

بررسی اثر دما، رطوبت و نانوذره سیلیس بر ریخت شناسی و تخلخل سطحی الیاف پلی استایرن الکترورسی شده

آرشام گودرزینیا، محمدرضا مقبلی*⁺

گروه تحقیقاتی پلیمرهای هوشمند و نانوکامپوزیت ها، دانشکده مهندسی شیمی، نفت و گاز، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

چکیده: الکترورسی فرایندی است که با استفاده از نیروی الکترو استاتیکی، از محلول یا مذاب پلیمری، الیاف پلیمری در اندازه های نانو و میکرو تولید می کند. در این پژوهش الیاف پلی استایرنی با استفاده از محلول پلی استایرن در حلال دی متیل فرم آمید در شرایط گوناگون دمایی ($25-45^{\circ}\text{C}$)، رطوبت (۳۰-۷۰٪) و مقدارهای گوناگون نانو ذره های سیلیس (۴٪w) ریسیده شد. به منظور ایجاد شرایط محیطی (دما و رطوبت) زمان فرایند الکترورسی، محفظه ای که قابلیت کنترل دما و رطوبت را دارا می باشد، ساخته شد. برای بررسی اثر متغیرهای دما، رطوبت و مقدار ذره های سیلیس، طراحی آزمایش انجام شد. به منظور بررسی ساختار بستر و سطح الیاف پلی استایرنی از تصویرهای دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی استفاده شد. نتیجه های به دست آمده نشان داد که با افزایش هر یک از متغیرهای دما، رطوبت و میزان نانو ذره های سیلیس ساختار بستر الیاف از الیاف دانه دار به الیاف بدون دانه تغییر می یابد. ایجاد نانو تخلخل روی سطح الیاف پلی استایرنی با تغییر متغیرهای یاد شده دیده شده است. نتیجه های به دست آمده از تصویرهای دستگاه میکروسکوپی الکترون روبشی نشان داد که تعداد و تراکم نانو حفره های ناشی از جدایش فازی موجود در سطح پلیمری الیاف پلی استایرنی، با افزایش رطوبت، دما و مقدار نانو ذره های سیلیس کاهش یافته است.

واژه های کلیدی: الکترورسی؛ محفظه شرایطی؛ الیاف نانو متخلخل؛ دما؛ رطوبت نسبی؛ نانو ذره های سیلیس.

KEYWORDS: Electrospinning; Environmental chamber; Nano-porous fibers; Temperature; Relative humidity; Silica nanoparticles.

مقدمه

الیاف پلیمری به روش های گوناگونی از جمله الکترورسی، ذوب ریسی، ترریسی و خشک ریسی تولید می شوند. در دهه گذشته فرایند الکترورسی که روش جدیدی برای تولید الیاف پلیمری به شمار می آید، توجه زیادی را به خود جلب کرده است. این علاقه به این خاطر است که الیاف تولیدی به این روش می توانند دارای قطرهای میکرومتری و نانومتری باشند [۱]. یک دستگاه الکترورسی از ۴ بخش اصلی سرنگ دارای محلول یا مذاب پلیمری

(مایع پلیمر)، سوزن فلزی، منبع ولتاژ و یک جمع کننده فلزی تشکیل شده است که این جمع کننده دارای اشکال گوناگونی از جمله غلتکی شکل و صفحه ای است [۲]. فرایند الکترورسی زمانی آغاز می شود که اختلاف پتانسیل الکتریکی از سوزن فلزی به مایع پلیمری القا شود که این امر باعث ناپایداری در مایع پلیمری می شود. این در حالی است که همزمان یک نیروی دافعه وارون تولید می شود و با نیروی کشش سطح مایع پلیمری

+E-mail: mr_moghbeli@iust.ac.ir

*عهده دار مکاتبات

به روش الکتروریسی با تغییر در شرایط محیطی (دما و رطوبت) و افزودن نانو ذره به محلول پلیمری، پرداخته شده است.

بخش تجربی

مواد

به منظور ساخت الیاف متخلخل از موادی که در ادامه آمده است، استفاده شد. پلیمر به کار گرفته شده در این کار، پلی استایرن^(۱) (GPPS) با جرم مولکولی میانگین ۱۰۰۰۰ است که از پتروشیمی تبریز تهیه شد. حلال به کار گرفته شده برای تهیه محلول پلیمری مورد نیاز فرایند الکتروریسی، دی متیل فرم آماید (DMF) است که از شرکت مرک (Merck) آلمان تهیه شد. نانو سیلیس استفاده شده در این کار، نانو سیلیس غیر آبدوست با کد R-972 می باشد که از شرکت Aerosil تهیه شد.

آماده سازی محلول پلیمری

در این قسمت به روش تهیه محلول های پلیمری استفاده شده در این پژوهش پرداخته خواهد شد. محلول ۲۰٪ وزنی GPPS بدون از نانوذره، با افزودن GPPS به حلال DMF و مخلوط کردن آن ها به مدت ۱۲ ساعت با استفاده از همزن مغناطیسی در دمای اتاق انجام شد. به منظور تهیه محلول پلیمری دارای نانو سیلیس، ابتدا محلول ۲۰٪ وزنی GPPS در نیمی از حلال DMF مورد نیاز برای تولید این محلول افزوده شده و به مدت ۱۲ ساعت در دمای اتاق با استفاده از همزن مغناطیسی مخلوط شد؛ سپس میزان نانو سیلیس مورد نظر، که درصد وزنی نانو سیلیس نسبت به جرم پلیمر استفاده شده می باشد، در نیمه دیگر حلال DMF با استفاده از دستگاه همگن ساز فراصوتی^(۲) در توان ۶۵ وات به صورت ضربه ای^(۳) به مدت ۱۵ دقیقه پخش شد و پس از آن، به محلول پلیمری اولیه اضافه شده و مخلوط حاصله به مدت ۱۲ ساعت دیگر با استفاده از همزن مغناطیسی در دمای اتاق مخلوط شد.

روش تهیه الیاف

همان گونه که در کارهای انجام شده گزارش شده است، تغییر شرایط دما و رطوبت حین فرایند الکتروریسی [۷] و همچنین افزودن نانو ذره به محلول پلیمری [۸] می تواند باعث ایجاد

مقابله می کند و نتیجه آن جریان پیدا کردن مایع پلیمری در جهت میدان الکتریکی است. چندین متغیر گوناگون وجود دارد که بر روی فرایند الکتروریسی تأثیر گذار هستند. این متغیرها به متغیرهای فرایند الکتروریسی، شرایط مایع پلیمری و شرایط محیطی تقسیم بندی می شوند [۳]. متغیرهای فرایند الکتروریسی شامل بزرگی میدان الکتریکی (ولتاژ)، فاصله بین سوزن و جمع کننده، سرعت تخلیه مایع پلیمری از سرنگ و قطر سرنگ می باشند. شرایط مایع پلیمری شامل حلال، غلظت پلیمر، گرانیروی و قابلیت رسانایی مایع پلیمری می باشد. شرایط محیطی شامل رطوبت نسبی و دما می باشد [۴]. رطوبت با تأثیر روی فرایند جامد شدن جت بار دار پلیمری، باعث تغییرهای روی اندازه قطر الیاف می شود. البته که این پدیده به ماهیت ذاتی خود پلیمر نیز وابسته می باشد [۵]. رطوبت محیط همچنین می تواند به عنوان ضد حلال^(۱) در ایجاد الیاف متخلخل نقش بسزایی ایفا کند [۶]. گرما یک تأثیر دو سویه روی تغییرهای قطر متوسط الیاف رسیده شده دارد. از سویی سرعت تبخیر حلال را افزایش می دهد و از سوی دیگر سبب کاهش گرانیروی جت پلیمری می شود که هر دو عامل می توانند اثر گذار روی اندازه قطر الیاف و ساختار بستر الیاف باشند. گرما همچنین می تواند با اثر گذاری بر روی سرعت تبخیر حلال و ناحیه همگن غیر همگن در تعادل سه فازی حلال - غیر حلال - پلیمر در ایجاد تخلخل روی سطح الیاف در حال ریسندگی اثر گذار باشد [۷]. همچنین بر عامل های یاد شده، افزودن نانو ذره به محلول پلیمری مورد نیاز برای فرایند ریسندگی نیز می تواند بر روی قطر، ساختار بستر الیاف و ایجاد الیاف متخلخل نقش داشته باشد [۸]. کارهایی که تاکنون صورت گرفته پیش تر به بررسی عامل های محیطی روی ساختار الیاف رسیده شده پرداخته است [۹-۱۱]. تاکنون کارهای اندکی در زمینه افزودن نانو ذره به محلول پلیمری همراه با تغییر در شرایط محیطی به صورت همزمان و اثر این متغیرها بر روی هم و به صورت جداگانه بر روی ساختار بستر و سطح الیاف الکتروریسی شده صورت گرفته است که در این کار به این زمینه پرداخته شده است. هدف از انجام این پژوهش، افزایش سطح ویژه الیاف با ایجاد نانو تخلخل روی سطح آن است که می تواند کاربردهای متعددی در صنایعی همچون تصفیه آب و پساب داشته باشد. در این پژوهش به بررسی ساختار بستر و سطح الیاف رسیده شده

(۱) Non-solvent

(۲) General Purpose Poly Styrene

(۳) Ultra Sonic

(۴) Pulse

جدول ۱- آزمایش‌های طراحی شده برای شرایط ریسندگی به منظور بررسی اثر متغیرهای دما، رطوبت و مقدار نانو سیلیس بر روی ساختار بستر و سطح الیاف.

شماره نمونه	دما (°C)	رطوبت (%)	مقدار نانو سیلیس (w%)
۱	۴۵	۵۰	۲
۲	۳۵	۵۰	۲
۳	۲۵	۵۰	۲
۴	۳۵	۳۰	۲
۵	۳۵	۷۰	۲
۶	۳۵	۵۰	۰
۷	۳۵	۵۰	۴

نتیجه‌ها و بحث

ساختار بستر الیاف ریسیده شده

الف) اثر رطوبت بر ساختار بستر الیاف ریسیده شده

رطوبت نسبی محیط عاملی تأثیر گذار بر روی ساختار بستر الیاف ریسیده شده می‌باشد [۹]. با افزایش رطوبت نسبی به دلیل در معرض تماس قرار گرفتن جت پلیمری با رطوبت و جذب رطوبت و آب توسط جت پلیمری و رسوب گذاری تندتر پلیمر، ساختار بستر الیاف ریسیده شده تحت تأثیر قرار می‌گیرد که این پدیده جت پلیمری را سریع‌تر جامد می‌کند و از کشیدگی بیش‌تر آن در زمان فرایند ریسندگی جلوگیری می‌کند. این پدیده نه تنها می‌تواند بر روی قطر الیاف ریسیده شده اثر گذار باشد بلکه می‌تواند بر ایجاد یا عدم ایجاد دانه در ساختار الیاف نیز اثر گذار باشد. با توجه به عکس‌های SEM گرفته شده از بستر الیاف ریسیده شده در شکل ۱، همان‌گونه که در قسمت‌های "آ"، "ب" و "ج" قابل دیدن است، که به ترتیب الیاف ریسیده شده در رطوبت‌های نسبی ۳۰٪، ۵۰٪ و ۷۰٪ را با دما و میزان نانو ذره یکسان نشان می‌دهد، رطوبت نسبی پایین‌تر (۳۰٪) الیاف نازک‌تری را تولید می‌کند که دلیل این رخداد می‌تواند به خاطر افزایش نیروی الکترواستاتیک روی سطح الیاف و دیرتر جامد شدن جت پلیمری بوده باشد که این اجازه را به الیاف داده تا به مقدار بیش‌تری تا پیش از سخت شدنشان کشیده شوند. افزون بر این هر چه رطوبت نسبی بالاتر می‌رود و به ۵۰٪ و سپس ۷۰٪ می‌رسد، افزون بر رسوب گذاری تندتر جت پلیمری و کشیده نشدن الیاف، تخلیه بار الکتریکی سطح الیاف در حال ریسیده شدن در محیط به خاطر

تغییرها در ساختار بستر و همچنین ساختار سطح الیاف ریسیده شده به روش الکترورسی شود. در این کار که هدف بررسی تأثیر متغیرهای یاد شده روی ساختار بستر و همچنین سطح الیاف پلی استایرنی ریسیده شده به روش الکترورسی می‌باشد، طراحی آزمایش با استفاده از سه متغیر ذکر شده دما (در بازه‌ی °C ۲۵-۴۵)، رطوبت (در بازه‌ی ۳۰-۷۰٪) و میزان نانو ذره (نانو سیلیس در بازه‌ی w ۰-۴٪) انجام شد که در جدول ۱ این آزمایش‌ها قابل دیدن است.

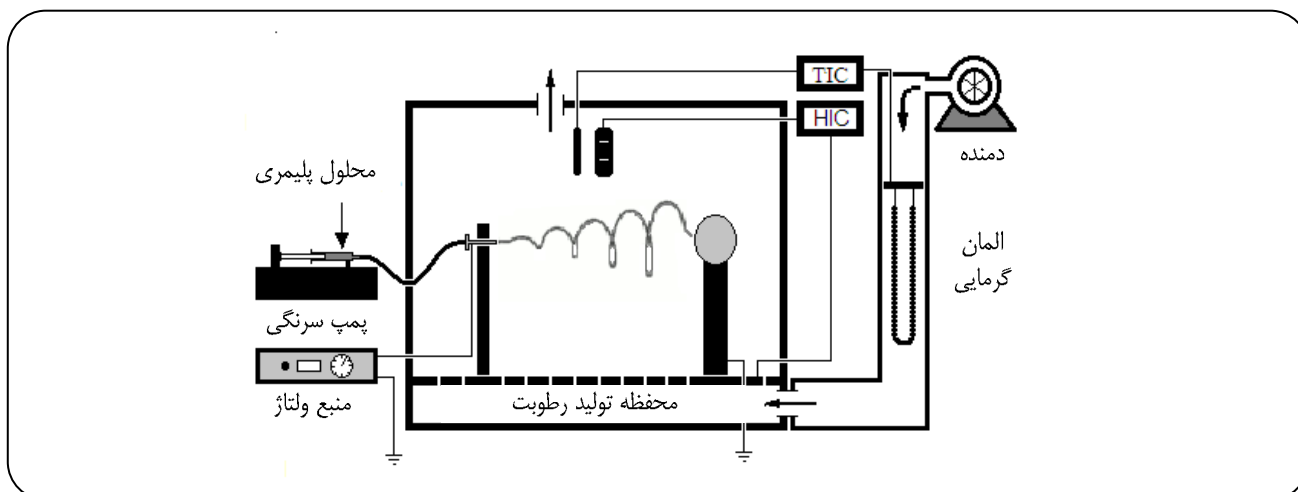
به منظور ایجاد شرایط محیطی (دما و رطوبت) زمان فرایند الکترورسی، محفظه‌ای شرایطی که قابلیت کنترل دما در بازه‌ی °C ۲۰-۵۰ و رطوبت در بازه‌ی ۲۵-۸۰٪ طی فرایند ریسندگی را دارا می‌باشد، طراحی و ساخته شد. در شکل ۱ شمایی از این محفظه قابل دیدن است.

همه الیاف در این کار در ولتاژ ۱۵ کیلو ولت، ۳۰ سانتی متر فاصله سر سوزن تا جمع کننده (TCD)^(۱) و سرعت غلتک جمع کننده ۴۰۰ دور در دقیقه، ریسیده شد.

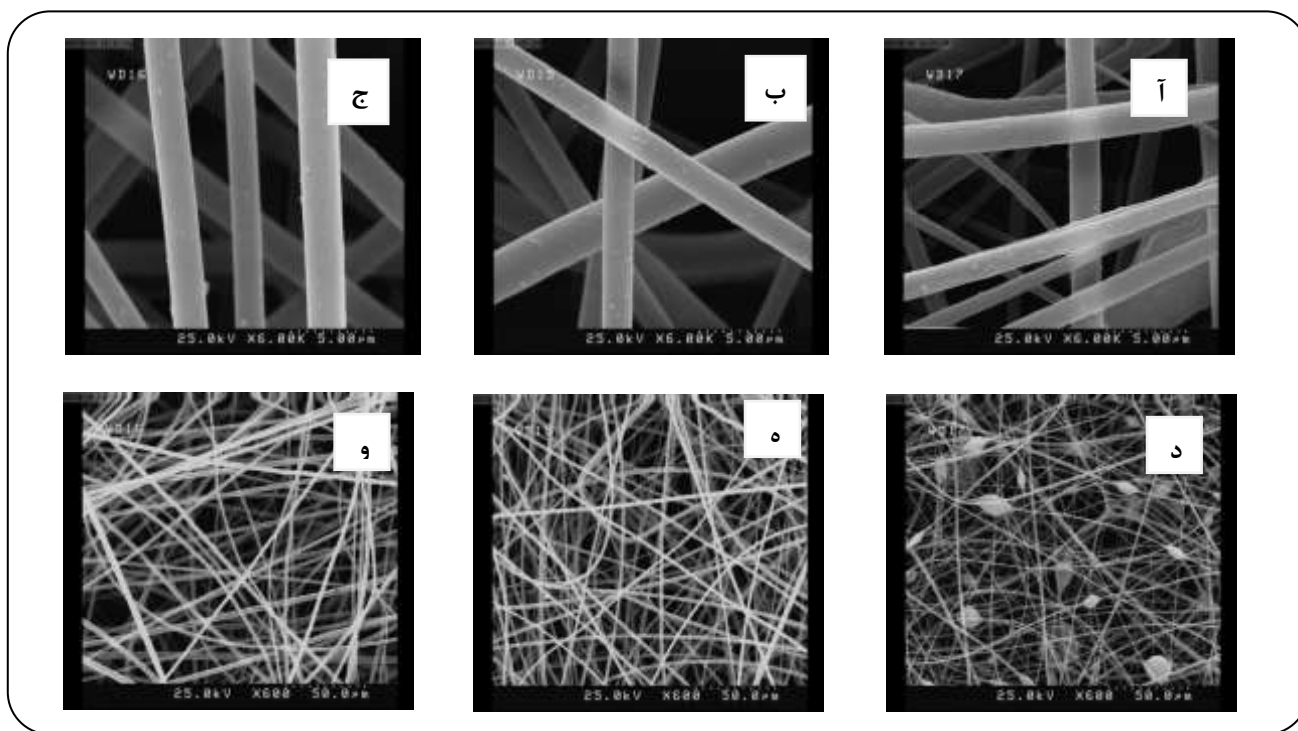
آزمون‌های انجام شده

به منظور بررسی ساختار و سطح الیاف ریسیده شده از عکس‌های میکروسکوپی الکترون روبشی (SEM) گرفته شده با دستگاه مدل HITACHI S-4160 در ولتاژ ۳۰ کیلو ولت استفاده شده است و نمونه‌ها پیش از عکس برداری توسط دستگاه تبخیر خلأ با ۱۰ نانو متر طلا پوشش‌دهی شده است.

(۱) Tip-to-Collector Distance e



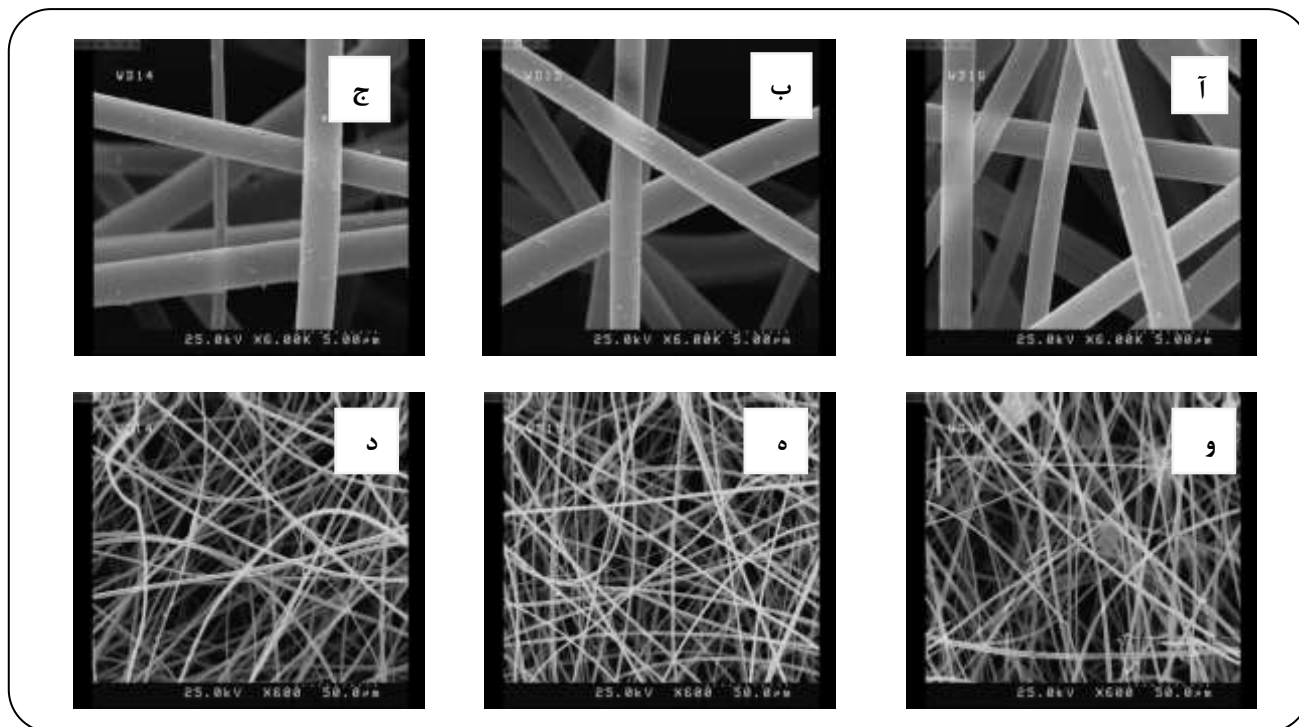
شکل ۱- شماتیکی از محفظه شرایطی.



شکل ۲- عکس‌های SEM از بستر الیاف ریسیده شده در دمای 35°C، مقدار نانو سیلیکا ۲ wt.% و رطوبت نسبی‌های (آ و د) ۳۰٪، (ب و ه) ۵۰٪ و (ج و و) ۷۰٪ در دو بزرگنمایی ۶۰۰ و ۶۰۰۰.

نشان می‌دهد، فرایند جامد شدن سریع‌تر الیاف به دلیل جذب آب و رطوبت در رطوبت‌های نسبی بالا تر (۵۰٪ و ۷۰٪)، موجب جلوگیری از پدیده نا پایداری موئینگی شده و الیافی عاری از دانه را تولید کرده. این در حالیست که در رطوبت نسبی ۳۰٪، به دلیل کمتر بودن رطوبت، این امر صورت نگرفته و با توجه به رخ دادن پدیده نا پایداری موئینگی، الیافی دانه دار ریسیده شده است.

رطوبت بیش‌تر هوا نسبت به هوای عاری از رطوبت اتفاق افتاده و راحت‌تر این تخلیه بار صورت می‌گیرد که موجب کمتر کشیده شدن الیاف و در نتیجه افزایش قطر الیاف می‌باشد. همان‌گونه که در شکل ۲ قسمت‌های "د"، "ه" و "و" که بستر الیاف ریسیده شده را در رطوبت نسبی‌های به ترتیب ۳۰٪، ۵۰٪ و ۷۰٪ را در دما (۳۵ درجه سلسیوس) و میزان نانو ذره (۲٪ وزنی) یکسان



شکل ۳- عکس‌های SEM از بستر الیاف ریسیده شده در رطوبت نسبی ۵۰٪، مقدار نانو سیلیکا ۲ wt.% و دماهای (آ و د) ۲۵°C، (ب و ه) ۳۵°C و (ج و و) ۴۵°C در دو بزرگنمایی ۶۰۰ و ۶۰۰۰.

پ) اثر میزان نانو ذره‌های سیلیس بر ساختار بستر الیاف ریسیده شده

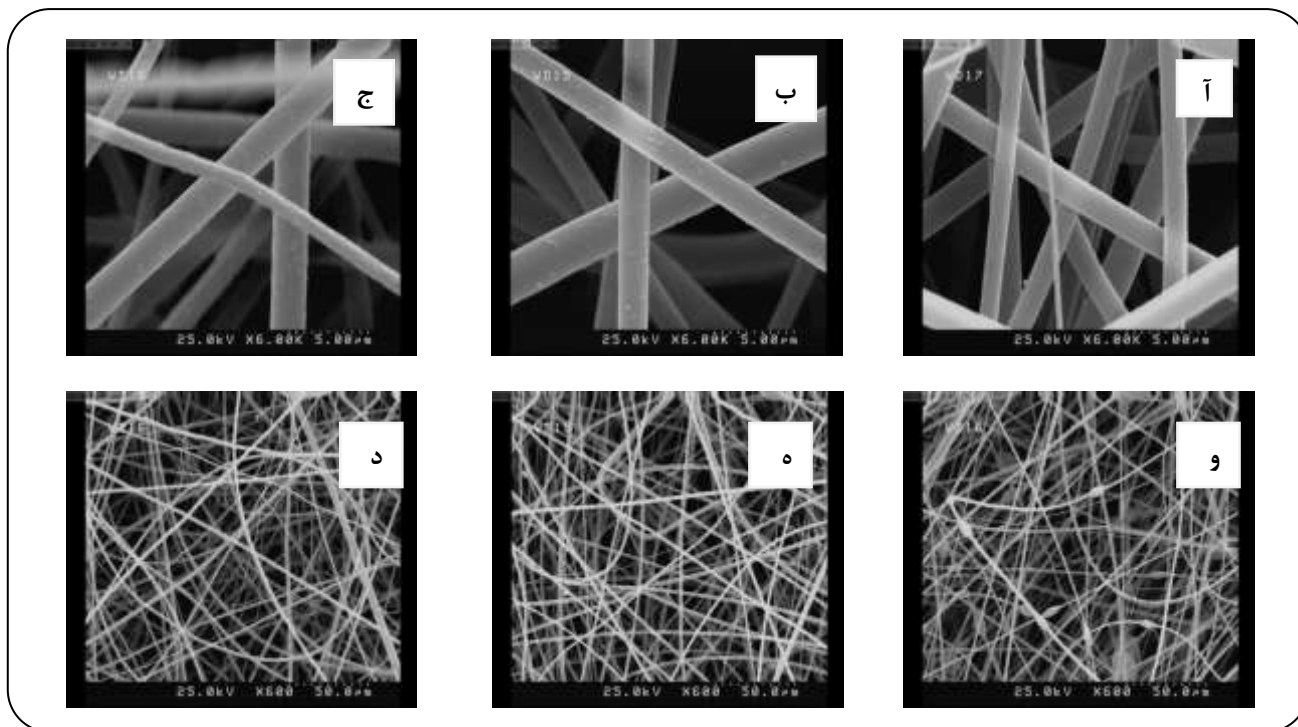
میزان نانو ذره با تغییر در میزان گرانیروی محلول پلیمری، متغیری تأثیر گذار بر ساختار بستر الیاف ریسیده شده می‌باشد [۸]. همان‌گونه که در عکس‌های SEM شکل ۴ قابل دیدن است، با افزایش میزان نانو ذره‌های سیلیس از ۰ به ۲ و سپس ۴ درصد وزنی، در ساختار الیاف ریسیده شده، دانه‌ها کاسته و الیافی صاف و عاری از دانه ریسیده شده است. دلیل این پدیده می‌تواند به خاطر افزایش گرانیروی با افزایش میزان نانو ذره باشد که این افزایش گرانیروی باعث کمک به افزایش نیروی ویسکو الاستیک شده که بر تنش سطح که عاملی اثر گذار بر تغییر شکل الیاف و ایجاد دانه‌ها است غلبه کرده و الیافی صاف و بدون دانه را ایجاد کرده است.

ساختار سطح الیاف ریسیده شده

در شکل ۵ عکس‌های SEM مربوط به سطح الیاف ریسیده شده در شرایط دمایی، رطوبتی و میزان نانو ذره متفاوت نشان داده شده است. با توجه به شکل ۵ از سه ساختار و ریخت شناسی متفاوت غیر متخلخل، چروکیده و نانو متخلخل که در کارهای دیگر

ب) اثر دما بر ساختار بستر الیاف ریسیده شده

در شکل ۳ عکس‌های SEM مربوط به الیاف ریسیده شده در شرایط دمایی متفاوت ۲۵ درجه سلسیوس ("آ" و "د")، ۳۵ درجه سلسیوس ("ب" و "ه") و ۴۵ درجه سلسیوس ("ج" و "و") در شرایط یکسان رطوبت نسبی ۵۰٪ و میزان نانو ذره ۲٪وزنی در دو بزرگ نمایی گوناگون می‌باشد. همان‌گونه که دیده می‌شود در دمای ۲۵ درجه سلسیوس الیاف با ساختاری دانه دار تشکیل شده و با افزایش دما به ۳۵ و سپس ۴۵ درجه سلسیوس، این پدیده روی نداده و الیافی صاف و عاری از دانه تشکیل شده. دلیل این پدیده می‌تواند افزایش سرعت تبخیر حلال از جت پلیمری با افزایش دما باشد [۱۰]. با افزایش دما و افزایش سرعت تبخیر حلال، غلظت جت پلیمری افزایش پیدا می‌کند که سبب افزایش نیروی ویسکو الاستیک شده و در نتیجه از ناپایداری موئینگی، که عامل ایجاد الیاف دانه دار است، جلوگیری شده و الیافی عاری از دانه ریسیده شده است. همچنین افزایش دما سبب کاهش کشش سطح شده و باعث می‌شود که نیروی کشش سطح نتواند بر نیروی ناشی از اختلاف پتانسیل القایی به جت پلیمری غلبه کند و نتواند زمینه ساز ایجاد الیاف دانه دار شود.



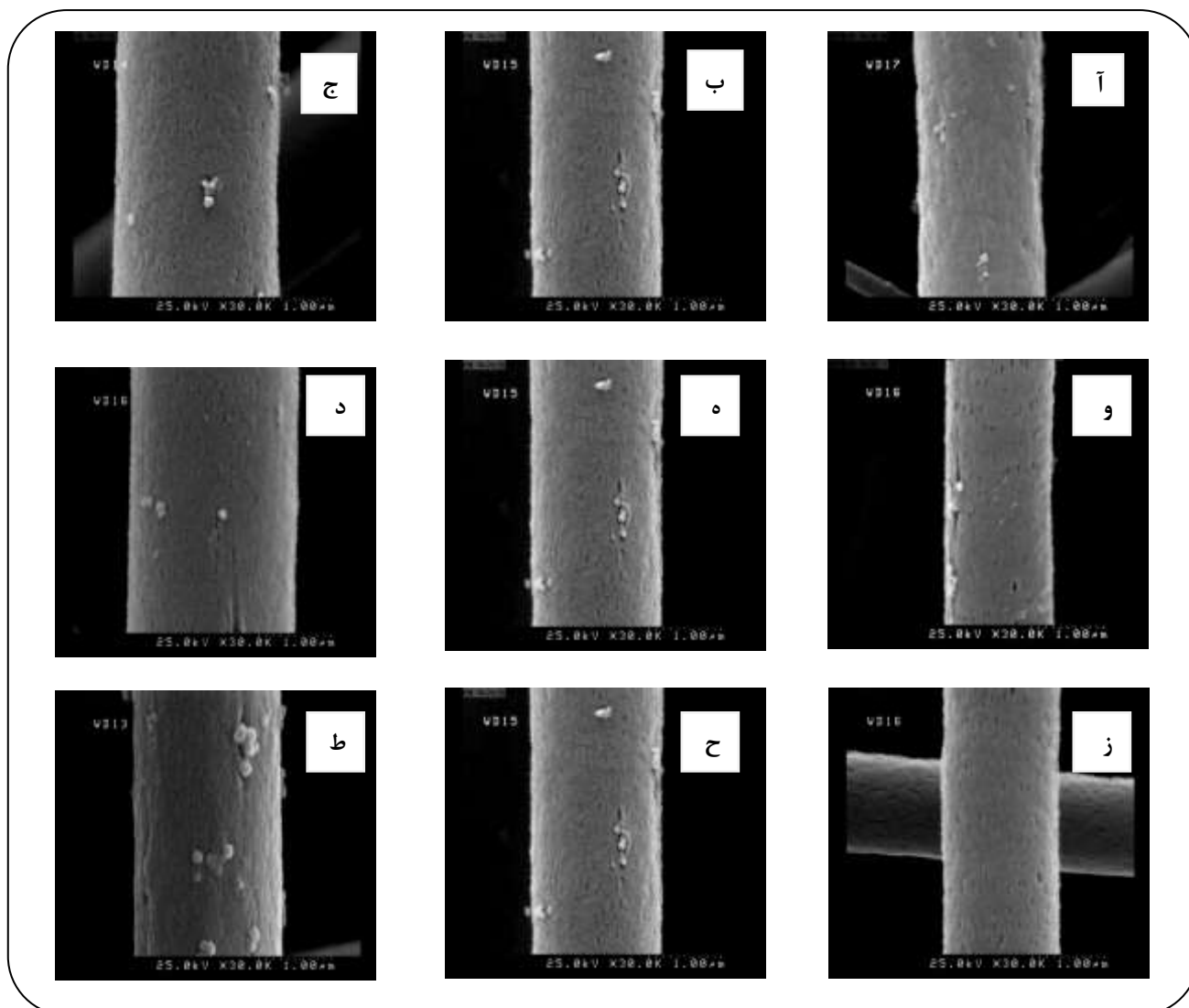
شکل ۴- عکس‌های SEM از بستر الیاف ریسیده شده در در رطوبت نسبی ۵۰٪ و دمای ۳۵°C و مقدارهای گوناگون نانو سیلیکا (آ و د) wt.٪ + ، (ب و ه) ۲ wt.٪ و (ج و و) ۴ wt.٪ در دو بزرگنمایی ۶۰۰ و ۶۰۰۰.

آنگاه ناپایداری پیچشی ممکن است اتفاق بیفتد [۱۳]. در ادامه به اثر هر کدام از متغیرهای رطوبت نسبی، دما و میزان نانو ذره بر روی این زمان‌ها و ساختار سطح الیاف پرداخته شده است.

الف) اثر رطوبت بر ساختار سطح الیاف ریسیده شده

همان‌گونه که در شکل ۵ (آ، ب و ج) قابل تشخیص است، در دمای ۳۵ درجه سلسیوس و میزان نانو ذره سیلیس ۲ درصد وزنی، با افزایش رطوبت نسبی از ۳۰ به ۵۰ و سپس به ۷۰ درصد، ساختار سطح الیاف از حالت چروکیده به حالت نانو متخلخل تغییر می‌یابد. از سویی در منابع آورده شده است که با افزایش رطوبت نسبی، زمان خشک شدن (td) و پیچش (tb) به تدریج افزایش می‌یابد و این دو زمان به هم نزدیک می‌شوند [۱۱]. همان‌گونه که در شکل ۵ قسمت آ قابل تشخیص است، در رطوبت نسبی ۳۰ درصد، سطح الیاف دارای حالتی چروکیده می‌باشد که این پدیده می‌تواند به خاطر کم‌تر شدن زمان پیچش نسبت به زمان خشک شدن و جدایش فازی باشد که به موجب آن سطح پلیمر قبل از جامد شدن، به صورت سیال و ژل مانند در آمده و تحت تأثیر فشار اتمسفریک، تغییر شکل داده و به صورت چروکیده در آمده است. با توجه به شکل ۵ قسمت ب و ج

دیده و گزارش شده [۱۰]، دو ساختار چروکیده و نانو متخلخل با توجه به تغییر در متغیرهای یاد شده درحالی که سایر شرایط عملیاتی ریسندگی ثابت و بدون تغییر بوده است، قابل تشخیص هستند. نمونه الیاف‌هایی که دارای سطح چروکیده هستند، درونشان با توجه به عکس‌های گرفته شده از سطح مقطع آن‌ها در فرایند الکتروریسی جدایش فازی اتفاق نمی‌افتد [۱۱]. در این کارها دلیل ایجاد این سطح چروکیده به این صورت آورده شده است که با تبخیر حلال از سطح الیاف یک لایه نازک بر روی سطح الیاف تشکیل می‌شود که این لایه نازک تحت فشارهای اتمسفری، دچار فرو رفتگی می‌شود و ساختاری چروکیده را ایجاد می‌کند. این پدیده در منابع ناپایداری پیچشی نام گذاری شده است [۱۲]. مشاهده‌های یاد شده با استفاده از سه زمان مشخصه می‌تواند قابل توجیه باشد. این سه زمان عبارتند از زمان خشک شدن الیاف با نماد td، زمان ناپایداری پیچشی با نماد tb و زمان جدایش فازی با نماد tps که با این سه زمان می‌توان پیش بینی کرد که سطح الیاف دارای چه ساختاری می‌تواند باشند. با توجه به کارهای انجام شده، زمان خشک شدن و زمان پیچش، به صورت وارون با سرعت اولیه تبخیر حلال دارای ارتباط می‌باشند و اگر زمان ناپایداری پیچشی (tb) کوچکتر از زمان خشک شدن الیاف (td) باشد،



شکل ۵ - عکس‌های SEM از سطح الیاف ریسیده شده (آ)، (ب) و (ج) به ترتیب الیاف ریسیده شده در دمای 35°C ، میزان نانو سیلیکا ۲ wt.% و رطوبت نسبی های ۳۰، ۵۰ و ۷۰ درصد؛ (د)، (ه) و (و) الیاف ریسیده شده در رطوبت نسبی ۵۰٪، میزان نانو سیلیکا ۲ wt.% و دماهای ۲۵، ۳۵ و ۴۵ درجه سلسیوس؛ (ز)، (ح) و (ط) الیاف ریسیده شده در رطوبت نسبی ۵۰٪ و دمای 35°C و مقدارهای گوناگون نانو سیلیکا ۰، ۲ و ۴ درصد وزنی.

که در این سامانه آب است) بیش‌تری بدون ایجاد جدایش فازی می‌تواند در سامانه محلول پلیمری جذب شود و برای رسیدن به ناحیه دو فازی به جذب رطوبت بیش‌تری نیاز است که در نتیجه به رطوبت بیش‌تری در محیط احتیاج است. از سویی افزایش دما سبب افزایش سرعت تبخیر و در نتیجه کمتر شدن زمان خشک شدن و ناپایداری پیچشی نسبت به زمان جدایش فازی می‌شود. همان‌گونه که در شکل ۵ قسمت "د"، "ه" و "و" قابل دیدن است، در رطوبت نسبی ۵۰ درصد و میزان نانو ذره ۲ درصد وزنی ثابت، در دمای ۲۵ درجه سلسیوس الیاف دارای نانو تخلخل است

در رطوبت نسبی ۵۰ و ۷۰ درصد، زمان جدایش فازی به دلیل افزایش رطوبت نسبی و افزایش دو زمان خشک شدن و ناپایداری پیچشی، کمتر از آن‌ها شده و شاهد ایجاد نانو تخلخل روی سطح الیاف به دلیل جدایش فازی هستیم.

ب) اثر دما بر ساختار سطح الیاف ریسیده شده

دما بر روی جدایش فازی اثر گذار است و این اثر بدین شکل است که با افزایش دما ناحیه همگن در تعادل فازی حلال - غیر حلال - پلیمر بزرگ‌تر می‌شود. این بدین معنی است که میزان غیر حلال

نانو تخلخل و سطح ویژه ساختار پلیمری خود الیاف ریسیده شده می‌شود. افزایش میزان نانو ذره‌های سیلیس اثری همانند افزایش غلظت محلول پلیمری دارد. افزایش میزان نانو ذره موجب افزایش گرانروی محلول پلیمری می‌شود و نفوذ آب را به درون سامانه محلول پلیمری سخت تر می‌کند و نیاز به میزان رطوبت بیش‌تری در محیط است که جدایش فازی اتفاق بیفتد. از طرفی از آنجایی که نانو ذره‌های سیلیس استفاده شده در این سامانه محلول پلیمری غیر آب دوست می‌باشد و همانند یک حفاظ در برابر نفوذ آب عمل کرده و جذب آب به سامانه را کند می‌کند.

نتیجه گیری

در این پژوهش الیاف نانو متخلخل پلی استایرنی به روش الکترورسی تولید شد. به منظور بررسی اثر متغیرهای محیطی دما ($25-45^{\circ}\text{C}$)، رطوبت (۳۰-۷۰٪) و همچنین میزان نانو ذره‌های سیلیس (۳۷-۰٪) بر روی ریخت شناسی الیاف ریسیده شده، طراحی آزمایش با ۷ آزمایش انجام شد. به منظور تغییر در شرایط محیطی ریسندگی، محفظه‌ای ساخته شد. تصویرهای SEM تهیه شده از بستر و سطح الیاف ریسیده شده نشان از اثر گذاری این متغیرها روی ریخت شناسی الیاف را داد. با افزایش هر یک از متغیرهای رطوبت، دما و میزان نانو سیلیس نشان داد که بستر الیاف از الیافی دانه دار به الیافی صاف و عاری از دانه تغییر حالت پیدا کرد. همچنین ایجاد نانو حفره‌ها روی الیاف با تغییر در متغیرهای یاد شده مشاهده شد. تعداد و تراکم نانو حفره‌های موجود در ساختار پلیمری سطح الیاف ناشی از جدایش فازی با افزایش رطوبت، افزایش، و با افزایش دما و میزان نانو ذره‌های سیلیس کاهش یافته است.

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۴/۲۶ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۹/۲۷

که نشان از اتفاق افتادن جدایش فازی در این شرایط است. با افزایش دما به ۳۵ درجه سلسیوس و کمتر شدن زمان خشک شدن در برابر زمان جدایش فازی و همچنین بزرگ‌تر شدن ناحیه همگن این نانو تخلخل‌ها کمتر و در دمای ۴۵ درجه سلسیوس به تقریب نانو تخلخلی روی سطح الیاف ایجاد نشده است و به نظر می‌رسد در این دما سرعت تبخیر حلال بیش‌تر شده که باعث شده زمان خشک شدن (t_D) از زمان جدایش فازی (t_{PS}) کمتر شده و به زمان پیچش (t_B) نزدیک شده و تا جایی که جدایش فازی بسیار کم و پیچش اندکی در سطح الیاف قابل تشخیص است.

پ) اثر مقدار نانو ذره‌های سیلیس بر ساختار سطح الیاف ریسیده شده

همان‌گونه که در شکل ۵ قسمت "ز"، "ح" و "ط" قابل دیدن است در شرایط محیطی ثابت دمای ۳۵ درجه سلسیوس و ۵۰ درصد رطوبت نسبی، با افزایش میزان نانو ذره‌های سیلیس ساختار سطح الیاف ریسیده شده پلی استایرنی از نانو متخلخل به چروکیده تغییر پیدا می‌کند به طوری که در میزان نانو ذره صفر درصد وزنی، ساختاری نانو متخلخل با تعداد زیادی حفره قابل تشخیص است و با افزایش این مقدار به ۲ درصد وزنی، ساختار نانو متخلخل با تعداد حفره‌های کم‌تری ایجاد شده و با افزایش این میزان به ۴ درصد وزنی، ساختار نانو متخلخل جای خود را به ساختار چروکیده می‌دهد که نشان از عدم اتفاق افتادن جدایش فازی می‌باشد. از این رو افزایش نانو سیلیکا اثری دو طرفه دارد؛ از سویی با افزایش میزان نانو ذره، میزان بیش‌تری نانو ذره‌های سیلیس روی سطح الیاف ریسیده شده قرار می‌گیرد که هم باعث افزایش میزان تخلخل سطح می‌شود و از سوی دیگر بر فرایند جدایش فازی اثر منفی دارد و سبب جلوگیری از افزایش

مراجع

- [1] Lee K.H., Kim H.Y., Bang H.J., Jung Y.H., Lee S.G., *The Change of Bead Morphology Formed on Electrospun Polystyrene Fibers*, *Polymer (Guildf)*, **44**(14): 4029–4034 (2003).
- [2] Pillay V., Dott C., Choonara Y.E., Tyagi C., Tomar L., Kumar P., du Toit L.C., Ndesendo V. M. K., *A Review of the Effect of Processing Variables on the Fabrication of Electrospun Nanofibers for Drug Delivery Applications*, *J. Nanomater.*, **2013** (ID 789289): 1-22 (2013).

- [3] Huan S., Liu G., Han G., Cheng W., Fu Z., Wu Q., Wang Q., [Effect of Experimental Parameters on Morphological, Mechanical and Hydrophobic Properties of Electrospun Polystyrene Fibers](#), *Materials (Basel)*, **8**(5): 2718–2734 (2015).
- [4] Ray S.S., Chen S.-S., Li C.-W., Nguyen N.C., Nguyen H.T., [A Comprehensive Review: Electrospinning Technique for Fabrication and Surface Modification of Membranes for Water Treatment Application](#), *RSC Adv.*, **6**(88): 85495–85514 (2016).
- [5] Pelipenko J., Kristl J., Janković B., Baumgartner S., Kocbek P., [The Impact of Relative Humidity During Electrospinning on the Morphology and Mechanical Properties of Nanofibers](#), *Int. J. Pharm.*, **456**: 125–134 (2013).
- [6] Bae H.S.H., Haider A., Selim K.M.K., Kang D.Y.D., Kim E.J., Kang I.K., [Fabrication of Highly Porous PMMA Electrospun Fibers and Their Application in the Removal of Phenol and Iodine](#), *J. Polym. Res.*, **20**(7): 158- 168 (2013).
- [7] De Vrieze S., Van Camp T., Nelvig A., Hagström B., Westbroek P., De Clerck K., [The effect of Temperature and Humidity on Electrospinning](#), *J. Mater. Sci.*, **44**(5): 1357–1362 (2009).
- [8] Lu P.P., Xu Z.L., Yang H., Wei Y.M., [Processing-Structure-Property Correlations of Polyethersulfone/ Perfluorosulfonic Acid Nanofibers Fabricated via Electrospinning from Polymer-nanoparticle Suspensions](#), *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **4**(3): 1716–1723 (2012).
- [9] Kim G.-T., Lee J.-S., Shin J.-H., Ahn Y.-C., Hwang Y.-J., Shin H.-S., Lee J.-K., Sung C.-M., [Investigation of Pore Formation for Polystyrene Electrospun Fiber: Effect of Relative Humidity](#), *Korean J. Chem. Eng.*, **22**(5): 783–788 (2005).
- [10] Fashandi H., Karimi M., [Pore Formation in Polystyrene Fiber by Superimposing Temperature and Relative Humidity of Electrospinning Atmosphere](#), *Polym. (United Kingdom)*, **53**(25): 5832–5849 (2012).
- [11] Pai C.L., Boyce M.C., Rutledge G.C., [Morphology of Porous and Wrinkled Fibers of Polystyrene Electrospun from Dimethylformamide](#), *Macromolecules*, **42**(6): 2102–2114 (2009).
- [12] Tu Z., [Elastic Theory of Membranes](#), *AAPPS Bull.*, **16**(3): 30–33 (2006).
- [13] Pauchard L., Allain C., [Buckling Instability Induced by Polymer Solution Drying](#), *Europhys. Lett.*, **62**(6): 897–903 (2003).