

ارزیابی اثر نانولوله‌های کربنی تک‌جداره بر میزان تخلخل فیلترهای نانولیفی بی‌بافت

سمیه فرهنگ دهقان^۱، فریده گلبابایی^{۱*}، بزرگمهر مداح^۲، مسعود لطیفی^۳، حمید پزشکی^۴ و مهدی حسن‌زاده^۵

۱- گروه بهداشت حرفه‌ای، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی تهران، تهران، تهران

۲- گروه شیمی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه امام حسین، تهران

۳- دانشکده مهندسی نساجی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

۴- گروه ریاضی، آمار و علوم کامپیوتر، دانشکده علوم، دانشگاه تهران، تهران

۵- گروه مهندسی شیمی نساجی، دانشکده فنی، دانشگاه گیلان، رشت

تاریخ ثبت اولیه: ۱۳۹۴/۰۲/۱۲، تاریخ دریافت نسخه اصلاح شده: ۱۳۹۴/۰۳/۲۱، تاریخ پذیرش قطعی: ۱۳۹۴/۰۴/۱۰

چکیده

تخلخل به عنوان نسبت حجم فضاهایی خالی به حجم کل فیلتر، یکی از مهمترین مشخصه‌های فیلتراسیون در نظر گرفته می‌شود. مطالعه حاضر اثر افزودن نانولوله کربنی تک‌جداره (SWNT) بر میزان تخلخل فیلترهای نانولیفی بی‌بافت پلیمری حاصل از فرآیند الکتروریسی را مورد بررسی قرار می‌دهد. بدین منظور دو نوع محلول الکتروریسی آماده گردید. طرح آزمایش از طریق روش رویه پاسخ تهیه شد که در آن پارامترهای الکتروریسی شامل غلظت محلول، ولتاژ دستگاه و فاصله سوزن تزریق تا جمع‌آوری کننده به عنوان متغیرهای ورودی و پارامترهای تخلخل و قطر الیاف به عنوان متغیر پاسخ مد نظر قرار گرفت. مطالعات ریخت‌شناسی الیاف تولیدی از طریق پردازش تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی صورت گرفت. در بیشتر ترکیب‌های آزمایشی، اضافه کردن SWNT باعث بهبود خواص ریخت‌شناسی الیاف گردید. ولتاژ دستگاه بیشترین تاثیر را بر میزان تخلخل هر دو نوع الیاف PAN/SWNT و PAN/SWNT داشت (به ترتیب، $r=0/39$ و $r=0/16$). بطور میانگین درصد تخلخل مدیاهای تولید شده از الیاف PAN/SWNT (۴۱٪) نسبت به الیاف PAN (۴۴/۵٪) کمتر و میانگین قطر الیاف PAN/SWNT (۱۴۹/۷ نانومتر) نسبت به الیاف PAN (۱۰۸/۱ نانومتر) بیشتر بود. در مجموع، افزودن SWNT به محلول الکتروریسی توانست باعث بهبود خواص ریخت‌شناسی الیاف، افزایش میانگین قطر الیاف و کاهش درصد تخلخل فیلتر مدیا گردید، با این حال بسته به شرایط مختلف الکتروریسی نتایج می‌توانست متفاوت باشد.

واژه‌های کلیدی: فیلتر نانولیفی، پلی آکریلو نیتریل، نانولوله کربنی تک‌جداره، تخلخل.

۱- مقدمه

از روش‌های باندینگ (اتصال) برای تشکیل یک صفحه پارچه‌ای در کنار هم نگاه داشته می‌شوند [۳]. الکتروریسی یکی از متداول‌ترین روش‌های تولید فیلترهای نانولیفی بی‌بافت می‌باشد که قادر است نانوالیاف پلیمری با عملکرد بالا با گستره قطری ۵۰ نانومتر تا ۵ میلی‌متر تولید نماید [۴]. صفحات تولید شده از طریق فرآیند الکتروریسی به واسطه خواص برجسته خود شامل مساحت رویه بالا،

در میان انواع اصلی فیلترهای هوا شامل غشایی، فومی، دانه‌ای و لیفی، فیلترهای لیفی به خصوص نوع بی‌بافت آن پرکاربردترین نوع مدیا برای حذف ذرات از جریان گازی محسوب می‌شوند [۱، ۲]. فیلترهای بی‌بافت متشکل از توده‌ای از الیاف کوتاه و گاهی بلند هستند که بوسیله یکی

* عهده‌دار مکاتبات: فریده گلبابایی

نشانی: تهران، دانشگاه علوم پزشکی تهران، دانشکده بهداشت، گروه بهداشت حرفه‌ای

تلفن: ۰۲۱-۸۸۹۵۱۳۹۰، دورنگار: ۰۲۱-۸۸۹۵۴۷۸۱، پست الکترونیکی: fgoilbabaei@sina.tums.ac.ir

صفحه جمع‌آوری کننده کشیده می‌شود. در طی این حرکت، حلال آن تبخیر شده و رشته‌هایی با قطر زیر میکرون بر روی صفحه جمع‌آوری کننده تولید می‌گردد [۱۰]. خواص ریخت‌شناسی الیاف و صفحات تولیدی در این فرآیند تحت تاثیر پارامترهای عملیاتی دستگاه (مانند ولتاژ دستگاه، دبی سیال، فاصله نوک سوزن تا صفحه جمع‌آوری کننده)، ویژگی‌های محلول (مانند غلظت، وزن مولکولی، ویسکوزیته و کشش سطحی) و شرایط محیطی (مانند دما، فشار و رطوبت هوا) قابل تغییر است [۱۱]. گو (Gu) و همکاران گزارش کرده‌اند که در میان پارامترهای الکتروریسی، غلظت محلول اصلی‌ترین نقش را در تغییر قطر الیاف [۱۲] و متعاقب آن بر تخلخل صفحات تولیدی ایفا می‌کند. بطوریکه با افزایش غلظت محلول، قطر الیاف نیز افزایش می‌یابد. غلظت‌های بالاتر، دارای ویسکوزیته بیشتری نیز می‌باشند که این باعث مقاومت بیشتر محلول در برابر ازدیاد طول و نازک شدن لیف می‌شود [۱۳، ۱۴]. اثر ولتاژ کاربردی بر قطر الیاف کمی بحث برانگیز است و نتایج مطالعات مختلف تا حدی متفاوت می‌باشد. عده‌ای اظهار دارند اثر میدان الکتریکی بر سایز قطر بسیار ناچیز است [۱۴]. نتایج مطالعات دیگری بیانگر آن است که ولتاژهای بالاتر تشکیل الیاف با قطر بزرگتر را تسهیل می‌بخشند [۱۵]. نتایج دیگری نشان داده است ولتاژهای بیشتر می‌تواند نیروی دافعه الکترواستاتیک در جت شارژ شده را افزایش دهند، بنابراین باعث باریک شدن قطر لیف گردند [۱۶، ۱۷]. مطابق گزارش‌ها، رابطه منفی بین فاصله نوک سوزن تا صفحه جمع‌آوری کننده و قطر الیاف وجود دارد، یعنی با افزایش فاصله امکان بی‌ثباتی خمشی الیاف فراهم می‌آید، بدین ترتیب الیاف کشیده و قطر لیف و جت پلیمر کاهش می‌یابد [۱۲]. سه فاکتور ذکر شده، به عنوان پارامترهای حیاتی در فرآیند الکتروریسی می‌توانند اصلی‌ترین تغییرات را در خواص ریخت‌شناسی الیاف ایجاد نمایند [۱۲].

بسیاری از پلیمرهای آلی می‌توانند برای تولید نانوالیاف الکتروریسی شده بکار روند. در میان آنها، پلی آکریلو نیتریل (PAN) بعنوان یک پلیمر همه‌کاره به علت ویژگی‌های فیزیکی خوب، قیمت مناسب و سهولت الکتروریسی شدن، کاربردهای بالقوه‌ای در زمینه‌های

پورسایز کوچک، ساختارهای حفره‌ای با نفوذپذیری و تخلخل مناسب، وزن مبنای کم و قطر الیاف کوچک توانسته است توجه بسیاری از محققین را جهت کاربرد در زمینه‌های مختلف به ویژه فیلتراسیون جلب نماید. این فیلترها می‌توانند برای اهداف پاک‌سازی هوا در تهویه اتاق‌های پاک و یا به عنوان مدیای ماسک تنفسی استفاده شوند [۵].

مهمترین ویژگی فیلتر، کارایی آن در جداسازی آلاینده از جریان هوا می‌باشد که بر حسب نسبت تراکم آلاینده قبل و بعد از فیلتر تعریف می‌شود. اگرچه در این میان، افت فشار ایجاد شده برای جریان هوا در اثر عبور از فیلتر هم حائز اهمیت است. از این رو پارامتر فاکتور کیفیت مطرح شده است که شاخصی از عملکرد بهینه فیلتر می‌باشد و هر دو موضوع کارایی جمع‌آوری و مقاومت در برابر جریان هوا را مد نظر قرار می‌دهد. در عمل، یک فیلتر با کیفیت دارای کارایی جمع‌آوری بالا و مقاومت پایین در برابر جریان هوا است. افت فشار پایین با دانسیته فشردگی پایین (نسبت حجم فضای اشغال شده بوسیله الیاف فیلتر به کل حجم فیلتر است که همان یک منهای تخلخل می‌باشد)، و قطر بزرگتر الیاف محقق می‌شود. البته همه این موارد به کاهش کارایی فیلتر منجر می‌شود. بنابراین پیدا کردن نقطه بهینه برای ایجاد تعادل بین افت فشار فیلتر و کارایی آن ضروری است [۶]. قطر الیاف کوچکتر و دانسیته فشردگی بالاتر، کارایی جمع‌آوری بالاتری ارائه می‌دهند و از طرفی تخلخل بیشتر باعث کاهش افت فشار و مقاومت آن می‌گردد [۷-۹]. تخلخل به عنوان نسبت حجم فضاهایی خالی به حجم کل فیلتر یکی از مهمترین مشخصه‌های فیلتراسیون در نظر گرفته می‌شود. تخلخل به عنوان فاکتوری تاثیرگذار بر ظرفیت نگهداشت ذرات در فیلتر و میزان نفوذپذیری آن در برابر عبور هوا محسوب می‌شود که می‌تواند تحت تاثیر قطر الیاف نیز قرار گیرد، بطوری که تعداد حفره‌ها یا فضاهای خالی یک فیلتر تابعی از عکس توان چهار قطر الیاف آن است [۳].

در فرآیند الکتروریسی یک میدان الکتریکی ولتاژ بالا بین نوک سوزن حاوی محلول الکتروریسی و صفحه جمع‌آوری کننده الیاف تولید شده، ایجاد می‌گردد. با خروج محلول از درون این سرنگ، فوراً باردار شده و از نوک سوزن به سمت

که این موضوع می‌تواند این ماده را گزینه مناسبی برای کاربردهای فیلتراسیون و جداسازی معرفی نماید [۳۲]. لذا مطالعه حاضر با هدف بررسی اثر نانولوله کربنی تک‌جداره (به عنوان یک عامل ضد باکتری و بهبود بخش خواص ریخت‌شناسی الیاف) بر میزان تخلخل فیلترهای نانولیفی بی‌بافت پلیمری (به عنوان یک عامل موثر بر میزان افت فشار و عملکرد فیلتر) صورت گرفت. در این مطالعه همچنین تعیین تاثیرگذارترین پارامتر الکترورسی بر درصد تخلخل و قطر الیاف فیلترهای حاصله، تعیین اثر تعاملی تغییرات فاکتورهای عملیاتی الکترورسی بر میزان تخلخل و قطر الیاف، مطالعه ریخت‌شناسی الیاف تولیدی و تعیین رابطه بین درصد تخلخل و قطر الیاف مد نظر بود.

۲- فعالیت‌های تجربی

فیلترهای نانولیفی بی‌بافت توسط فرآیند الکترورسی تولید شدند. جهت ارزیابی اثر افزودن نانولوله کربنی تک‌جداره در درصد تخلخل این فیلترها، طرح آزمایشی توسط نرم‌افزار Design Expert-DX (Version 7, Stat-Ease, Minneapolis) از طریق روش رویه پاسخ (RSM) بر اساس طراحی کامپوزیت مرکزی (CCD) برای دو نوع محلول مختلف الکترورسی آماده گردید. در محلول اول، نانولوله کربنی تک‌جداره (SWNT) با پلیمر پلی آکریلو نیتریل (PAN) با کمک حلال N,N-دی متیل فرمامید (DMF) ترکیب شد. در محلول دوم، مخلوط PAN و DMF جهت مقایسه با نتایج PAN/SWNT آماده گردید. در طرح آزمایش آماده شده، فاکتورهای عملیاتی الکترورسی شامل غلظت محلول، ولتاژ دستگاه و فاصله سوزن تزریق تا جمع‌آوری کننده به عنوان متغیرهای ورودی و پارامتر تخلخل مدیا و قطر الیاف به عنوان متغیر پاسخ مد نظر قرار گرفت.

۲-۱- مواد

پلیمر پلی آکریلو نیتریل ($M_w = 80000 \text{ g/mol}$) از شرکت ایرانی پلی آکریل اصفهان و حلال ۹۹٪ N,N-دی متیل فرمامید (DMF) ($M_w = 73/1 \text{ g/mol}$) از مرک آلمان خریداری شد. نانولوله کربنی تک‌جداره (SWNT) با خلوص بالای ۷۰٪ از شرکت سیگما آلد ریج آمریکا تهیه شد.

مختلف علمی از جمله فیلتراسیون دارد [۱۸]. در مطالعات مختلف عملکرد فیلتراسیون صفحات نانولیفی الکترورسی شده PAN مورد بررسی قرار گرفته است که کارایی جمع‌آوری ذرات برای این صفحات مشابه و حتی بالاتر از فیلترهای با عملکرد بالای هیپا (High-Efficiency Particulate Air) گزارش شده است [۱۹،۲۰]. پن (PAN) همچنین به عنوان آغازگر تولید نانوالیاف کربن فعال مورد استفاده در تحقیقات پاک‌سازی هوا نیز مطرح می‌باشد [۲۱].

امروزه افزودن ترکیبات آلی یا معدنی به محلول الکترورسی مورد توجه قرار گرفته است، زیرا اجازه تولید نانوالیاف ترکیبی (هیبریدی) با خواص عملکردی ویژه را فراهم می‌نماید [۲۲،۲۳]. در مبحث فیلتراسیون، افزودن کاتالیست‌های مناسب به الیاف می‌تواند به فیلتر ویژگی‌های جذب فیزیکی-شیمیایی و یا خواص ضد میکروبی ببخشد [۲۴-۲۶]. از زمانی که نانولوله‌های کربنی برای اولین بار در سال ۱۹۹۱ کشف شدند به دلیل ویژگی‌های منحصربفرد خود مانند اندازه، ساختار، خصوصیات مکانیکی و سطحی، پایداری شیمیایی در زمینه‌های بسیار متنوعی مورد توجه قرار گرفته‌اند. نانولوله‌های کربنی تک‌جداره از انواع نانولوله‌های کربنی، به صورت یک استوانه با قطر ۲-۱ نانومتر از یک ورقه گرافیتی تک لایه بطور یکپارچه پیچیده شده تشکیل شده است [۲۷،۲۸]. در مطالعات الکترورسی دیده شده است که نانولوله کربنی تک‌جداره (SWNT)، قدرت هم‌ترازی نانوالیاف پلیمری را افزایش داده و امکان تولید الیاف با قطر کمتر را فراهم می‌آورد و در اثر حرارت (هنگام تولید نانوالیاف کربنی) نیز آسیب نمی‌بیند. خواص ویژه نانولوله کربنی تک‌جداره در بهبود مشخصات مکانیکی الیاف پلیمری نشان داده شده است [۲۹،۳۰]. ضمن آن که خواص ضد میکروبی آن که یک ویژگی حیاتی برای فیلترهای سیستم‌های تهویه مورد استفاده در محیط‌های گرم و مرطوب است، به اثبات رسیده است [۳۱]. دامی (Dumee) و همکاران یافتند که کامپوزیت کاغذ-نانولوله کربنی می‌تواند تخلخل بالا ($> 90\%$)، مساحت رویه مناسب ($< 400 \text{ m}^2/\text{g}$) و قطر منافذ ۵۰-۲۰ نانومتری ارائه دهد

۲-۲- اثر پارامترهای الکتروریسی بر تخلخل

جهت دستیابی به فیلترهایی با میزان تخلخل و ریخت‌شناسی (Morphology) دلخواه مثل توزیع یکنواخت لیف، عدم ایجاد برجستگی و دانه در لیف (Bead) و ایجاد شاخه‌های اضافه (Branching)، بهینه‌سازی پارامترهای الکتروریسی مانند رژیم غلظتی محلول الکتروریسی، ولتاژ دستگاه الکتروریسی، و فاصله سوزن تا صفحه جمع‌آوری کننده مد نظر قرار گرفت و سایر پارامترهای الکتروریسی برای تمام نمونه‌ها یکسان‌سازی شد. تهیه طرح مطالعه و تجزیه و تحلیل نتایج توسط نرم‌افزار Design Expert صورت گرفت. در مجموع ۳۰ ران (Run) آزمایش (۱۵ ران آزمایش برای هر محلول) برای محلول‌های الکتروریسی مورد بررسی اجرا شد که طی انجام آنها متغیرهای مورد نظر در مقادیر مختلف (مطابق طرح مطالعه پیشنهادی نرم‌افزار-جدول ۱) تنظیم شدند. مراحل انجام کار شامل پنج گام بود:

۱- تعیین محدوده برای هر متغیر مورد بررسی در الکتروریسی

مقادیر مرزی برای هر متغیر مورد بررسی در الکتروریسی از طریق مطالعات مقدماتی به منظور شکل‌گیری الیاف پیوسته و بدون شکستن الیاف به قطرات حاصل شد. همچنین این مقادیر بر اساس شرایط عملیاتی دستگاه الکتروریسی مورد استفاده تعیین گردیدند.

۲- آماده‌سازی محلول‌های الکتروریسی

غلظت محلول PAN/DMF از ۸ تا ۱۶ درصد وزنی تهیه شد و محلول توسط همزن مغناطیسی صفحه داغ (Heidolph: MR Hei-Standard) در دمای اتاق به مدت ۱۲ تا ۲۴ ساعت به منظور بدست آوردن محلول همگن هم زده شد [۳۳]. نسبت محلول PAN/SWNT ۱:۹۹ در نظر گرفته شد. به منظور حذف ناخالصی‌های آهن، در کوره با دمای 225°C به مدت ۱۶ ساعت قرار داده شد. سپس به مدت یک روز در محلول اسید کلریدریک (HCl) غلیظ و سورفکتانت سدیم دودسیل سولفات (SDS) توسط همزن مغناطیسی هم زده شد. بعد از آن محلول به دست آمده به قیف بوختر منتقل و به مدت ۳ روز با آب مقطر شسته شد. برای آماده‌سازی محلول الکتروریسی PAN/SWNT حجم حلال DMF ۳ برابر میزان مورد نیاز

برای رسیدن به غلظت مورد نظر تعیین شد بطوری که PAN بطور مجزا در یک واحد DMF و SWNT در دو واحد DMF توسط همزن مغناطیسی و حمام اولتراسونیک به مدت ۱۲ ساعت حل و هم زده شد. در نهایت هر دو محلول باهم ترکیب و حلال اضافه به منظور رسیدن به غلظت مورد نظر تبخیر شد [۳۴، ۳۰].

۳- الکتروریسی

انجام ران‌های آزمایش مطابق طرح آزمایش، توسط فرآیند الکتروریسی در شرایط ذیل انجام شد. غلظت محلول ۸ تا ۱۶ درصد وزنی، ولتاژ کاربردی ۱۰ تا ۲۰ کیلو ولت، فاصله سوزن تا صفحه جمع‌آوری کننده ۱۵-۱۰ سانتی‌متر، دما 30°C ، مدت زمان ۵ دقیقه، صفحه جمع‌آوری پوشیده شده با فویل آلومینیم، نرخ تزریق ۱ میلی‌لیتر بر ساعت، سرنگ ۵ میلی‌لیتر، قطر سوزن گیج ۱۸ (قطر خارجی $1/2$ میلی‌متر). برای خشک کردن نمونه‌های جمع‌آوری شده قبل از تصویربرداری، آنها به مدت ۲ ساعت در خلا در دمای اتاق نگهداشته شدند.

۴- پردازش تصاویر

مطالعات ریخت‌شناسی فیلترها و قطر الیاف تولیدی از طریق تهیه تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی SEM (Hitachi S4160) و نرم‌افزار پردازش تصویر (Microstructure Measurement, Ferdowsy University) صورت گرفت. برای هر آزمایش، متوسط قطر الیاف در حدود 50 nm اندازه‌گیری از الیاف تصادفی تعیین شد. تخلخل مדיاها با استفاده از الگوریتم‌های تجزیه و تحلیل تصویری با کمک نرم‌افزار MATLAB (MathWorks, Version 7) تعیین گردید. بسیاری از مطالعات پردازش تصویر را به عنوان روشی مطمئن برای تعیین تخلخل معرفی کرده‌اند [۳۵، ۳۶]. در مطالعه حاضر تخلخل فیلترها با استفاده از الگوریتم پردازش تصویر تعیین شد که در آن عنصر ورودی یک تصویر دوتایی می‌باشد. روش آستانه جهانی (Global Thresholding) یک راه‌حل ساده برای تولید تصاویر دوتایی از یک تصویر سیاه و سفید می‌باشد که در آن از یک آستانه ثابت برای بخش‌بندی عکس استفاده می‌شود. همه پیکسل‌ها بالاتر و مساوی آستانه شی و بقیه متعلق به زمینه هستند. در این روش ابتدا تصویر SEM به الگوی خاکستری تبدیل شده و

شاخه‌های اضافه) بدست آمده برای الیاف PAN و PAN/SWNT متعلق به شماره آزمایش ۱ (غلظت محلول ۱۶ درصد وزنی، ولتاژ دستگاه ۲۰ کیلوولت، فاصله نوک سوزن تا صفحه ۱۰ سانتی‌متر) می‌باشد. البته حداکثر میانگین قطر هر دو نوع الیاف نیز برای این ترکیب آزمایش حاصل شده است. نتایج مطالعات گذشته نشان داده است افزایش غلظت محلول الکتروریسی می‌تواند باعث کاهش حضور قطرات و گره در الیاف تولیدی و ارتقای کیفیت آنها شود و از طرف دیگر میانگین قطر الیاف را نیز افزایش دهد. گره خوردگی‌ها معمولاً ناشی از تجمع مولکول‌های حلال و آن نیز به علت کشش سطحی محلول می‌باشد و در غلظت‌های بالا و در نتیجه افزایش درهم تنیدگی بیشتر زنجیره‌های پلیمر، مولکول‌های حلال در میان زنجیره‌های درهم تنیده پخش شده و تمایل برای جمع‌شدگی کمتر می‌شود [۳۸]. در غلظت‌های بالا، تحرک‌پذیری زنجیره‌ها کمتر شده و میزان کشش و پخش‌شدگی جت پلیمر کاهش می‌یابد، در نتیجه الیاف با قطر بیشتر ایجاد می‌گردد [۱۰]. این یافته‌ها با نتایج مطالعه حاضر که حداکثر غلظت محلول (۱۶ درصد وزنی) باعث ایجاد بهترین ریخت‌شناسی و حداکثر قطر الیاف شده، همخوانی دارد. افزودن نانولوله کربنی تک‌جداره به الیاف توانسته است باعث بهبود کیفیت الیاف در شماره آزمایش‌های ۵ و ۸-۱۰ گردد. اگر چه در ران‌های آزمایشی ۳ و ۴ (در غلظت‌های پایین ۸ wt.%) وجود SWNT باعث ایجاد برجستگی‌های دانه مانند در الیاف گردیده است.

در مطالعه‌ای توسط Chae و همکارانش (۲۰۰۵) نشان داده شد که الکتروریسی همزمان SWNT و PAN جهت‌گیری و هم‌ترازی الیاف را بهبود می‌بخشد [۳۰]. هو (Hou) و همکاران (۲۰۱۰) بهبود خواص ریخت‌شناسی، قدرت مکانیکی، مدول و استحکام کششی الیاف PAN/SWNT نسبت به الیاف PAN را گزارش کرده‌اند [۳۹].

این می‌تواند ناشی از مدول الاستیسیته بالای نانولوله‌های کربنی باشد که درجه سفتی پلیمر را افزایش می‌دهند [۴۰]. بطور کلی، الیاف PAN میانگین قطر (۱۰۸/۱۴ نانومتر) کمتری را نسبت به قطر الیاف PAN/SWNT (۱۴۹/۶۶ نانومتر) داشتند و اختلاف میانگین بین قطر این الیاف از نظر آماری معنی‌دار تعیین شد ($p\text{-value} < 0.001$). هیکیلا

سپس تصویر خاکستری با محاسبه آستانه در تصویر، تبدیل به تصویر دوتایی می‌گردد. بدین ترتیب می‌توان میزان تخلخل را با استفاده از میانگین شدت تصاویر به صورت زیر بیان کرد:

$$P = (1 - \frac{n}{N}) \times 100 \quad (1)$$

در این رابطه n تعداد پیکسل‌های سفید و N تعداد کل پیکسل‌های موجود در تصویر و P درصد تخلخل می‌باشد [۲۱، ۳۷].

- تجزیه و تحلیل آماری نتایج

تجزیه و تحلیل آماری داده‌های بدست آمده با استفاده از Design-Expert و تجزیه و تحلیل واریانس (ANOVA) انجام شد. این نرم‌افزار قادر است با کمک روش‌های آماری و ریاضی کار مدل‌سازی و بهینه‌سازی پارامترها را انجام دهد. همچنین بصورت کمی رابطه‌های بین پارامترهای ورودی کنترل‌پذیر و متغیر پاسخ به دست آمده ایجاد می‌کند. با کمک این نرم‌افزار، انجام طراحی آزمایش‌ها برای بدست آوردن مقدار واقعی دقیق متغیر پاسخ مورد نظر، ارائه مدل ریاضی چند جمله‌ای مناسب بین متغیرها برای پیش‌بینی متغیر پاسخ، تعیین شرایط بهینه یا کمینه کردن مقدار متغیر پاسخ و تجزیه و تحلیل اثرات مستقیم و تداخل بین پارامترها از راه نمودارهای دو بعدی و سه بعدی محقق شد.

۳- نتایج و بحث

طرح آزمایش تهیه شده توسط نرم‌افزار DX در جدول ۱ و تصاویر SEM متناظر آنها در شکل ۱ آورده شده است. در این طرح آزمایش، فاکتورهای عملیاتی الکتروریسی شامل غلظت محلول، ولتاژ دستگاه و فاصله سوزن تزریق تا جمع‌آوری کننده به عنوان متغیرهای مورد بررسی و پارامترهای درصد تخلخل فیلتر و قطر الیاف به عنوان متغیرهای پاسخ در نظر گرفته شده است.

۳-۱- ریخت‌شناسی، قطر الیاف و تخلخل فیلتر

همانطور که از تصاویر مندرج در جدول ۱ مشخص است، بهترین ویژگی‌های ریخت‌شناسی (شامل توزیع یکنواخت لیف، عدم ایجاد برجستگی و دانه در لیف و عدم وجود

جدول ۱: آنالیز شیمیایی (XRF) پودر استفاده شده.

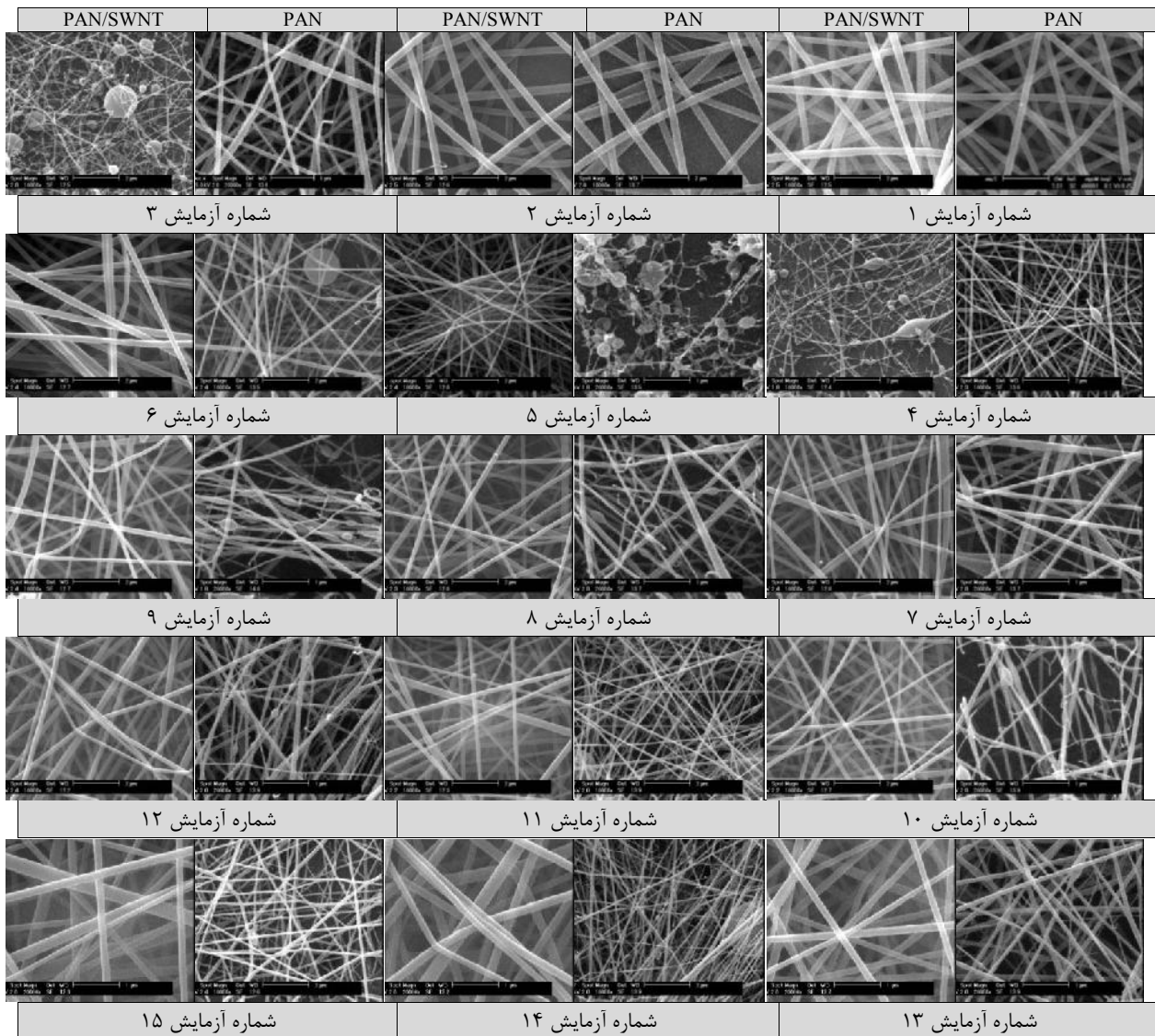
PAN/SWNT		PAN		پارامترهای الکتروریسی			شماره آزمایش
درصد تخلخل	متوسط قطر الیاف (نانومتر)	درصد تخلخل	متوسط قطر الیاف (نانومتر)	فاصله (در گستره ۱۵-۱۰ cm)	ولتاژ (در گستره ۲۰-۱۰ kV)	غلظت (در گستره ۱۶-۸ wt.%)	
۵۳/۸۳	۲۹۴/۵	۵۱/۲۸	۳۱۴/۲۹	۱۰	۲۰	۱۶	۱
۳۶/۳۷	۲۶۱/۵۳	۴۸/۶۵	۳۰۰	۱۵	۱۰	۱۶	۲
۴۰/۸۸	۴۷/۴۹	۴۳/۷	۷۹/۲۳	۱۵	۲۰	۸	۳
۳۳/۲۸	۵۹/۲۲	۳۶/۵۵	۵۶/۰۴	۱۰	۱۰	۸	۴
۳۵/۲۴	۸۴/۹۲	۵۱/۵۹	۲۷/۷۸	۱۲/۵	۱۵	۹/۶	۵
۳۶/۸۲	۲۴۳/۹۵	۳۸/۹۶	۸۸/۴۴	۱۲/۵	۱۵	۱۴/۴	۶
۴۰/۳۲	۱۵۳/۰۴	۳۵/۰۱	۸۱/۳۲	۱۲/۵	۱۲	۱۲	۷
۴۱/۱۰	۱۴۴/۴۴	۵۱/۱۳	۸۰/۲۲	۱۲/۵	۱۸	۱۲	۸
۳۸/۹۶	۱۵۰/۵۵	۳۳/۶۵	۷۵/۶۹	۱۱	۱۵	۱۲	۹
۴۹/۶۷	۱۱۴/۷۵	۴۹/۳۴	۶۷/۰۳	۱۴	۱۵	۱۲	۱۰
۴۲/۸۸	۱۳۴/۴۳	۴۸/۹۸	۹۷/۸۴	۱۲/۵	۱۵	۱۲	۱۱
۴۱/۰۵	۱۶۷/۲۱	۴۶/۲۹	۷۵/۲۷	۱۲/۵	۱۵	۱۲	۱۲
۴۱/۹۲	۱۳۶/۵۲	۴۵/۹۵	۹۱/۵	۱۲/۵	۱۵	۱۲	۱۳
۳۸/۲۱	۱۵۲/۷۴	۴۱/۲۹	۸۵/۱۲	۱۲/۵	۱۵	۱۲	۱۴
۴۳/۲۵	۱۰۲/۶۵	۴۶/۱۵	۱۰۲/۳۲	۱۲/۵	۱۵	۱۲	۱۵

نتوانست باعث افزایش تخلخل مدیای پلی پروپیلن فومرات شود [۴۲]. شکرگذار و همکاران (۲۰۱۱) در تولید نانوالیاف کیتوسان/پلی وینیل الکل تقویت شده با نانولوله کربنی تک‌جداره به این نتیجه رسیدند که افزودن SWNT می‌تواند تخلخل غشاء حاصله را نسبت به نانوالیاف چیتوسان/پلی وینیل الکل افزایش دهد [۴۳]. حضور SWNT می‌تواند هدایت‌پذیری الکتریکی محلول الکتروریسی را افزایش دهد و در نتیجه آرایش غشاء را از طریق آرایش کارآمد نانوآرایه‌ها بهبود بخشد. افزودن SWNT می‌تواند منجر به افزایش تعداد اتصالات شده، در نتیجه حفرات بزرگ تبدیل به حفره‌های کوچکتر گردیده و پورسایز غشاء کاهش می‌یابد [۴۳].

نتایج مطالعه حاضر نشان داد که رابطه آماری معنی‌داری بین درصد تخلخل و میانگین قطر هر دو نوع الیاف PAN و PAN/SWNT وجود ندارد ($p\text{-value} > 0.05$). با این حال همبستگی ضعیف منفی بین میزان تخلخل و قطر الیاف PAN ($r = -0.23$) و همبستگی ضعیف مثبت بین درصد

(Heikkila) و همکاران (۲۰۰۹) دریافتند با افزودن نانولوله کربنی به پلیمر PAN در محلول الکتروریسی، قطر الیاف افزایش می‌یابد که این می‌تواند ناشی از افزایش ویسکوزیته محلول الکتروریسی ناشی از افزودن نانولوله کربنی باشد [۴۱].

در بین ترکیب آزمایشات مختلف، بالاترین درصد تخلخل برای الیاف PAN، ۵۱/۲۸٪ (در صورتیکه از نتایج آزمایش شماره ۵ که در آن گره‌ها محصول اصلی الکتروریسی هستند، صرف نظر شود) و برای الیاف PAN/SWNT، ۵۳/۸۳٪ هر دو در آزمایش استاندارد شماره ۱ (غلظت محلول ۱۶ wt.%، ولتاژ ۲۰ kV و فاصله ۱۰ cm) بدست آمد. بطور میانگین درصد تخلخل مدیاهای تولید شده از الیاف PAN/SWNT (۴۱٪) نسبت به الیاف PAN (۴۴/۵٪) کمتر بود و اختلاف میانگین معنی‌داری بین تخلخل آنها ($p\text{-value} < 0.047$) مشاهده شد. این نتیجه با یافته‌های مطالعه شی (Shi) و همکاران (۲۰۰۷) همسو می‌باشد که افزودن نانولوله کربنی بطور معنی‌داری



شکل ۱: تصاویر SEM در اجراهای آزمایشی مختلف.

۳-۲- اثر اصلی و تعاملی پارامترهای الکتروریسی بر درصد تخلخل فیلترها

جدول ۲ اثر انفرادی هر یک از پارامترهای الکتروریسی را بر متغیرهای مورد بررسی نشان می‌دهد، در حالیکه دو پارامتر دیگر ثابت فرض می‌شود. همانطور که در جدول ۲ نیز مشخص است، در بین متغیرهای الکتروریسی مورد بررسی، ولتاژ دستگاه بیشترین تاثیر را بر میزان تخلخل برای هر دو نوع الیاف PAN و PAN/SWNT داشت (به ترتیب، $I=0/39$ و $I=0/6$). رابطه بین غلظت محلول الکتروریسی و درصد تخلخل برای هر دو نوع الیاف، مستقیم و ضعیف و رابطه بین فاصله الکتروریسی با میزان تخلخل الیاف PAN، مستقیم و

تخلخل و قطر الیاف PAN/SWNT ($I=0/104$) یافت شد. باقرزاده و همکاران (۲۰۱۲) نشان دادند که غلظت‌های پایین‌تر محلول الکتروریسی پلی کپرو لاکتون منجر به کاهش قطر الیاف، افزایش حجم کلی لیف و بنابراین کاهش درصد تخلخل می‌شود [۴۴]. از طرفی بیان می‌شود درصد تخلخل می‌تواند تحت تاثیر قطر الیاف قرار گیرد، بطوریکه تعداد حفره‌ها یا فضاهای خالی یک مدیا تابعی از عکس توان چهار قطر الیاف آن است [۳].

با این حال رابطه درصد تخلخل و قطر الیاف یک فیلتر می‌تواند بسته به روش اندازه‌گیری تخلخل، نوع الیاف و مدیا متفاوت باشد.

جدول ۳ نتایج آنالیز واریانس برای مدل درجه دوم درصد تخلخل الیاف PAN/SWNT را ارائه می‌دهد. همان‌طور که از جدول ۳ مشخص است، در مدل درجه دوم پیشنهادی برای نحوه تاثیر پارامترهای الکتروریسی بر درصد تخلخل الیاف PAN/SWNT، فاکتورهای A، B، BC، B² از نظر آماری معنی‌دار نبوده بنابراین از مدل حذف گردیده‌اند. زمانی که p-value مدل کمتر از ۰/۰۵ باشد نشانگر آن است که با ضریب اطمینان ۹۵٪ پارامترهای مدل از نظر آماری معنی‌دار است. مقادیر lack of fit وقتی از نظر آماری معنی‌دار نیست نشان می‌دهد مدل ایجاد شده معتبر است [۵۰]. رابطه ریاضی موجود بین درصد تخلخل الیاف PAN و متغیرهای الکتروریسی در معادله ۲ آورده شده است.

$$\begin{aligned} \text{Porosity} = & +11.12 - 25.3 \times \text{Concentration} + 10.96 \\ & \times \text{Voltage} + 10.57 \times \text{Distance} + 0.59 \times \text{Concentration} \\ & \times \text{Voltage} + 1.09 \times \text{Concentration} \times \text{Distance} - 1.23 \times \\ & \text{Voltage} \times \text{Distance} \end{aligned} \quad (2)$$

شکل ۲ پلات سطحی سه بعدی از تاثیر دو به دو متغیرهای الکتروریسی مورد نظر بر درصد تخلخل الیاف PAN/SWNT را در صورتیکه متغیر سوم ثابت فرض شود، به نمایش گذاشته است. شکل خمیده بدست آمده مویدی بر مدل درجه دوم پیشنهاد شده می‌باشد. همان‌طور که مشخص است (شکل ۲c) در فاصله الکتروریسی مشخص، با افزایش ولتاژ و غلظت محلول الکتروریسی درصد تخلخل الیاف PAN/SWNT افزایش می‌یابد. این در حالی است که وقتی غلظت محلول ثابت در نظر گرفته می‌شود (شکل ۲a) با افزایش ولتاژ و فاصله الکتروریسی درصد تخلخل الیاف PAN/SWNT افزایش می‌یابد. در حالی است که وقتی ولتاژ و فاصله الکتروریسی ثابت نگه داشته می‌شود (شکل ۲b)، کاهش غلظت بیشتر خواهد شد (شکل ۲b). درصد تخلخل الیاف PAN در فاصله الکتروریسی مشخص، با افزایش ولتاژ و کاهش غلظت به صورت خطی افزایش می‌یابد. زمانی که غلظت محلول ثابت در نظر گرفته می‌شود، درصد تخلخل با افزایش ولتاژ و فاصله الکتروریسی اضافه می‌شود. وقتی ولتاژ دستگاه ثابت نگه داشته می‌شود با افزایش فاصله و کاهش غلظت، میزان

ضعیف و با درصد تخلخل الیاف PAN/SWNT معکوس و ناچیز تعیین گردید. زیاباری و همکاران (۲۰۰۸) اثر پارامترهای الکتروریسی را بر ساختار منفذی نانوالیاف پلی وینیل الکل بررسی کردند و دریافتند که با افزایش ولتاژ وقتی غلظت محلول در مقدار مشخصی ثابت است، درصد تخلخل افزایش می‌یابد [۴۵].

جدول ۲: ضریب همبستگی بین پارامترهای الکتروریسی و تخلخل فیلتر و متوسط قطر الیاف.

پارامتر الکتروریسی	الیاف PAN		الیاف PAN/SWNT	
	تخلخل	قطر	تخلخل	قطر
غلظت محلول	۰/۲۴	۰/۷۷*	۰/۳۹	۰/۹۵*
ولتاژ دستگاه	۰/۳۹	۰/۰۵	۰/۶*	۰/۰۲
فاصله الکتروریسی	۰/۲۹	۰/۰۰۶	-۰/۰۸	-۰/۱۲

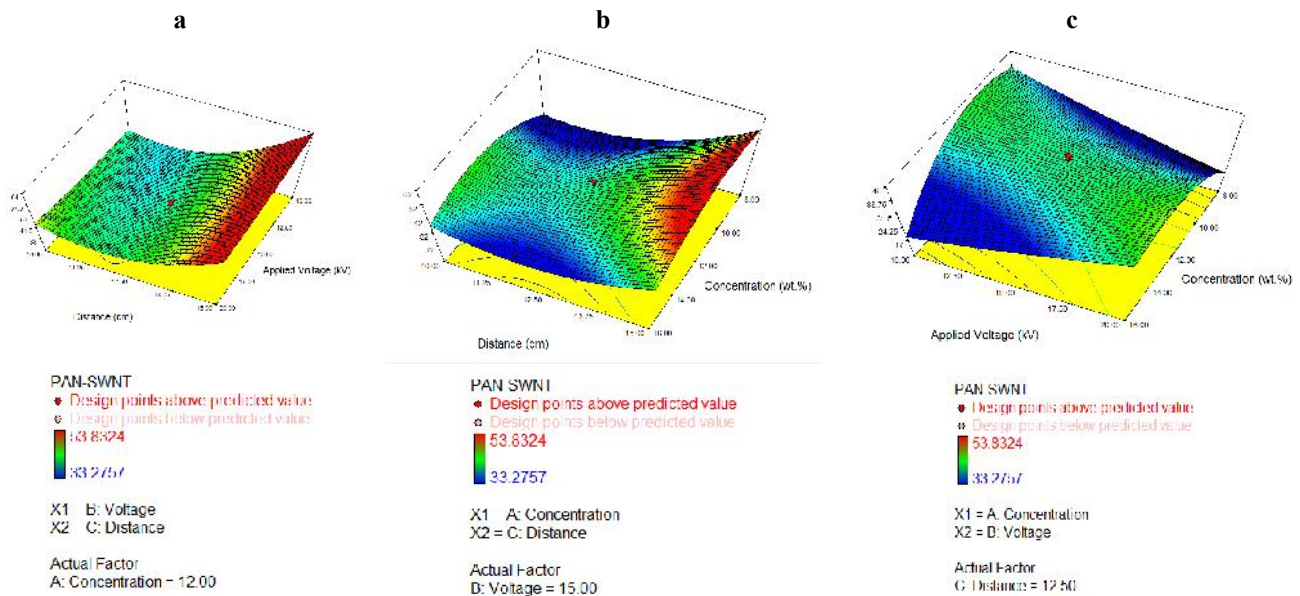
* رابطه در سطح ۰/۰۵ معنی‌دار است.

در مورد قطر هر دو نوع الیاف، بزرگترین ضریب همبستگی با غلظت محلول الکتروریسی به دست آمد (به ترتیب، $r=0.77$ و $r=0.95$). رابطه بین ولتاژ دستگاه و میانگین قطر برای هر دو نوع الیاف، مستقیم و ناچیز و رابطه بین فاصله الکتروریسی با میانگین قطر الیاف PAN، مستقیم و ضعیف و با میانگین قطر الیاف PAN/SWNT، معکوس و ضعیف تعیین گردید. در بسیاری از مطالعات دیگر، ثابت شده است که اثر غلظت محلول بر قطر الیاف بعلا تغییر ویسکوزیته محلول و کشیدگی جت پلیمر بارزتر از سایر پارامترهای دیگر است [۴۹-۴۶].

بررسی اثر تعاملی پارامترهای الکتروریسی بر درصد تخلخل، با تجزیه و تحلیل ANOVA و روش تناسب مدل صورت گرفت و پارامترهایی که از نظر آماری معنی‌دار نبودند در مدل وارد نشدند. نرم‌افزار DX یک مدل ارتباط دو عاملی (۲FI) برای رابطه بین تخلخل مدیاهای PAN و متغیرهای مورد بررسی الکتروریسی و همچنین یک مدل درجه دوم برای نوع رابطه میزان تخلخل مدیاهای PAN/SWNT و متغیرهای ورودی پیشنهاد نمود. همچنین یک مدل درجه دوم برای رابطه بین قطر الیاف PAN و پارامترهای الکتروریسی و یک مدل خطی برای قطر الیاف PAN/SWNT بدست آمد.

جدول ۳: مدل ریاضی موجود بین متغیرهای الکترونیسی به منظور پیش‌بینی درصد تخلخل الیاف PAN/SWNT.

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value		Final Equation in term of significant factors
Model	373.70	9	41.52	10.57	0.0091	Significant	Porosity = +145.9 - 30.64 C + 0.56 AB - 0.56 AC - 0.74 A ² + 1.76 C ²
A- Concentration	1.25	1	1.25	0.32	0.5965		
B-Voltage	0.30	1	0.30	0.08	0.7919		
C-Distance	57.31	1	57.31	14.59	0.0124		
AB	79.10	1	79.10	20.14	0.0065		
AC	19.24	1	19.24	4.90	0.0778		
BC	4.42	1	4.42	1.13	0.3372		
A ²	54.83	1	54.83	13.96	0.0135		
B ²	0.41	1	0.41	0.10	0.7604		
C ²	46.67	1	46.67	11.88	0.0183		
Residual	19.64	5	3.93				
Lack of Fit	3.48	1	3.48	0.86	0.4	Not significant	
Pure Error	16.16	4	4.04				
Cor Total	393.34	14					



شکل ۲: تصویر سه بعدی از تاثیر دو به دو پارامترهای الکترونیسی بر درصد تخلخل الیاف PAN/SWNT (a) فاصله و ولتاژ، (b) فاصله و غلظت و (c) ولتاژ و غلظت.

مورد بررسی نتایج گاه متفاوتی را نشان داده‌اند. بررسی نفوذپذیری هوا نانومدیاهای پلی آکریلو نیتریل توسط

تخلخل بیشتر خواهد شد. مطالعات بسته به نوع پلیمر مورد استفاده، روش تعیین تخلخل و پارامتر الکترونیسی

الکتروروسی بود. اثر تعاملی فاکتورهای عملیاتی الکتروروسی بر میزان تخلخل بسته به نوع الیاف متفاوت بود، ولی بطور کلی با افزایش غلظت و ولتاژ دستگاه درصد تخلخل افزایش می‌یافت. رابطه ضعیف منفی بین میزان تخلخل و قطر الیاف PAN و رابطه ضعیف مثبت بین درصد تخلخل و قطر الیاف PAN/SWNT دیده شد یعنی با افزایش قطر الیاف PAN/SWNT و کاهش قطر الیاف PAN درصد تخلخل افزایش یافت، البته در این خصوص شرایط فرآیند الکتروروسی می‌تواند تاثیرگذار باشد. اگر چه در مجموع میانگین درصد تخلخل الیاف PAN/SWNT نسبت به مدیاهای PAN کمتر و قطر الیاف آن بیشتر بود ولی بسته به شرایط الکتروروسی حالت عکس اتفاق می‌افتاد، بنابراین انتخاب درست شرایط عملیاتی فرآیند الکتروروسی می‌تواند در رسیدن به شرایط دلخواه بسیار تعیین کننده باشد. با توجه به خواص ویژه نانولوله‌های کربنی و اهمیت بکارگیری آن در مبحث فیلتراسیون، امید است نتایج حاصله از این مدل‌های تجربی ارائه شده، راهنمایی برای بهینه‌سازی شرایط الکتروروسی جهت تولید فیلترهای نانولیفی هیبریدی با فاکتور کیفیت بالا (کارایی جمع‌آوری زیاد و افت فشار کم) باشد.

سپاسگزاری

این مقاله حاصل بخشی از طرح تحقیقاتی مصوب دانشگاه علوم پزشکی و خدمات بهداشتی درمانی تهران (کد ۲۱۸۰-۲۷-۰۱-۹۲) می‌باشد که با حمایت دانشگاه علوم پزشکی و خدمات بهداشتی درمانی تهران اجرا شده است. نویسندگان بر خود لازم می‌دانند از حمایت‌های مالی مجتمع صنعتی بعثت و از همکاری صمیمانه شرکت فن‌آوران نانومقیاس در انجام امور الکتروروسی تشکر بعمل آورند.

مراجع

- [1] N. Wang, X. Mao, S. Zhang, J. Yu, B. Ding, "Electrospun nanofibers for air filtration *Electrospun Nanofibers for Energy and Environmental Applications*", Springer, Berlin, 2014.
- [2] Q. Wang, "An Investigation of Aerosol Filtration via Fibrous Filters", ProQuest, Michigan, 2007.
- [3] D. Purchas, K. Sutherland, "Handbook of Filter Media", Elsevier, Amsterdam, 2002.
- [4] X. Wang, B. Ding, G. Sun, M. Wang, J. Yu, *Progress in Materials Science*, **58(8)**, 2013, 1173.

ابوزاده (Abuzade) و همکاران (۲۰۱۲) نشان داد که غلظت‌های بالاتر پلیمر در ولتاژ و فاصله ثابت منجر به افزایش تخلخل و نفوذپذیری بیشتر به ازای وزن واحد مدیا می‌شود [۵۱]. زیابری (Ziabari) و همکاران (۲۰۰۸) دریافتند که با افزایش ولتاژ و فاصله در غلظت ثابت، درصد تخلخل نانوالیاف پلی وینیل الکل افزایش می‌یابد [۴۵]. اثر دو به دو پارامترهای الکتروروسی بر درصد قطر الیاف PAN/SWNT با توجه به مدل خطی دست آمده مفهومی نخواهد داشت. قطر الیاف PAN نیز در فاصله الکتروروسی ثابت، با کاهش غلظت و ولتاژ کمتر می‌شود. در غلظت ثابت، قطر الیاف PAN با کاهش ولتاژ و فاصله الکتروروسی کاهش می‌یابد. در ولتاژ دستگاه ثابت با کاهش فاصله و کاهش غلظت، قطر الیاف کمتر خواهد شد. طبق مطالعات گذشته، الیاف قطورتر با افزایش غلظت محلول الکتروروسی در هر ولتاژی حاصل خواهد شد [۵۲، ۱۰] و از طرفی افزایش ولتاژ می‌تواند بر شدت میدان الکتریکی افزوده و نیروهای دافعه اعمالی بر جت پلیمر را افزایش و منجر به کاهش قطر الیاف گردد [۵۳، ۱۶، ۱۰]. تحقیقات نشان داده است با افزایش فاصله الکتروروسی فرصت تبخیر بیشتری به حلال داده می‌شود و قطر الیاف کاهش می‌یابد، اگر چه در این مطالعه رابطه مثبت ضعیفی بین قطر و فاصله بدست آمد [۵۴، ۱۶، ۱۰]. با توجه به مطالعات بسیار اندک در خصوص بهینه‌سازی پارامترهای الکتروروسی الیاف PAN/SWNT برای افزایش میزان تخلخل و کاهش قطر الیاف و دستیابی به ریخت شناسی مناسب، قطعاً امکان مقایسه و نتیجه‌گیری قطعی مشکل خواهد بود.

۴- نتیجه‌گیری

مطالعه حاضر با هدف بررسی اثر نانولوله کربنی تک‌جداره بر میزان تخلخل فیلترهای نانولیفی بی‌بافت پلیمری انجام شد. طبق یافته‌های حاصله، در بیشتر ترکیب‌های آزمایشی، اضافه کردن SWNT باعث بهبود خواص ریخت‌شناسی الیاف گردید، اگرچه در غلظت‌های پایین الیاف PAN/SWNT نسبت به الیاف PAN دارای گره خوردگی زیادتر و فاقد پیوستگی لازم بودند. تاثیرگذارترین پارامتر الکتروروسی بر درصد تخلخل و قطر الیاف فیلترهای حاصله به ترتیب ولتاژ دستگاه و غلظت محلول

- [30] H.G. Chae, T. Sreekumar, T. Uchida, S. Kumar, *Polymer*, **46(24)**, 2005, 10925.
- [31] D.J. Schiffrman, M. Elimelech, *ACS applied materials & interfaces*, **3(2)**, 2011, 462.
- [32] L. Dumece, L. Velleman, K. Sears, M. Hill, J. Schutz, N. Finn, *Membranes*, **1(1)**, 2010, 25.
- [33] K. Nasouri, H. Bahrambeygi, A. Rabbi, A.M. Shoushtari, *Journal of Applied Polymer Science*, **126(1)**, 2012, 127.
- [34] F. Ko, Y. Gogotsi, A. Ali, N. Naguib, H. Ye, G. Yang, *Advanced Materials*, **15(14)**, 2003, 1161.
- [35] S. Deshpande, A. Kulkarni, S. Sampath, H. Herman, *Surface and coatings technology*, **187(1)**, 2004, 6.
- [36] L. Ghasemi-Mobarakeh, D. Semnani, M. Morshed, *Journal of Applied Polymer Science*, **106(4)**, 2007, 2536.
- [37] M. Chowdhury, G. Stylios, *International Journal of Basic and Applied Sciences*, **10(6)**, 2010, 70.
- [38] K.M. Pilehrood, P. Heikkila, A. Harlin, *AUTEX Research Journal*, **12(1)**, 2012, 1.
- [39] X. Hou, X. Yang, L. Zhang, E. Waclawik, S. Wu, *Materials and Design*, **31(4)**, 2010, 1726.
- [40] O. Meincke, D. Kaempfer, H. Weickmann, C. Friedrich, M. Vathauer, H. Warth, *Polymer*, **45(3)**, 2004, 739.
- [41] P. Heikkila, A. Harlin, *Express Polymer Letters*, **3(7)**, 2009, 437.
- [42] X. Shi, B. Sitharaman, Q.P. Pham, F. Liang, K. Wu, W. Edward Billups, *Biomaterials*, **28(28)**, 2007, 4078.
- [43] M.A. Shokrgozar, F. Mottaghitalab, V. Mottaghitalab, *Journal of Biomedical Nanotechnology*, **7(2)**, 2011, 276.
- [44] R. Bagherzadeh, M. Latifi, S.S. Najari, L. Kong, *Journal of Biomedical Materials Research Part A*, **101(3)**, 2013, 765.
- [45] M. Ziabari, V. Mottaghitalab, A.K. Haghi, *Korean Journal of Chemical Engineering*, **25(4)**, 2008, 923.
- [46] S. Wong, "An Investigation of Process Parameters to Optimize the Fiber Diameter of Electrospun Vascular Scaffolds through Experimental Design", PhD dissertation, ENGR 462, 2010.
- [47] N. Amiralayan, M. Nouri, M.H. Kish, *Fibers and Polymers*, **10(2)**, 2009, 167.
- [48] S. Sukigara, M. Gandhi, J. Ayutsede, M. Micklus, F. Ko, *Polymer*, **44(19)**, 2003, 5721.
- [49] S. Sukigara, M. Gandhi, J. Ayutsede, M. Micklus, F. Ko, *Polymer*, **45(11)**, 2004, 3701.
- [50] G. Ramakrishna, M. Susmita, *Research Journal of Chemical Sciences*, **2(2)**, 2012, 40.
- [51] A.R. Abuzade, A. Zadhoush, A.A. Gharehaghaji, *Journal of Applied Polymer Science*, **126(1)**, 2012, 232.
- [52] S. Zhang, J. Kim, *Materials & Design*, **30(9)**, 2009, 3659.
- [53] M. Ziabari, V. Mottaghitalab, A. Haghi, "In Nanofibers: Fabrication, Performance, and Applications", Nova Science Publishers, USA, 2009.
- [54] S. Ramakrishna, K. Fujihara, W.E. Teo, T.C. Lim, Z. Ma, "An Introduction to Electrospinning and Nanofibers", World Scientific, Singapore, 2005.
- [5] L. Shi, X. Zhuang, X. Tao, B. Cheng, W. Kang, *Fibers and Polymers*, **14(9)**, 2013, 1485.
- [6] H.S. Huang, C.W. Chen, Y.M. Kuo, C.Y. Lai, R. McKay, C.C. Chen, *Aerosol and Air Quality Research*, **13(1)**, 2013, 162.
- [7] J. Li, F. Gao, L. Liu, Z. Zhang, *Polymer Letters*, **7(8)**, 2013, 683.
- [8] J. Swanson, W. Watts, D. Kittelson, R. Newman, R. Ziebarth, *Aerosol Science and Technology*, **47(4)**, 2013, 452.
- [9] X. Wang, K. Kim, C. Lee, J. Kim, *Fibers and polymers*, **9(1)**, 2008, 34.
- [10] M. Hasanzadeh, B. Hadavi Moghadam, M. Moghadam Abatari, A. Haghi, *Bulg Chem Commun*, **45**, 2013, 78.
- [11] W. Han, D. Nurwaha, C. Li, X. Wang, *Polymer Engineering & Science*, **45(1)**, 2013, 189.
- [12] S. Gu, J. Ren, G. Vancso, *European Polymer Journal*, **41(11)**, 2005, 2559.
- [13] A.A. Nada, R. James, N.B. Shelke, M.D. Harmon, H.M. Awad, R.K. Nagarale, *Polymers for Advanced Technologies*, **25(5)**, 2014, 507.
- [14] Z. Li, C. Wang, "Effects of Working Parameters on Electrospinning One-Dimensional Nanostructures", Springer, Berlin, 2013.
- [15] W.E. Teo, R. Inai, S. Ramakrishna, *Science and Technology of Advanced Materials*, **12(1)**, 2011, 013002.
- [16] C. Zhang, X. Yuan, L. Wu, Y. Han, J. Sheng, *European Polymer Journal*, **41(3)**, 2005, 423.
- [17] M. Dhanalakshmi, A.K. Lele, J.P. Jog, *Materials Today Communications*, **3**, 2015, 141.
- [18] S.K. Nataraj, K.S. Yang, T.M. Aminabhavi, *Progress in Polymer Science*, **37**, 2012, 487.
- [19] N.R. Barhate, S. Ramakrishna, *Journal of Membrane Science*, **296**, 2007, 1.
- [20] Q. Zhang, J. Welch, H. Park, C.Y. Wu, W. Sigmund, J. Marijnissen, *Journal of Aerosol Science*, **41**, 2010, 230.
- [21] L. Zhang, A. Aboagye, A. Kelkar, C. Lai, H. Fong, *Journal of Materials Science*, **49(2)**, 2014, 463.
- [22] C.D. Saquing, J.L. Manasco, S.A. Khan, *Small*, **5**, 2009, 944.
- [23] H.S. Wang, G.D. Fu, X.S. Li, *Recent Patents on Nanotechnology*, **3(1)**, 2009, 21.
- [24] S. Dadvar, H. Tavanai, M. Morshed, M. Ghiaci, *Separation and Purification Technology*, **114(9)**, 2013, 24.
- [25] M. Horie, K. Fujita, H. Kato, S. Endoh, K. Nishio, L.K. Komaba, *Metallomics*, **4(4)**, 2012, 350-60.
- [26] J. Song, H. Kang, C. Lee, S.H. Hwang, J. Jang, *ACS Applied Materials and Interfaces*, **4(1)**, 2011, 460.
- [27] E.C. Banks, R.G. Compton, *Analyst*, **131(1)**, 2006, 15.
- [28] A.G. Rivas, M.D. Rubianes, M.L. Pedano, N.F. Ferreyra, G.L. Luque, *Electroanalysis*, **19(8)**, 2007, 823.
- [29] F.K. Ko, S. Khan, N. Naguib, G. Yang, "Structure and Properties of Carbon Nanotube Reinforced Nanocomposites", Proceedings of the 43rd Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, Denver, Colorado, April 2002.