



بررسی تأثیر استوانه چرخان و غلظت پلیمر بر ریخت‌شناسی نانوالیاف الکترورسی شده

TiO₂/PVPثریا میرمحمدصادقی^۱، محمدرضا واعظی^{۱*}، اصغر کاظم‌زاده^۲^۱ پژوهشکده فناوری نانو و مواد پیشرفته، پژوهشگاه مواد و انرژی، مشکین دشت، البرز، ایران^۲ پژوهشکده نیمه هادی‌ها، پژوهشگاه مواد و انرژی، مشکین دشت، البرز، ایران

تاریخچه مقاله:

ثبت اولیه: ۱۳۹۹/۰۳/۲۴

دریافت نسخه اصلاح شده: ۱۳۹۹/۰۴/۲۵

پذیرش قطعی: ۱۳۹۹/۱۲/۲۹

کلیدواژه‌ها:

الکترورسی،

نانوالیاف TiO₂/PVP،

استوانه چرخان،

صفحه تخت ساکن،

ریخت‌شناسی

چکیده در این پژوهش، نانوالیاف الکترورسی شده TiO₂/PVP با استفاده از دو نوع جمع‌کننده‌ی صفحه تخت ساکن و استوانه چرخان تهیه شدند و اثر نوع جمع‌کننده و غلظت پلیمر PVP در محلول سُل TIP/PVP (۳، ۵ و ۷ درصد وزنی) بر ریخت‌شناسی نانوالیاف تهیه‌شده، به کمک تصاویر SEM و تعیین میانگین قطر نانوالیاف و انحراف معیار آن‌ها، بررسی شدند. سرعت چرخش استوانه برای همه نمونه‌های تهیه‌شده با آن ۵۰۰ دور در دقیقه بود، درحالی‌که دیگر شرایط الکترورسی اعم از ولتاژ، سرعت تزریق، فاصله نوک سوزن تا سطح جمع‌کننده و نوع سوزن برای هر جفت از نمونه‌های تهیه‌شده از هریک از محلول‌های سُل و دو نوع جمع‌کننده یکسان بود. میانگین قطر نانوالیاف TiO₂/PVP تولیدشده با استوانه چرخان و انحراف معیار آن از ۵۸ ± ۱۴۴ نانومتر (از سُل حاوی ۳ درصد وزنی PVP و تحت ولتاژ ۱۰ کیلوولت) به ۷۱ ± ۱۲۲ نانومتر (از سُل حاوی ۵ درصد وزنی PVP و تحت ولتاژ ۱۵ کیلوولت) کاهش نشان داد که به‌مراتب کمتر از نمونه‌های مشابه تولیدشده با صفحه تخت ساکن بودند. با افزایش غلظت پلیمر به ۷ درصد وزنی، میانگین قطر نانوالیاف TiO₂/PVP تولیدشده با استوانه چرخان و صفحه تخت ساکن به‌ترتیب ۱۳۵ ± ۲۹۲ و ۱۲۲ ± ۲۵۸ نانومتر به‌دست آمد. این نتایج نشان می‌دهد که با افزایش غلظت پلیمر در محلول سُل TIP/PVP، باید سرعت چرخش استوانه جمع‌کننده را متناسب با آن افزایش داد تا بتوان نانوالیاف با قطر مورد نظر تولید کرد.

<https://doi.org/10.30501/jamt.2021.233515.1095>URL: http://www.jamt.ir/article_128380.html

JAMT: Vol. 9, No. 4, (Winter 2021), 59-69

Effects of Rotating Drum and Polymer Concentration on Morphology of Electrospun TiO₂/PVP Nanofibers

Sorayya Mirmohammad Sadeghi¹, Mohammadreza Vaezi^{1*}, Asghar Kazemzadeh²¹ Department of Nanotechnology and Advanced Materials, Materials and Energy Research Center (MERC), MeshkinDasht, Alborz, Iran² Department of Semiconductors, Materials and Energy Research Center (MERC), MeshkinDasht, Alborz, Iran**Paper History:**

Received: 2020-06-13

Revised in revised form: 2020-07-15

Accepted: 2021-03-19

Abstract In this research work, electrospun TiO₂/PVP nanofibers were prepared by using two different collectors, i.e., flat stationary plate and rotating drum. The effects of these collectors in conjunction with polymer concentration in TIP/PVP sol solutions (i.e., 3, 5, and 7 wt. %) were investigated on morphologies of the as-spun TiO₂/PVP composite nanofibers. SEM micrographs were used for determination of the average

*عهده دار مکاتبات

نشانی: ایران، البرز، مشکین دشت، پژوهشگاه مواد و انرژی، پژوهشکده فناوری نانو و مواد پیشرفته، تلفن: ۰۲۶-۳۶۲۸۰۰۴۰، دورنگار: ۰۲۶-۳۶۲۰۱۸۸۸

پیام نگار: m_r_vaezi@merc.ac.ir

Please cite this article as: Mirmohammad Sadeghi, S., Vaezi, M. R., Kazemzadeh, A., "Effects of rotating drum and polymer concentration on morphology of electrospun TiO₂/PVP nanofibers", *Journal of Advanced Materials and Technologies (JAMT)*, Vol. 9, No. 4, (2021), 59-69. (<https://doi.org/10.30501/jamt.2021.233515.1095>).



Keywords:

Electrospinning,
TiO₂/PVP Nanofibers,
Rotating Drum,
Flat Stationary Plate,
Morphology

nanofiber diameters and their standard deviations (SDs). Rotating speed of the collecting drum was set at 500 rpm for all samples prepared by it, while other electrospinning parameters (i.e., applied voltage, flow rate, tip-to-collector distance, and needle gage) were the same for the counterpart samples prepared from each of sol solutions by two types of collectors, throughout the experiment. It was observed that TiO₂/PVP nanofibers electrospun by rotating drum have average diameters and SD of 144 ± 58 nm (from sol solution with 3 wt. % PVP at applied voltage of 10 kV) and 122 ± 71 nm (from sol solution with 5 wt. % PVP at applied voltage of 15 kV). These magnitudes were pretty much lower than the average diameters of TiO₂/PVP nanofiber prepared by a flat stationary plate. The average diameters of TiO₂/PVP nanofiber prepared by flat stationary plate and rotating drum were 258 ± 122 and 292 ± 135 nm, respectively when polymer concentration in TIP/PVP sol solution increased to 7 wt. %. It is clearly shown that by increasing polymer concentration in electrospinning solution, the average diameter of the electrospun TiO₂/PVP nanofibers increased, afterward. Therefore, rotational speed of collecting drum should be increased rationally if there is a need for preparation of finer electrospun nanofibers.

<https://doi.org/10.30501/jamt.2021.233515.1095>

URL: http://www.jamt.ir/article_128380.html

۱- مقدمه

الکتروریسی به عنوان روشی برای ساخت غشاها و لایه های بی بافت از نانوالیاف شناخته می شود و به کار می رود. این ساختار، به واسطه نشست تصادفی نانوالیاف بر سطح جمع کننده ای ایجاد می شود که معمولاً از نوع جمع کننده رسانای جامد به صورت ساکن است [۱].

جمع کننده های رسانای جامد متحرک از جمله ابزارهای معرفی شده برای به دست آوردن نانوالیاف با ساختار منظم محسوب می شوند [۴-۲] که برای تولید نانوالیاف هم جوار و یا لایه های ضخیم نانوالیاف به کار می روند. ضخامت لایه بی بافت حاصل از نانوالیاف الکتروریسی شده در بیشترین حالت به ۱ میلی متر می رسد [۵].

الکتروریسی بر روی یک استوانه چرخان از جمله روش های متداول برای افزایش بازده جمع آوری نانوالیاف است که در عین حال، نوع نشست نانوالیاف را نیز کنترل می کند و با هم جواری نانوالیاف، ساختار ایجاد می کند [۶]. این ساختار می تواند بر کارکرد لایه الکتروریسی شده اثر بگذارد؛ به عنوان مثال، نتایج یک تحقیق نشان داده است که در نانوذرات تورهای پیژوالکتریکی (PENG) به دلیل افزایش سطح سایشی میان الیاف الکتروریسی شده هم جوار در لایه فعال آن، خروجی الکتریکی بیشتر از حالتی بوده است که الیاف لایه فعال آن دارای ساختار تصادفی بوده اند [۷].

سرلک و همکاران [۸] نشان دادند که غلظت پلیمر مهم ترین پارامتر در تعیین قطر الیاف محسوب می شود. از سوی دیگر، با تنظیم قطر نانوالیاف می توان تخلخل و اندازه حفرات غشای حاصل را تنظیم کرد [۹].

آیا در این باره می توان گفت که قطر نانوالیاف؛ به عنوان مهم ترین عامل تأثیرگذار بر ریخت شناسی لایه ها و غشاها حاصل از الکتروریسی؛ می تواند متأثر از نوع جمع کننده نیز

باشد؟ سبزو و همکاران [۲] مشاهده کردند که برای محلول پلیمری حاوی نانوذرات مغناطیسی، با تغییر سطح جمع کننده از صفحه ساکن به استوانه چرخان، قطر نانوالیاف الکتروریسی شده افزایش یافته است. در یک تحقیق دیگر، نانوالیاف TiO₂/PVP با به کارگیری استوانه چرخان با سرعت ثابت ۴۰۰ دور در دقیقه و سرعت های تزریق ۱ تا ۲/۵ میلی لیتر در ساعت، تهیه شدند که افزایش سرعت تزریق محلول سُل، باعث افزایش قطر نانوالیاف شد [۱۰].

از این رو، برای بررسی اثر استفاده از استوانه چرخان بر ریخت شناسی نانوالیاف الکتروریسی شده TiO₂/PVP، به نتایج کارآزمایی و مقایسه آن ها نیازمندیم. ما در مطالعات پیشین، تأثیر پارامترهای پتانسیل اعمال شده، غلظت پیش ماده تیتانیم ایزوپروپوکسید (TIP) [۱۱] و غلظت پلیمر پلی وینیل پیرولیدون (PVP) و سرعت تزریق [۱۲] را بر قطر نانوالیاف الکتروریسی شده TiO₂/PVP برای صفحه جمع کننده ساکن بررسی کردیم. در این مطالعه، نانوالیاف TiO₂/PVP با استفاده از استوانه چرخان، الکتروریسی شده اند و ریخت شناسی آن ها (با تعیین میانگین قطر نانوالیاف و انحراف معیار آن)، با نتایج آزمایش های مربوط به صفحه ساکن، مقایسه و بحث شده است. برای این منظور، نمونه هایی با جمع کننده استوانه چرخان و صفحه ساکن، در شرایط الکتروریسی یکسان، تهیه و باهم مقایسه شده اند تا اثر نوع جمع کننده بر روی قطر نانوالیاف هر جفت نمونه تهیه شده از هر یک از محلول های سُل به دست آید تا افزون بر حفظ ریخت شناسی نانوالیاف، بتوان به کیفیت و خصوصیات مطلوب آن ها نیز اشراف یافت.

۲- روش الکتروریسی و مزایای آن

الکتروریسی یک روش آسان و در دسترس برای تولید الیاف بسیار نازک است. در اثر گسترش روش های این فناوری

۲-۱- اصول حاکم بر روش الکتروریسی

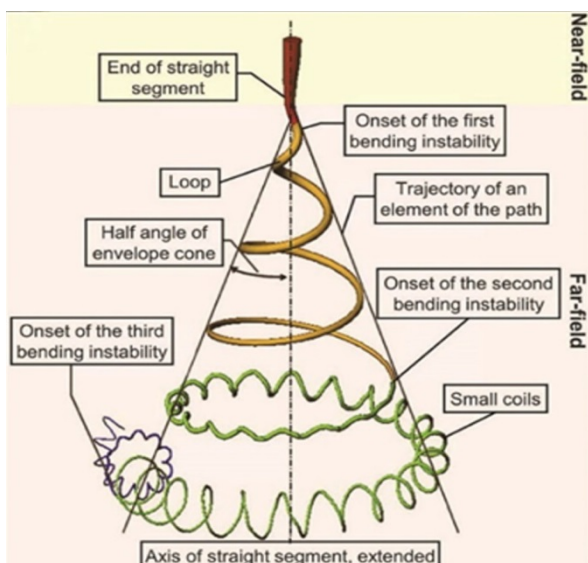
الکتروریسی نوعی فرایند «الکتروهیدرودینامیک» است که طی آن، یک قطرک مایع، دارای بار الکتریکی می‌شود و در اثر میدان الکتروستاتیکی، جریان سریع مایع (جت) تولید می‌کند که باعث کشیدگی و طولیل شدن آن و تبدیل شدن به لیف (الیاف) می‌شود. اجزای دستگاهی تشکیل‌دهنده این روش عبارت‌اند از منبع تولید پتانسیل بالا، پمپ تزریق، جزء ریسنده (معمولاً یک سوزن تزریق زیرجلدی که سر آن بریده و سمباده زده شده است) و یک صفحه رسانا برای جمع کردن الیاف (شکل ۱ الف)).

هنگام الکتروریسی، محلول به صورت قطرک‌هایی در سر سوزن جمع می‌شود که به کشش سطحی محلول بستگی دارد. پس از الکتریسته‌دار شدن، نیروی دافعه بین این بارهای الکتریکی همانم در سطح قطرک، باعث تغییر شکل آن به صورت مخروط می‌شود (مخروط تیلور) که از رأس این مخروط، جریان سریع مایع شکل می‌گیرد که دارای بار الکتریکی است.

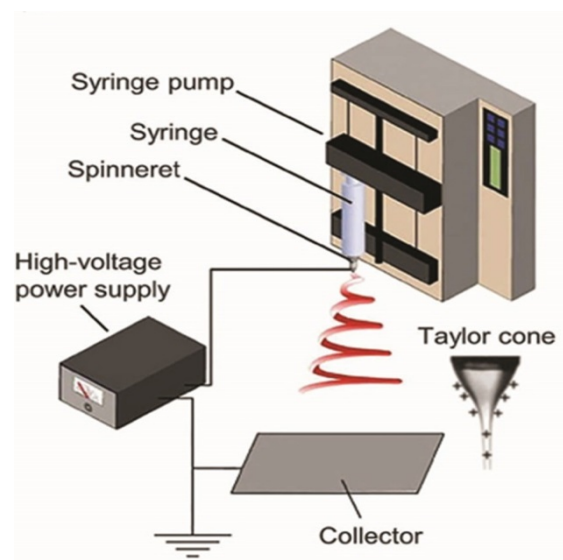
این جریان سریع مایع در ابتدا به خط مستقیم حرکت می‌کند، ولی در نهایت، دچار حرکت‌های پیچشی شدید می‌شود. لیف در اثر کشیده شدن به دلیل ناپایداری‌های خمشی، باریک‌تر شده (شکل ۱ ب)) و سپس جامد می‌شود. الیاف جامدشده بر روی صفحه جمع‌کننده - متصل به زمین، تجمع می‌یابند.

و مهندسی نانوالیاف الکتروریسی‌شده، پیشرفت‌های فراوانی در تهیه و کاربرد نانوالیاف، حاصل شده است که گستره وسیعی از افزارها از غشاهای پالاینده [۹ و ۵]، حامل‌های کاتالیستی [۱۳]، اجزاء ذخیره‌سازی/ تبدیل/ برداشت انرژی [۷، ۱۰ و ۱۴]، داربست‌های زیست‌پزشکی [۱۵ و ۱۶] و پوشش‌های زخم [۱۷] تا افزارهای الکتریکی [۱۸] و نوری [۱۹] را دربر می‌گیرد.

به‌طورکلی، روش الکتروریسی تولید الیاف پیوسته‌ای را امکان‌پذیر می‌سازد که قطر آن‌ها در گستره چند ده نانومتر تا چندین میکرومتر است [۲۰]. به الیاف الکتروریسی‌شده‌ای که قطر آن‌ها کمتر از ۵۰۰ نانومتر باشد، نانوالیاف اطلاق می‌شود. از ابتدای دهه ۱۹۹۰ میلادی، چندین گروه پژوهشی این فناوری را موردتوجه و بررسی مجدد قرار دادند [۲۵-۲۱]. آن‌ها نشان دادند که محلول‌های مختلف پلیمری را می‌توان با این فناوری به نانوالیاف تبدیل کرد و عنوان «الکتروریسی» برای این روش عمومیت یافت. در نهایت، این روش برای تولید الیاف پیوسته و طولیل با قطرهایی در محدوده نانو تثبیت شد. از ابتدای قرن حاضر، توانایی‌های روش الکتروریسی با تولید نانوالیاف کامپوزیتی و سرامیکی، گسترش یافته است [۲۸-۲۶]. نانوالیاف الکتروریسی‌شده که مهندسی شده‌اند، ترکیبات ویژه و ساختارهای نوآرانه‌ای پدید می‌آورند که آن‌ها را برای کاربردهای پیشرفته‌تر مهیا می‌کند.



(ب)



(الف)

شکل ۱. الف) اجزای سامانه الکتروریسی [۲۹] و ب) طرحی از مسیر حرکت و تحول جریان سریع مایع در میدان الکتروستاتیکی [۳۰]

با استفاده از پمپ تزریق، محلول با سرعت ثابت به سوزن تزریق می‌شود. ایجاد اختلاف پتانسیل بین نوک سوزن و صفحه جمع‌کننده، باعث می‌شود تا بارهای مثبت و منفی در محلول از هم جدا شوند و بارهای الکتریکی همنام با بار الکتریکی سوزن، به سطح قطره‌ی تشکیل شده منتقل شوند و بار الکتریکی تجمع یابد. با افزایش اختلاف پتانسیل، بار الکتریکی بیشتری بر سطح قطرک جمع می‌شود، به طوری که چگالی بار سطحی بر سطح قطرک افزایش می‌یابد. در مقابل، کشش سطحی قطرک تمایل دارد که با کاهش انرژی آزاد سطحی، شکل آن را کروی نگه دارد، ولی دافعه الکتروستاتیکی ناشی از تجمع بارهای الکتریکی بر سطح قطرک، تمایل دارد شکل قطره را تغییر دهد؛ بنابراین قطره به شکلی درمی‌آید که مجموع نیروی دافعه الکتروستاتیکی و انرژی آزاد سطحی آن، کمینه باشد [۲۹].

در فرایند الکترورسی، ولتاژ بحرانی برای تشکیل مخروط بر سر نوک سوزن، به خواص محلول بستگی دارد. هنگامی که از یک محلول گرانو استفاده می‌شود، ولتاژ بحرانی اعمال شده، باید نیروی دافعه‌ای ایجاد کند که بتواند بر مجموع کشش سطحی محلول و نیروی ویسکوالاستیک آن غلبه کند. شکل مخروطی قطرک، مادامی که مقدار محلول لازم به آن تزریق شود تا جانشین مایع جهش یافته شود، محفوظ باقی می‌ماند. جریان سریع مایع باردار از رأس مخروط خارج می‌شود که می‌تواند در جهت میدان شتاب بگیرد و کشیده شود تا به صفحه جمع‌کننده برسد.

خواص ویسکوالاستیک مایع باید قادر باشد بر ناپایداری رایلی غلبه کند، در غیر این صورت این ناپایداری، باعث گسستگی جریان شتاب‌دار مایع به قطرک‌هایی می‌شود [۳۰]. حرکت بارهای الکتریکی سطحی به همراه جریان شتاب‌دار مایع ایجاد جریان الکتریکی در آن می‌کند. سرعت جریان شتاب‌دار مایع در انتهای مرحله خطی خود، در حدود ۱ تا ۱۵ متر بر ثانیه محاسبه شده است. بخش مستقیم جریان شتاب‌دار مایع در حدود ۳۰ میلی‌متر است که با کاهش ولتاژ، مقدار آن کاهش می‌یابد. طی شتاب گرفتن جریان شتاب‌دار مایع در خط مستقیم، کشش سطحی و نیروی ویسکوالاستیک محلول تمایل دارد تا مانع از حرکت رو به جلوی آن شود [۳۱]؛ بنابراین شتاب حرکت به مرور کاهش می‌یابد و در

مرحله‌ای، این شتاب به صفر می‌رسد یا ثابت می‌ماند. هر تغییر کوچکی می‌تواند حرکت رو به جلوی جریان شتاب‌دار مایع را مخدوش کند [۳۲]. به این ترتیب، ناپایداری به سرعت ظاهر می‌شود که ناشی از دافعه الکتروستاتیکی بارهای الکتریکی سطحی جریان سریع مایع است، که رژیم میدان- دور را پدید می‌آورد. سه نوع ناپایداری می‌تواند در ناحیه میدان- دور، بر جریان سریع مایع دارای بار الکتریکی، اثر بگذارد [۲۵-۲۲] (شکل ۱ (ب)) که عبارت‌اند از:

۱- ناپایداری رایلی: باعث گسستگی جریان سریع مایع به قطرک‌ها می‌شود که با اعمال میدان الکتریکی قوی، می‌توان آن را کاهش داد.

۲- تقارن محوری که همانند مورد اول بوده با این تفاوت که در میدان الکتریکی قوی‌تر از مورد قبلی، اتفاق می‌افتد.

۳- ناپایداری خمشی که ناشی از تقارن غیر محوری است که به دلیل دافعه الکتروستاتیکی بین بارهای سطحی جریان شتاب‌دار مایع در یک میدان الکتریکی قوی پدید می‌آید [۳۱].

برهم‌کنش بارهای محصور در جریان سریع مایع و نیروی میدان الکتریکی خارجی، باعث ایجاد این سه نوع ناپایداری می‌شود که با تنظیم شرایط فیزیکی- شیمیایی محلول و پارامترهای الکترورسی کنترل می‌شوند.

طی ناپایداری خمشی، در مدت زمان ۰/۰۵ ثانیه یا کمتر، طول جریان سریع مایع می‌تواند تا ۱۰۰۰۰ بار افزایش یابد. در نتیجه، قطر جریان سریع مایع تا چندین مرتبه کاهش می‌یابد که به تشکیل الیفی با قطرهای زیر میکرون و حتی نانومتر منجر می‌شود [۳۳]؛ بنابراین اگر جریان سریع مایع قبل از مرحله ناپایداری خمشی، جامد شود، قطر آن دیگر طی این فرایند کاهش نمی‌یابد. تبخیر حلال، باعث کاهش حجم و تغییر پارامترهای ویسکوالاستیک جریان سریع مایع، در طول مسیر حرکت آن می‌شود که مانع از کشیدگی هرچه بیشتر آن می‌گردد؛ بنابراین حلقه‌های کوچک‌تری در مسیر حرکت جریان سریع مایع شکل می‌گیرد. به دلیل حرکت خمشی جریان سریع مایع، بخش اعظم ازدیاد طول آن به واسطه ایجاد این حلقه‌ها است (شکل ۱ (ب)).

الیاف با جامد شدن جریان سریع مایع در مرحله طویل

شدن، تشکیل می‌شوند که یا از طریق تبخیر حلال یا سرد شدن مذاب است. وقتی جامد شدن الیاف به‌کندی صورت گیرد، طولی شدن آن‌ها می‌تواند در مدت زمان بیشتری ادامه یابد که به تشکیل الیافی با قطر کمتر منجر می‌شود. مشاهده شده که بزرگی قطر لیف جامدشده در اثر کشیدگی و تبخیر حلال، در حدود $10^3 \times 1/3$ برابر از قطر اولیه جریان سریع مایع، کمتر شده است [۲۳]. پس از جامد شدن، بارهای الکتریکی همچنان بر سطح لیف خشک‌شده محبوس هستند، اما تمام آن ناپایداری‌ها متوقف می‌شود.

آخرین مرحله فرایند الکتروریسی، نشان دادن الیاف بر روی صفحه جمع‌کننده دارای اتصال به زمین است. شکل الیاف، تابع ناپایداری خمشی‌ای است که طی آن مرحله، روی صفحه جمع‌کننده می‌نشینند. الیاف را می‌توان طی مرحله اولیه تشکیل حلقه که شامل ناپایداری مرحله اول است، جمع‌آوری کرد که به‌صورت لایه‌ای بی‌بافت بر سطح جمع‌کننده ساکن یا متحرک جمع می‌شوند. اگرچه الیاف را می‌توان در مرحله تشکیل ماریپیچ در ناپایداری‌های ناحیه دوم و سوم که الگوی پیچیده‌ای به خود می‌گیرند نیز، جمع‌آوری کرد که الیافی به شکل مستقیم، موج‌دار یا با ماریپیچ‌های متعدد حاصل می‌شوند. پس از نشستن الیاف بر جمع‌کننده، قسمت اعظم بارها از طریق اتصال به زمین، به‌سرعت تخلیه می‌شوند؛ اما به دلیل رسانایی کم مواد تشکیل‌دهنده الیاف، بارهای سطحی روی نانوالیاف باقی می‌مانند [۳۴]. بارهای باقی‌مانده بر روی نانوالیاف تمایل دارند تا بارهای الکتریکی همنام با خود را در جریان سریع مایع، دفع کنند؛ بنابراین ضخامت لایه نفاخته از الیاف الکتروریسی‌شده، در بیشترین حالت به ۱ میلی‌متر می‌رسد [۵].

جمع‌کننده، تجمع می‌یابند. الکتروریسی مرسوم، معمولاً در حالت میدان-دور (فاصله ۵ تا ۱۵ سانتی‌متر) و ولتاژ بالا (۱۰ تا ۲۰ کیلوولت) انجام می‌شود. در چنین حالتی، لایه‌ای بی‌بافت از نانوالیاف حاصل می‌شود؛ زیرا کنترل دقیق محل فرود الیاف مشکل است. جمع‌کننده رسانای جامد، هم به‌صورت ساکن و هم متحرک به‌کار برده شده‌اند. جمع‌کننده‌های چرخان، یکی از انواع روش‌های استفاده از جمع‌کننده‌های متحرک هستند که برای تولید نانوالیاف هم‌جوار و یا لایه‌های گسترده از نانوالیاف به‌کار می‌روند و این امر، به دلیل کشیدگی مکانیکی نانوالیاف جمع‌شده بر روی استوانه چرخان به دلیل سرعت چرخش آن است [۳۵].

۳- روش تحقیق

۳-۱- مواد مصرفی

در این پژوهش از تیتانیم ایزوپروپوکسید (شرکت مرک^۱، ۹۸ درصد)، پلی وینیل پیرولیدون (شرکت سیگما^۲، جرم مولکولی برابر $360/000$ گرم بر مول)، ۲- پروپانول (شرکت مرک)، اتانول (شرکت مرک، ۱۰۰ درصد)، استیک اسید گلاسیال (شرکت مرک، ۹۹ درصد)، سرنگ پلی‌اتیلنی ۱۰ میلی‌لیتر و سوزن تزریقی G۲۱ استفاده شده است.

۳-۲- تجهیزات

دستگاه الکتروریسی (I series، شرکت نانو ساختار آسیا، ایران)، دستگاه رئومتر (MCR-501، شرکت آنتون پار، اتریش) و میکروسکوپ الکترونی روبشی^۳ (VEGA II TESCAN، جمهوری چک) مورد استفاده قرار گرفتند.

۳-۳- روش کار

محلول‌های سُل، مطابق روش ارائه‌شده در مقالات قبلی [۱۱ و ۱۲] تهیه شدند. به‌طور خلاصه، برای تهیه محلول‌های سُل، از مقادیر ثابت پیش‌ماده تیتانیم ایزوپروپوکسید (۱ میلی‌لیتر از محلول ۱۰ درصد حجمی در بوتانول) در محیط غیر آبی شامل حلال ۲- پروپانول (۷ میلی‌لیتر)، استیک اسید

تشکیل الیاف الکتروریسی‌شده و کنترل قطر آن‌ها، توسط پارامترهایی از قبیل ولتاژ اعمال‌شده، فاصله بین نوک سوزن تا سطح جمع‌کننده، غلظت محلول و سرعت تزریق آن، انجام می‌شود. به‌طور کلی، تداخل پارامترهای مؤثر در فرایند الکتروریسی باعث کنترل شکل و قطر نانوالیاف می‌شود. در نتیجه، باید تمام پارامترها را بهینه کرد تا بتوان فرایند الکتروریسی را کنترل کرد.

طی روش الکتروریسی، فاصله بین نوک سوزن تا صفحه جمع‌کننده، تعیین‌کننده مرحله‌ای است که الیاف بر روی

¹ Merck

² Sigma

³ Scanning Electron Microscope

الکتروریسی بر روی ورق آلومینیومی و به مدت 1 ساعت انجام شد. بقیه شرایط الکتروریسی برای نمونه‌های تهیه‌شده، به شرح جدول (1) است. در این آزمایشات قطر سوزن نیز یکسان (G21) انتخاب شد تا از کاهش یا افزایش قطر الیاف به دلیل تغییر قطر داخلی سوزن اجتناب شود.

جدول 1. شرایط الکتروریسی نانوالیاف TiO_2/PVP برای صفحه

ساکن و استوانه چرخان با سرعت 500 دور در دقیقه

کد نمونه	سرعت تزریق (میلی-لیتر بر ساعت)	فاصله (سانتی‌متر)	ولتاژ (کیلوولت)
3AC10	0/5	10	10
5AC15	0/8	9	15
7AC15	0/8	9	15
3A*	0/5	12	10
5A**	0/8	12	15
7A	0/8	9	15

(*) مرجع 12 (***) مرجع 11

4- نتایج و بحث

کسب موفقیت در الکتروریسی محلول‌های پلیمری و تولید نانوالیافی با ساختار و شکل موردنظر، با کنترل مجموعه‌ای از پارامترهای مربوط به پلیمر، حلال، محلول پلیمری، پارامترهای فرایند و شرایط محیطی حاصل می‌شود. غلظت پلیمر، بر گرانروی و کشش سطحی محلول تأثیر می‌گذارد و هر دوی این عوامل، بر شکل و قطر الیاف حاصل، اثرگذارند. با افزایش غلظت محلول پلیمری، به دلیل افزایش درهم‌رفتگی زنجیره‌ای و گرانروی، الیاف یکنواخت تشکیل می‌شود. همچنین کاهش گرانروی و کشش سطحی محلول باعث تشکیل الیاف نازک‌تر می‌شود. مقادیر گرانروی محلول‌های سُل تهیه‌شده با درصدهای وزنی مختلف پلیمر PVP در جدول (2) نشان داده شده است.

جدول 2. تغییرات گرانروی محلول‌های سُل TIP/PVP نسبت به

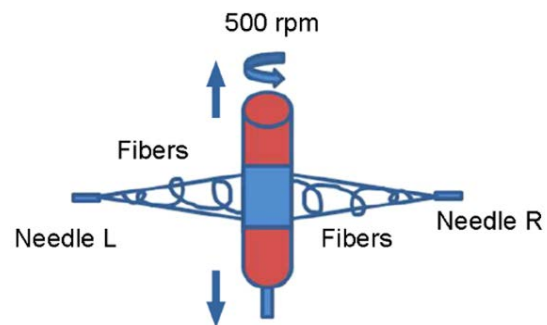
غلظت پلیمر [12]

کد محلول سُل	3A	5A	7A
گرانروی (سانتی پواز)	28/1	119/5	291/1

گلاسیال (4 میلی‌لیتر) و 3، 5 و 7 درصد وزنی پلیمر پلی‌وینیل-پیرولیدون (PVP) استفاده شد. سُل‌های تهیه‌شده به ترتیب 3A، 5A و 7A نام‌گذاری شدند.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، در تهیه سُل‌ها، مقدار تیتانیم ایزوپروپوکسید (TIP) ثابت و درصد وزنی پلیمر تغییر می‌کند تا تأثیر هم‌زمان غلظت پلیمر و نوع سطح جمع‌کننده بر روی ریخت‌شناسی نانوالیاف بررسی شود. برای دست‌یافتن به الیاف بدون دانه، گرانروی محلول باید مناسب باشد که این امر در گرو استفاده از مقدار کافی پلیمر با وزن مولکولی مناسب است.

برای الکتروریسی از دستگاهی شامل سامانه‌ای با دو سوزن تزریق استفاده شد که به صورت افقی روبه‌روی یکدیگر تعبیه شده و هرکدام به یک سرنگ جداگانه پلی‌اتیلنی حاوی محلول سُل یکسان متصل بودند. یک استوانه چرخان با قطر 50 میلی‌متر که سطح آن با ورق آلومینیومی پوشانده شده بود در ناحیه بین دو سوزن و به فاصله مساوی 10 سانتی‌متر از هر یک، قرار داشت که به‌عنوان جمع‌کننده نانوالیاف به‌کار می‌رفت. طرحواره این سامانه الکتروریسی در شکل (2) نشان داده شده است.



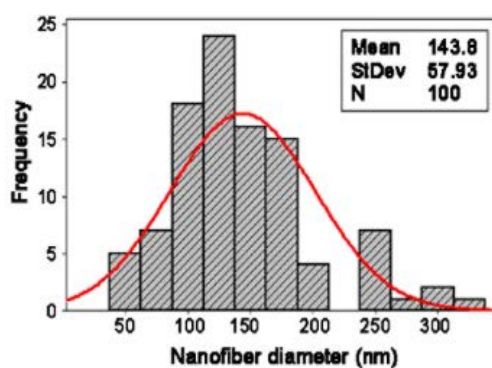
شکل 2. طرحواره سامانه الکتروریسی هم‌زمان با دو سوزن یکسان و مقابل هم بر روی استوانه چرخان

این مجموعه، درون یک محفظه عایق قرار داشت. سرعت چرخش این استوانه قابل تنظیم بود که در این آزمایش از سرعت 500 دور در دقیقه استفاده شد. برای جلوگیری از تجمع منطقه‌ای نانوالیاف بر سطح استوانه چرخان، پایه نگهدارنده آن دارای تنظیمات برای اعمال یک حرکت رفت و برگشتی خطی در جهت افقی در امتداد محور استوانه بود که برای هر آزمایش، به مقدار 0/5 میلی‌متر بر ثانیه تنظیم شد.

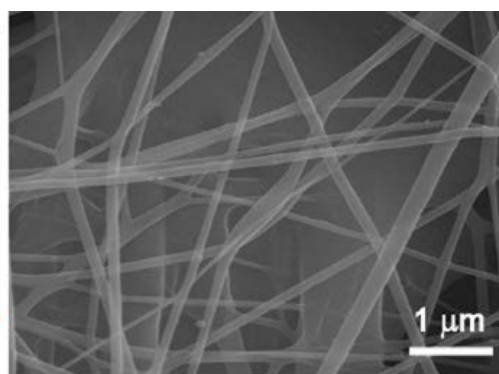
ماتریس پلیمری تشکیل می‌شود و نانوالیاف متشکل از فاز معدنی - پلیمری به دست می‌آید [۱۱].

برای بررسی ریخت‌شناسی نانوالیاف TiO_2/PVP از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) استفاده شد و سطح نمونه‌ها قبل از انجام آزمایش، با لایه‌ای از طلا پوشش داده شد. قطر نانوالیاف به کمک نرم‌افزار ImageJ تعیین گردید و میانگین قطر نانوالیاف با ۱۰۰ بار اندازه‌گیری در هر تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی محاسبه شد. با استفاده از داده‌های به دست آمده و به کمک نرم‌افزار Minitab، منحنی توزیع قطر نانوالیاف برای هر نمونه رسم گردید.

در شکل (۳) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نانوالیاف الکترونیسی شده TiO_2/PVP مربوط به نمونه 3AC10 بر ورق آلومینیومی مستقر بر استوانه چرخان با سرعت چرخش ۵۰۰ دور در دقیقه و نیز منحنی توزیع قطر نانوالیاف نشان داده شده است.



(ب)



(الف)

شکل ۳. (الف) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نانوالیاف الکترونیسی شده TiO_2/PVP مربوط به نمونه 3AC10 بر صفحه آلومینیومی تحت ولتاژ ۱۰ کیلوولت، سرعت تزریق ۰/۵ میلی‌لیتر در ساعت، فاصله ۱۰ سانتی‌متر و سرعت چرخش ۵۰۰ دور در دقیقه، (ب) منحنی توزیع قطر نانوالیاف الکترونیسی شده TiO_2/PVP

ساختار نانوالیاف الکترونیسی شده TiO_2/PVP برای صفحه تخت ساکن، به دلیل پایین بودن ولتاژ (۱۰ کیلوولت) و کم بودن گرانیروی محلول سُل 3A، به شکل لوله ناقص مشاهده شد [۱۲]؛ درحالی‌که برای نانوالیاف تولیدشده با استوانه چرخان، ساختار الیاف، منسجم بوده و بندرت ساختار دوکی شکل دیده می‌شود که به واسطه پایین بودن گرانیروی محلول الکترونیسی 3A است. با کاهش غلظت محلول و در نتیجه، کاهش گرانیروی آن، میزان تحرک‌پذیری زنجیره‌های

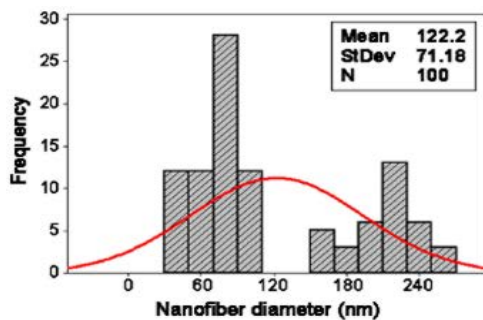
استفاده از پیش‌ماده آلکوکسید فلزی در محلول سُل، (در اینجا، تیتانیم تترا‌ایزوپروپوکساید (TIP)) این امکان را فراهم می‌کند که واکنش‌های آب‌کافت - تراکم، حین فرایند الکترونیسی انجام شود و ذرات بی‌شکل اکسید تیتانیم (TiO_2) در داخل الیاف تشکیل شوند [۱۱].

معمولاً از یک اسید معدنی مثل اسید استیک یا اسید کلریدریک برای پایداری محلول سُل استفاده می‌شود تا واکنش‌های آب‌کافت - تراکم و ژل شدن را کنترل کنند [۳۶]؛ زیرا واکنش سریع آب‌کافت به بسته شدن مجرای سوزن منجر می‌شود، درحالی‌که ژل شدن باعث تشکیل جریان سریع مایع غیر قابل کشیدن و الیاف ضخیم می‌گردد. از این رو، واکنش‌های آب‌کافت - تراکم باید در جریان سریع مایع که در تماس با محیط قرار می‌گیرد، صورت گیرد [۳۶]. تحت این شرایط، شبکه پیوسته‌ای از فاز معدنی (در اینجا، تیتانیم دی‌اکسید) در

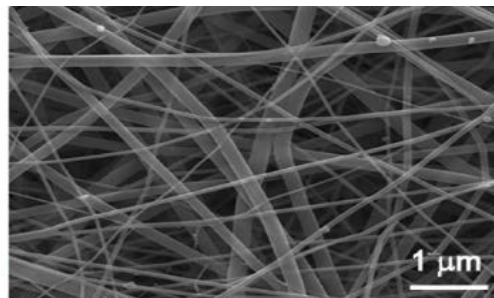
همان‌طور که در شکل (۳) مشاهده می‌شود، میانگین قطر نانوالیاف TiO_2/PVP به همراه انحراف معیار آن در نمونه 3AC10، 144 ± 58 نانومتر به دست آمده است که در مقایسه با میانگین قطر نانوالیاف تولیدشده نمونه مشابه با صفحه تخت ساکن [۱۲] به مقدار 171 ± 44 نانومتر (جدول ۳)، کاهش در مقدار قطر نانوالیاف الکترونیسی شده TiO_2/PVP برای استوانه چرخان مشاهده می‌شود که آن را می‌توان به اثر کشندگی مضاعف حرکت چرخشی استوانه نسبت داد [۷].

مشاهده می شود، میانگین قطر نانوالیاف TiO_2/PVP به همراه انحراف معیار آن برای نمونه 5AC15، 71 ± 122 نانومتر به دست آمده است که از مقایسه آن با میانگین قطر نانوالیاف TiO_2/PVP نمونه به دست آمده با صفحه تخت ساکن [12] به مقدار 85 ± 191 (جدول 3)؛ نتیجه گیری می شود که در این آزمایش نیز علی رغم افزایش ولتاژ اعمال شده، قطر نانوالیاف الکترورسی شده TiO_2/PVP بر استوانه چرخان نسبت به نانوالیاف جمع شده بر صفحه تخت ساکن، کاهش یافته است.

شکل 4 (الف) وجود دو نوع نانوالیاف با قطر زیاد و کم را به خوبی نشان می دهد و منحنی توزیع قطر نانوالیاف (شکل 4 (ب))، دو قله ای بودن این توزیع را به خوبی نشان می دهد. این مسئله به دلیل افزایش ولتاژ است که منجر به تولید جریان سریع مایع با شاخه های جانبی باریک تر، می شود [11].



(ب)



(الف)

شکل 4. (الف) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نانوالیاف الکترورسی شده نمونه 5AC15 بر صفحه آلومینیومی، تحت ولتاژ 15 کیلوولت، سرعت تزریق 0/8 میلی لیتر در ساعت، فاصله 10 سانتی متر و سرعت چرخش 500 دور در دقیقه، (ب) منحنی توزیع قطر نانوالیاف الکترورسی شده TiO_2/PVP

آزمایش، الیاف باریک تری تولید می کند. بنابراین برای این نوع از الکترورسی بر استوانه چرخان، دومین پارامتر مؤثر بر اندازه قطر نانوالیاف، سرعت چرخش استوانه است [4]. همچنین، مقدار انحراف معیار نانوالیاف TiO_2/PVP تولید شده با استوانه چرخان، کمتر از الیاف مشابه تولید شده با صفحه تخت ساکن است.

به عبارت دیگر وجود الیاف با قطر کم در میان الیاف با قطر بیشتر، باعث همگن شدن اندازه حفره ها در غشای تولید شده می شود [38]. مقادیر متوسط قطر نانوالیاف TiO_2/PVP تولید شده، برای مقایسه بهتر در جدول (3) ارائه شده است.

پلیمری بیشتر شده و محلول پلیمری دچار کشش بیشتری می شود [37]؛ از این رو، میزان انحراف معیار قطر نانوالیاف الکترورسی شده TiO_2/PVP با استوانه چرخان، بیشتر می شود که آن را می توان به غیریکنواختی در قطر نانوالیاف متناسب کرد. این امر ناشی از حرکت دورانی استوانه جمع کننده است که کشیدگی و حرکت مارپیچی مضاعف بر نانوالیاف ایجاد می کند و چون غلظت محلول و گرانش آن پایین است، خود را به صورت غیریکنواختی بیشتر در قطر نانوالیاف نشان می دهد [4].

در شکل (4)، تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نانوالیاف الکترورسی شده نمونه 5AC15 بر صفحه آلومینیومی مستقر بر استوانه چرخان (با سرعت چرخش 500 دور در دقیقه و ولتاژ 15 کیلوولت) و نیز منحنی توزیع قطر این نانوالیاف، نشان داده شده است. همان طور که در این شکل

مقایسه دو نمونه نانوالیاف 3A و 5A نشان می دهد که ولتاژ، غلظت پلیمر و سرعت تزریق برای نمونه 5A افزایش یافته است که تأثیر افزایش این سه پارامتر به افزایش قطر نانوالیاف 5A منجر شده است. برای صفحه تخت ساکن، پارامتر اصلی که بیشترین تأثیر را بر قطر نانوالیاف دارد، غلظت محلول (غلظت پلیمر) است و ولتاژ و سرعت تزریق به ترتیب، دومین و سومین پارامتر محسوب می شوند [4].

استفاده از استوانه چرخان برای محلول سُل (5A) نیز به تولید نانوالیاف نازک تری منجر شده است (نمونه 5AC15 در شکل 4 (الف)). این امر ناشی از حرکت دورانی استوانه جمع کننده است که در شرایط یکسان

مستقر بر استوانه چرخان، تحت ولتاژ ۱۵ کیلوولت و سرعت تزریق ۰/۸ میلی لیتر در ساعت را نشان می دهد.

در این شکل، میانگین قطر نانوالیاف TiO_2/PVP برای نمونه 7AC15 به همراه انحراف معیار آن، 293 ± 135 نانومتر به دست آمده است که در مقایسه با میانگین قطر نانوالیاف به دست آمده با صفحه تخت ساکن، 258 ± 122 نانومتر؛ (جدول ۳) مشاهده می شود که الیاف تولید شده با استوانه چرخان، هم متوسط قطر بیشتری دارند و هم انحراف معیار بزرگ تری نشان می دهند. یک دلیل می تواند سرعت تزریق بیشتر باشد. نتایج نشان داده است که افزایش سرعت تزریق، باعث افزایش قطر نانوالیاف می شود زیرا ضمن بزرگ تر شدن قطرکها، چگالی بار الکتریکی بر سطح آنها کاهش می یابد [۳۹]. از طرف دیگر افزایش غلظت پلیمر مستقل از نوع سطح جمع کننده، به عنوان مهم ترین عامل در افزایش قطر نانوالیاف معرفی شده است [۴] که در این پژوهش، افزایش قطر متوسط نانوالیاف تولید شده از سُل های 3A، 5A و 7A برای هر دو نوع جمع کننده، در جدول (۳) قابل مشاهده است.

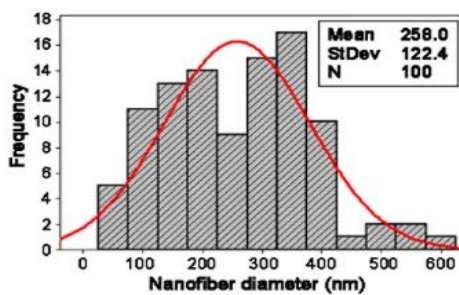
جدول ۳. متوسط قطر نانوالیاف TiO_2/PVP جمع شده بر صفحه ساکن و استوانه چرخان برای سُل های با غلظت های ۳، ۵ و ۷ درصد وزنی (PVP)

کدمحلول سُل	ولتاژ (کیلوولت)	میانگین قطر نانوالیاف (بر حسب نانومتر) \pm انحراف معیار	
		استوانه چرخان	صفحه ساکن
3A	۱۰	144 ± 58	$171 \pm 44^*$
5A	۱۵	122 ± 71	$191 \pm 85^{**}$
7A	۱۵	292 ± 135	258 ± 122

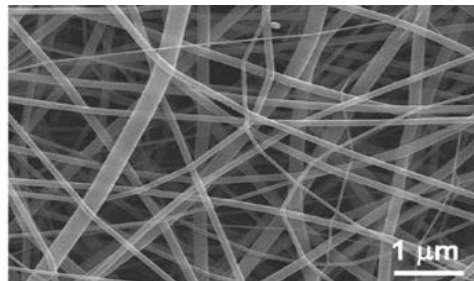
* مرجع ۱۲ ** مرجع ۱۱

شکل (۵) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نانوالیاف الکترونیسی شده سُل 7A بر روی ورق آلومینیومی مستقر بر صفحه تخت ساکن، تحت ولتاژ ۱۵ کیلوولت و سرعت تزریق ۰/۸ میلی لیتر در ساعت را نشان می دهد.

شکل (۶) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نانوالیاف الکترونیسی شده سُل 7A بر روی ورق آلومینیومی

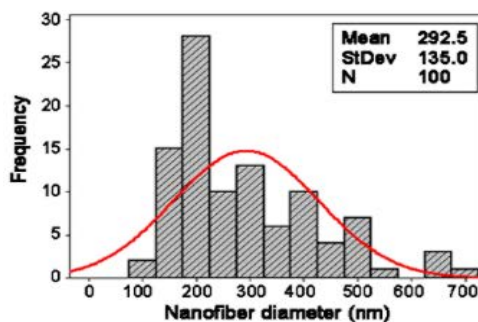


(ب)

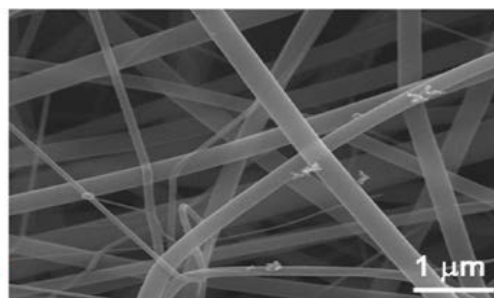


(الف)

شکل ۵. (الف) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نانوالیاف الکترونیسی شده نمونه 7A بر ورق آلومینیومی بر صفحه تخت ساکن تحت ولتاژ ۱۵ کیلوولت و سرعت تزریق ۰/۸ میلی لیتر در ساعت، (ب) منحنی توزیع قطر نانوالیاف الکترونیسی شده TiO_2/PVP



(ب)



(الف)

شکل ۶. (الف) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نانوالیاف الکترونیسی شده نمونه 7AC15 بر ورق آلومینیومی مستقر بر استوانه چرخان تحت ولتاژ ۱۵ کیلوولت و سرعت تزریق ۰/۸ میلی لیتر در ساعت، (ب) منحنی توزیع قطر نانوالیاف الکترونیسی شده TiO_2/PVP

- Lavielle, N., Hebraud, A., Schlatter, G., Thöny-Meyer, L., Rossi, R. M., Popa, A. -M., "Simultaneous electrospinning and electrospraying: A straightforward approach for fabricating hierarchically structured composite membranes", *ACS Applied Materials and Interfaces*, Vol. 5, No. 20, (2013), 10090-10097. <https://doi.org/10.1021/am402676m>
- Sabzroo, N., Rohani Bastami, T., Karimi, M., Heidari, T., "Optimization of electrospinning conditions for magnetic poly (acrylonitrile- co- acrylic acid) nanofibers", *Journal of Nanostructures*, Vol. 9, No. 2, (2019), 301-315. https://jns.kashanu.ac.ir/article_88811_07646726d890973ed0474d837f648ac3.pdf
- Alfaro De Pra, M. A., Ribeiro-do-Valle, R. M., Maraschin, M., Veleirinho, B., "Effect of collector design on the morphological properties of polycaprolactone electrospun fibers", *Materials Letters*, Vol. 193, No. 1, (2017), 154-157. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2017.01.102>
- Yıldız Çavdar, F., Uğuz, A., "Comparative study of electrospinning process for two different collectors: the effect of the collecting method on the nanofiber diameters", *Mechanical Engineering Journal*, Vol. 6, No. 1, (2019), 18-00298. <https://doi.org/10.1299/mej.18-00298>
- Filatov, Y., Budyka, A., Kirichenko, V., *Electrospinning of Micro-and Nanofibers: Fundamentals in Separation and Filtration Processes*, Begell House Publishers, USA, (2007). <http://www.begellhouse.com/books>
- Katta, P., Alessandro, M., Ramsier, R. D., Chase, G. G., "Continuous electrospinning of aligned polymer nanofibers onto a wire drum collector", *Nano Letter*, Vol. 4, No. 11, (2004), 2215-2218. <https://doi.org/10.1021/nl0486158>
- Zaarour, B., Zhu, L., Huang, C., Jin, X., "Enhanced piezoelectric properties of randomly oriented and aligned electrospun PVDF fibers by regulating the surface morphology", *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 136, No. 6, (2019), 47049. <https://doi.org/10.1002/app.47049>
- Sarлак, N., Nejad, M. A. F., Shakheshi, S., Shabani, K. "Effects of electrospinning parameters on titanium dioxide nanofibers diameter and morphology: An investigation by Box-Wilson central composite design (CCD)", *Chemical Engineering Journal*, Vol. 210, (2012), 410-416. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2012.08.087>
- Farhang Dehghan, S., Maddah, B., Golbabaei, F., "The development of nanofibrous media filter containing nanoparticles for removing particles from air stream", *Iranian Journal of Health and Environment*. Vol. 8, No. 4, (2016), 509-524. (In Farsi). <http://ijhe.tums.ac.ir/article-1-5511-en.html>
- Mali, S. S., Shim, C. S., Kim, H., Patil, J. V., Ahn, D. H., Patil, P. S., Hong, C. K., "Evaluation of various diameters of titanium oxide nanofibers for efficient dye sensitized solar cells synthesized by electrospinning technique: A systematic study and their application", *Electrochimica Acta*, Vol. 166, (2015), 356-366. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2015.03.113>
- Mirmohammad Sadeghi, S., Vaezi, M., Kazemzadeh, A., Jamjah, R., "Morphology enhancement of TiO₂/PVP composite nanofibers based on solution viscosity and processing parameters of electrospinning method", *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 135, No. 23, (2018), 46337. <https://doi.org/10.1002/app.46337>
- Mirmohammad Sadeghi, S., Vaezi, M., Kazemzadeh, A., Jamjah, R., "Effects of polymer concentration on rheological behavior of TiO₂/PVP sol solutions and morphology of electrospun nanofibers", *Proceedings of 1st International Conference on Rheology (ICOR 2019)*, Tehran, Iran, (17-18 Dec. 2019).
- Im, J. S., Kim, M. I., Lee, Y. S., "Preparation of PAN-based electrospun nanofiber webs containing TiO₂ for photocatalytic degradation", *Materials Letters*, Vol. 62, No. 21-22, (2008), 3652-3655. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2008.04.019>
- He, X., Yang, C. P., Zhang, G. L., Shi, D. W., Huang, Q. A., Xiao, H. B., Liu, Y., Xiong, R., "Supercapacitor of TiO₂ nanofibers by electrospinning and KOH treatment", *Materials & Design*, Vol. 160, No. 1, (2016), 74-80. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.05.025>
- Tohidloo, M. H., Shafiei, S. S., Shiralipour, F., "Preparation and evaluation of polycaprolactone /amine functionalized carbon nanotube electrospun nanocomposite scaffold containing

هادی و همکاران [۴۰] مشاهده کردند که با افزایش ولتاژ، ناپایداری‌های خمشی در جریان سریع محلول پلیمری افزایش می‌یابد و این امر از میزان موازی بودن نانوالیاف می‌کاهد که برای رفع این نقیصه، باید سرعت چرخش استوانه جمع‌کننده را افزایش داد. از طرف دیگر، افزایش سرعت چرخش استوانه، ضمن موازی‌کردن نانوالیاف باعث باریک‌تر شدن آنها می‌شود [۲].

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، تأثیر نوع جمع‌کننده و غلظت پلیمر بر میانگین قطر نانوالیاف الکترورسی شده TiO₂/PVP و میزان انحراف معیار آنها بررسی شده است. در فرایند الکترورسی، از استوانه چرخان و صفحه تخت ساکن استفاده شد و نانوالیاف بر روی ورق آلومینیومی تولید شدند. سرعت چرخش استوانه ۵۰۰ دور در دقیقه بود. مشاهده شد که چرخش استوانه جمع‌کننده در مقایسه با صفحه تخت ساکن برای محلول سل با غلظت‌های پایین پلیمر (هرگاه دیگر پارامترها یکسان نگه داشته شوند)، موجب تولید نانوالیاف با قطر کمتر می‌شود. در غلظت‌های بالاتر پلیمر، نانوالیاف الکترورسی شده TiO₂/PVP با استوانه چرخان نسبت به نمونه‌های تولید شده با صفحه تخت ساکن، قطر بیشتری داشتند که نتیجه‌گیری می‌شود با افزایش غلظت پلیمر، باید سرعت چرخش استوانه جمع‌کننده را افزایش داد تا بتوان الیاف باریک‌تری تولید کرد.

۶- سپاسگزاری

این پژوهش بخشی از پروژه دکتری نویسنده اول است که تحت کد پروژه ۷۸۱۳۹۲۰۵۴، در پژوهشگاه مواد و انرژی انجام شده است. همچنین از حمایت مالی شرکت مهندسی «دریا فن شیمی» در این پروژه قدردانی می‌شود. نانوالیاف الکترورسی شده TiO₂/PVP به وسیله دستگاه الکترورسی مستقر در آزمایشگاه پلاستیک پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران تهیه شده بود، که بدین وسیله تشکر می‌شود.

مراجع

- Society*, Vol. 125, No. 5, (2003), 1154-1155. <https://doi.org/10.1021/ja028983i>
28. Li, D., Wang, Y., Xia, Y., "Electrospinning of polymeric and ceramic nanofibers as uniaxially aligned arrays", *Nano Letters*, Vol. 3, No. 8, (2003), 1167-1171. <https://doi.org/10.1021/nl0344256>
 29. Xue, J., Xie, J., Liu, W., Xia, Y., "Electrospun nanofibers: New concepts, materials, and applications", *Accounts of Chemical Research*, Vol. 50, No. 8, (2017), 1976-1987. <https://doi.org/10.1021/acs.accounts.7b00218>
 30. Reneker, D. H., Fong, H., (Eds.), *Polymeric Nanofibers*, ACS Symposium Series, Washington, DC, USA, Vol. 918, (2006). <https://doi.org/10.1021/bk-2006-0918.ch001>
 31. Reneker, D. H., Yarin, A. L., "Electrospinning jets and polymer nanofibers", *Polymer*, Vol. 49, No. 10, (2008), 2387-2425. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2008.02.002>
 32. He, J. -H., Wu, Y., Zuo, W. -W., "Critical length of straight jet in electrospinning", *Polymer*, Vol. 46, No. 26, (2005), 12637-12640. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2005.10.130>
 33. Shin, Y. M., Hohman, M. M., Brenner, M. P., Rutledge G. C., "Electrospinning: A whipping fluid jet generates submicron polymer fibers", *Applied Physics Letters*, Vol. 78, No. 8, (2001), 1149-1151. <https://doi.org/10.1063/1.1345798>
 34. Collins, G., Federici, J., Imura, Y., Catalani, L. H., "Charge generation, charge transport, and residual charge in the electrospinning of polymers: A review of issues and complications", *Journal of Applied Physics*, Vol. 111, No. 4, (2012), 044701. <https://doi.org/10.1063/1.3682464>
 35. Persano, L., Camposo, A., Tekmen, C., Pisignano, D., "Industrial upscaling of electrospinning and applications of polymer nanofibers: A review", *Macromolecular Materials and Engineering*, Vol. 298, No. 5, (2013), 504-520. <https://doi.org/10.1002/mame.201200290>
 36. Livage, J., Sanchez, C., Henry, M., Doeuff, S., "The chemistry of the sol-gel process", *Solid State Ionics*, Vol. 32-33, Part 2, (1989), 633-638. [https://doi.org/10.1016/0167-2738\(89\)90338-X](https://doi.org/10.1016/0167-2738(89)90338-X)
 37. Gu, S., Ren, J., Vancso, G., "Process optimization and empirical modeling for electrospun polyacrylonitrile (PAN) nanofiber precursor of carbon nanofibers", *European Polymer Journal*, Vol. 41, No. 11, (2005), 2559-2568. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2005.05.008>
 38. Patra, S. N., Easteal, A. J., Bhattacharyya, D., "Parametric study of manufacturing poly(lactic) acid nanofibrous mat by electrospinning", *Journal of Material Science*, Vol. 44, No. 2, (2009), 647-654. <https://doi.org/10.1007/s10853-008-3050-y>
 39. Someswararao, M. V., Dubey, R. S., Subbarao, P. S. V., Singh, S., "Electrospinning process parameters dependent investigation of TiO₂ nanofibers", *Results in Physics*, Vol. 11, No. 1, (2018), 223-231. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2018.08.054>
 40. Hadi, Z., Dabirian, F., Safi, S., Zojajian, A., Firoozi, M., "Fabrication of aligned nanofibers by manipulated rotating drum method and studying the effective parameters on fibers alignment by image processing", *Iranian Journal of Polymer Science and Technology*, Vol. 25, No. 5, (2013), 339-350. (In Farsi). <https://doi.org/10.22063/JIPST.2013.606>
 - mesenchymal stem cells for use in hard tissue engineering", *Journal of Advance Materials and Technologies (JAMT)*, Vol. 8, No. 4, (2020), 19-30. (In Farsi). <https://doi.org/10.30501/jamt.2020.93226>
 16. Zadehnajar, P., Karbasi, S., Akbari, B., Mirmusavi, M. H., "Evaluation of physical and mechanical properties of electrospinning nanocomposite scaffolds poly ϵ -caprolactone-gelatin/multi walled carbon nanotube", *Journal of Advance Materials and Technologies (JAMT)*, Vol. 7, No. 4, (2019), 93-100. (In Farsi). <https://doi.org/10.30501/jamt.2019.84403>
 17. Najafiasl, M., Osfour, S., Azin, R., Zaeri, S., "Alginate-based electrospun core/shell nanofibers containing dexpanthenol: A good candidate for wound dressing", *Journal of Drug Delivery Science and Technology*, Vol. 57, (2020), 101708. <https://doi.org/10.1016/j.jddst.2020.101708>
 18. Cao, Y., Tang, P., Han, Y., Qiu, W., "Synthesis of La₂Ti₂O₇ flexible self-supporting film and its application in flexible energy storage device", *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 842, (2020), 155581. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.155581>
 19. Khatri, M., Ahmed, F., Ali, S., Mehdi, M., Ullah, S., Duy-Nam, P., Khatri, Z., Kim, I. -S., "Photosensitive nanofibers for data recording and erasing", *The Journal of The Textile Institute*, Vol. 112, No. 3, (2020), 429-438. <https://doi.org/10.1080/00405000.2020.1761681>
 20. Dzenis, Y., "Spinning continuous fibers for nanotechnology", *Science*, Vol. 304, No. 5679, (2004), 1917-1919. <https://science.sciencemag.org/content/304/5679/1917>
 21. Fong, H., Chun, I., Reneker, D. H., "Beaded nanofibers formed during electrospinning", *Polymer*, Vol. 40, No. 16, (1999), 4585-4592. [https://doi.org/10.1016/S0032-3861\(99\)00068-3](https://doi.org/10.1016/S0032-3861(99)00068-3)
 22. Reneker, D. H., Yarin, A. L., Fong, H., Koombhongse, S., "Bending instability of electrically charged liquid jets of polymer solutions in electrospinning", *Journal of Applied Physics*, Vol. 87, No. 9, (2000), 4531-4547. <https://doi.org/10.1063/1.373532>
 23. Shin, Y. M., Hohman, M. M., Brenner, M. P., Rutledge, G. C., "Experimental characterization of electrospinning: the electrically forced jet and instabilities", *Polymer*, Vol. 42, No. 25, (2001), 09955-09967. [https://doi.org/10.1016/S0032-3861\(01\)00540-7](https://doi.org/10.1016/S0032-3861(01)00540-7)
 24. Hohman, M. M., Shin, M., Rutledge, G. C., Brenner, M. P., "Electrospinning and electrically forced jets. I. Stability theory", *Physics of Fluids*, Vol. 13, No. 8, (2001), 2201-2220. <https://doi.org/10.1063/1.1383791>
 25. Hohman, M. M., Shin, M., Rutledge, G. C., Brenner, M. P., "Electrospinning and electrically forced jets. II. Applications", *Physics of Fluids*, Vol. 13, No. 8, (2001), 2221-2236. <https://doi.org/10.1063/1.1384013>
 26. Dai, H., Gong, J., Kim, H., Lee D., "A novel method for preparing ultra-fine alumina-borate oxide fibres via an electrospinning technique", *Nanotechnology*, Vol. 13, No. 5, (2002), 674-677. <https://doi.org/10.1088/0957-4484/13/5/327>
 27. Larsen, G., Velarde-Ortiz, R., Minchow, K., Barrero, A., Loscertales, I. G., "A method for making inorganic and hybrid (organic/inorganic) fibers and vesicles with diameters in the submicrometer and micrometer range via sol-gel chemistry and electrically forced liquid jets", *Journal of American Chemical*