, 5846-5850, 2009.
 36. Wang X., Niu H., Lin T., and Wang X., Needleless electrospinning of nanofibers with a conical wire coil, *Polym. Eng. Sci.*, 49, 1582-1586, 2009.
 37. Wang X. and Xu W., Effect of experimental parameters on needleless electrospinning from a conical wire coil, *J. Appl. Polym. Sci.*, 123, 3703-3709, 2012.
 38. Thoppey N.M., Bochinski J.R., Clarke L.I., and Gorga R.E., Unconfined fluid electrospun into high quality nanofibers from a plate edge, *Polymer*, 51, 4928-4936, 2010.
 39. Thoppey N., Bochinski J., Clarke L., and Gorga R., Edge electrospinning for high throughput production of quality nanofibers, *Nanotechnology*, 22, 345301, 2011.
 40. Wu D., Huang X., Lai X., Sun D., and Lin L. High throughput tip-less electrospinning via a circular cylindrical electrode, *J. Nanosci. Nanotechnol.*, 10, 4221-4226, 2010.
 41. Sutka A., Kukle S., Gravitis J., Milašius R., and Malašauskienė J., Nanofibre electrospinning poly(vinyl alcohol) and cellulose composite mats obtained by use of a cylindrical electrode, *Adv. Mater. Sci. Eng.*, 2013, 2013.
 42. Yang Y., Jia Z., Liu J., Li Q., Hou L., Wang L., and Guan Z., Effect of electric field distribution uniformity on electrospinning, *J. Appl. Phys.*, 103, 104307-104307-11, 2008.
 43. Tsai P.P., Roth J.R., and Chen W., Strength, surface energy, and ageing of meltblown and electrospun nylon and polyurethane (PU) fabrics treated by a one atmosphere uniform glow discharge plasma (OAUGDP™), *Text. Res. J.*, 75, 819-825, 2005.
 44. Grafe T. and Graham K., Polymeric nanofibers and nanofiber webs: A new class of nonwovens, *Nonwoven Technol. Rev.*, 51-5, 2003.
 45. Luzhansky D.M., Quality control in manufacturing of electrospun nanofiber composites, *Int. Nonwoven J.*, 12, 2004.
 46. Wang X., Chen X., Yoon K., Fang D., Hsiao B.S., and Chu B., High flux filtration medium based on nanofibrous substrate with hydrophilic nanocomposite coating, *Env. Sci. Technol.*, 39, 7684-7691, 2005.
 47. Li L., Frey M.W., and Green T.B., Modification of air filter media with nylon-6 nanofibers, with nylon-6 nanofibers, *J. Eng. Fiber. Fiber.*, 1, 2006.
 48. Barhate R. and Ramakrishna S., Nanofibrous filtering media: Filtration problems and solutions from tiny materials, *J. Membr. Sci.*, 296, 1-8, 2007.

49. Gopal R., Kaur S., Ma Z., Chan C., Ramakrishna S., and Matsuura T., Electrospun nanofibrous filtration membrane, *J. Membr. Sci.*, 281, 581-586, 2006.
50. Desai K., Kit K., Li J., Michael Davidson P., Zivanovic S., and Meyer H., Nanofibrous chitosan non-wovens for filtration applications, *Polymer*, 50, 3661-3669, 2009.

A Review on Performance of Spinnerets in Needleless Electrospinning

I. Esmaeelzadeh, V. Mottaghitalab*, and A. Khodaparast Haghi

Textile Engineering Department, Faculty of Engineering, University of Guilan, P.O. Box: 41635-3756, Rasht, Iran

Received 1 February 2014; Accepted 8 March 2014

Abstract

Electrospinning is a facile and inexpensive method for production of nanofibers, at submicron to nanometer scales, from passage of polymer solutions through a charged jet. In recent years, most electrospinning experiments have been carried out on the basis of one-needle set up with a low production rate which has been an exhaustive challenge for researchers even in laboratory scale. The broad application of this exclusive technique illuminates a road map toward development of new techniques with high production rates. The needleless electrospinning enables the manufacturer to produce nanofiber in industrial scale with acceptable production rate, physical and mechanical specifications. The spinneret in needleless electrospinning plays a crucial role in nanofiber production and the parameters such as geometry, size and rotation rate as operational parameters are able to control nanofibers characteristics. This review is an attempt to introduce a variety of spinnerets in needleless electrospinning processes and explains how spinnerets may affect the quality and productivity of nanofibers.

Keywords

needleless electrospinning,
spinneret,
nanofibers

(*) Address Correspondence to V. Mottaghitalab, Email: motaghitalab@guilan.ac.ir