



Available online: <http://ijhe.tums.ac.ir>

مقاله پژوهشی

توسعه فیلتر مدیاهای نانولیفی حاوی نانوذرات برای حذف ذرات از جریان گازی

سمیه فرهنگ دهقان^۱، بزرگمهر مداح^۲، فریده گلبابایی^{۳*}

- ۱- دانشجوی دکتری، گروه بهداشت حرفه ای، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی تهران، تهران، ایران
- ۲- دانشیار، گروه شیمی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه امام حسین، تهران، ایران
- ۳- (نویسنده مسئول): استاد، گروه بهداشت حرفه ای، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی تهران، تهران، ایران.

چکیده

اطلاعات مقاله:

زمینه و هدف: مطالعه حاضر سعی در توسعه فیلترهای نانولیفی حاوی نانوذرات اکسیدمنیزیم به منظور کاربرد آتی در حذف ذرات را از جریان گازی دارد.

تاریخ دریافت: ۹۴/۰۶/۲۵

تاریخ پذیرش: ۹۴/۰۹/۲۲

روش بررسی: ساخت نانوالیاف به روش الکترووریسی منطبق با طرح آزمایش تهیه شده توسط روش سطح پاسخ انجام گرفت. بهینه‌سازی پارامترهای الکترووریسی برای رسیدن به ویژگی‌های فیلتر شامل قطر الیاف، تخلخل فیلتر و تعداد گره انجام شد. بعد از تهیه تصاویر میکروسکوپی، تعیین قطر الیاف و تعداد گره توسط نرم‌افزار پردازش تصویر و محاسبه درصد تخلخل با کمک نرم افزار مت لب صورت گرفت. فیلترمدیای نهایی مبتنی بر شرایط بهینه الکترووریسی تولید و آزمون عملکرد فیلتر هپا برای آن صورت گرفت.

واژگان کلیدی: فیلتر نانولیفی، الکترووریسی، فیلتر هپا، کارایی، افت فشار

یافته‌ها: از نظر ویژگی‌های ریخت شناسی مثل پیوستگی الیاف، عدم وجود شاخه‌های اضافی و تعداد کم‌تر گره و برجستگی، آزمایش شماره ۲ (غلظت: ۱۶ wt%، ولتاژ: ۱۰kV، فاصله: ۱۵cm) بهترین شرایط را دارا بود. در این شماره آزمایش، بالاترین قطر الیاف نیز دیده شد. در بین پارامترهای الکترووریسی، بالاترین ضریب همبستگی بین غلظت محلول و متغیرهای پاسخ دیده شد و این رابطه برای قطر الیاف و درصد تخلخل از نظر آماری معنی دار تعیین گردید (به ترتیب $P < 0.05$ و $P < 0.01$). رابطه مثبت و ضعیفی بین قطر الیاف تولیدی و درصد تخلخل مدیا ($P > 0.05$, $r=0.29$) و رابطه منفی و ضعیفی بین قطر الیاف و تعداد گره حاصله ($P > 0.05$, $r=-0.2$) یافت شد.

پست الکترونیکی نویسنده مسئول:

fgolbabaei@sina.tums.ac.ir

نتیجه‌گیری: غلظت محلول به عنوان تاثیرگذارترین پارامتر الکترووریسی بر ویژگی‌های فیلتر شناخته شد، که با افزایش آن تعداد گره شکل‌گرفته در الیاف کمتر ولی الیافی با قطر بزرگتر تولید شدند. با افزایش قطر الیاف، اندازه حفرات فیلتر و درصد تخلخل افزوده گردید. مدل‌های ریاضی دو جمله‌ای بین متغیرهای مورد بررسی یافت شد. کارایی فیلتر بهینه شده قابل مقایسه با فیلترهای هپا بوده، و از افت فشار کمتری نیز برخوردار بود.

مقدمه

روش فیلتراسیون در شرایط کنونی آلودگی محیط زیست، به خصوص آلودگی آب و هوا، به عنوان یک روش کارا در حذف آلودگی بسیار مورد استقبال قرار گرفته است. در صنایع نیز، تجهیزات فیلتراسیون با کارایی بالا تحت عنوان فناوری‌های پاک به شدت مورد نیاز بوده و لزوم توسعه و ارزیابی فیلترمدیاهایی با عملکرد بالا روز به روز بیشتر احساس می‌شود (۱-۳). در میان همه تجهیزات جداکننده ذرات ریز از جریان گازی، فیلترهای لیفی به طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرند (۴). این فیلترها مقرون به صرفه بوده و به آسانی نیز عمل می‌نمایند. با بکارگیری فیلترهای لیفی بویژه نوع بی‌بافت آن، امکان حذف ذرات خیلی ریز (نانومتری) با کارایی بالا و افت فشار نسبتاً پایین وجود دارد (۵). عملکرد این فیلترها معمولاً از طریق کارایی فیلتراسیون، افت فشار و طول عمرشان مشخص می‌گردد که همگی به شدت به ساختار فیلتر مرتبط می‌شوند. کارایی جمع آوری کلی یک فیلتر مطابق فرمول ۱ محاسبه می‌گردد:

$$\eta = 1 - \exp\left[\frac{-4\alpha EL}{\pi d_p(1-\alpha)}\right] \quad (1)$$

که در آن دانسیته فشردگی فیلتر (بدون واحد)، E کارایی کلی تک لیف (بدون واحد)، L ضخامت فیلتر (m) و d_p قطر لیف (m) است. همان طور که از فرمول نیز مشخص است قطر الیاف و تخلخل فیلتر (که یک منهای دانسیته فشردگی است) تعیین کننده کارایی جمع آوری فیلتر هستند (۲). معمولاً کارایی فیلتر با کاهش قطر و افزایش دانسیته فشردگی (کاهش تخلخل) افزایش می‌یابد، اگرچه در این شرایط افت فشار فیلتر نیز بیشتر می‌گردد و بر فاکتور کیفیت فیلتر (QF) که دربرگیرنده هر دو موضوع کارایی و افت فشار است، اثر منفی دارد. بنابراین در مطالعات فیلتراسیون، یافتن نقطه بهینه از نقطه نظر افزایش کارایی و کاهش افت فشار در نتیجه افزایش عملکرد و فاکتور کیفیت فیلتر، همیشه با چالش روبرو است (۶).

راه‌های مختلفی برای افزایش عملکرد فیلترهای لیفی وجود دارد مثل چین دادن سطح فیلتر که باعث افزایش سطح عملکردی فیلتر و کاهش افت فشار آن می‌شود (۷)، یا روش القاء شارژ الکتریکی به الیاف که مکانیسم چند منظوره حذف ذرات را فراهم می‌نماید (۸) و بالاخره استفاده از الیاف نانومتری که جذب کننده‌های خوبی برای ذرات محسوب می‌شوند (۹). فیلترهای نانولیفی که عمدتاً توسط روش الکتروریسی تولید می‌گردند در دهه اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. بحث پتانسیل کاربرد فیلترهای نانولیفی برای حذف ذرات بویژه از کار مطالعاتی Barhate و همکار (۲۰۰۷) قوت گرفت (۱۰). از آن به بعد، برخی از طرح‌های آزمایشگاهی به صورت تجاری درآمده و بسیاری نیز در حال توسعه هستند. نانوالیاف الکتروریسی شده دارای ظرفیت نگهداشت ذرات بالا، ساختارهای حفره‌ای با اندازه کوچک، نفوذ پذیری بالا، مساحت سطحی زیاد و وزن مبنای پایین هستند (۱۱). در تحقیقات Podgórski و همکاران (۲۰۰۶) از دو طریق آزمایشگاهی و تئوریک تأکید شد که در این فیلترها پارامتر "بافوذترین سایز ذره" (MPPS) به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد (۱۲). در مطالعه Podgórski و همکاران (۲۰۰۹) مشاهده شد که فاکتور کیفیت فیلترهای میکرولیفی توسط پوشش دهی با یک لایه نانوالیاف بهبود می‌یابد (۱۳). فیلترمدیاهای نانولیفی دارای کارایی فیلتراسیون بالا و قابل مقایسه با فیلترهای هپا (High Efficiency Particulate Air) هستند. فیلترهای هپا متشکل از الیاف فایبرگلاس در رنج سایزی ۰/۵ تا $2 \mu m$ ، کاربردهای فراوانی در زمینه‌های پزشکی و فرایندهای الکتریکی و صنعتی داشته و کارایی آنها برای حذف ذرات $0.3 \mu m$ (300 nm) حدود ۹۹/۹۷٪ تعیین شده است (۱۴). Ahn و همکاران با موفقیت فیلترمدیاهای متشکل از الیاف الکتروریسی شده نایلون ۶ با قطر بین ۸۰ تا 200 nm ، در وزن‌های مبنای مختلف ساختند. آنها نشان دادند که بر اساس وزن مبنای بین ۵/۷۵ تا $10/75 \text{ gsm}$ می‌تواند فیلترمدیاهای با کارایی گیراندازی و نفوذ پذیری هوا و قابل مقایسه با فیلترهای

هیا تولید کنند (۱۵).

در روش الکتروریسی برای تولید نانوالیاف یک میدان الکتریکی قوی بین نوک سوزن حاوی محلول الکتروریسی و صفحه جمع آوری نانوالیاف ایجاد می شود و محلول (جت پلیمری) به محض خروج از سوزن تحت تاثیر این میدان قرار گرفته و به سمت صفحه با بار مخالف کشیده می شود. در این حین، حلال تبخیر شده و الیاف شکل می گیرند. خصوصیات و کیفیت الیاف شکل گرفته به شدت تحت تاثیر پارامترهای عملیاتی دستگاه مثل شدت میدان الکتریکی و فاصله سوزن تا صفحه و ویژگی های محلول الکتروریسی مثل غلظت و گرانی (ویسکوزیته) قرار دارد (۱۶). تعداد زیادی از تحقیقات با هدف درک اثر پارامترهای فرایند الکتروریسی مانند نوع پلیمر و گرانی محلول بر روی ریخت شناسی (مورفولوژی) نانوالیاف الکتروریسی شده صورت گرفته است. یک مقاله مروری توسط Subbiah و همکاران جزئیات زیادی را در مورد این ویژگی ها مطرح کرد، به خصوص در مورد میانگین قطر الیاف الکتروریسی شده که از ترکیبات مختلف پلیمر / حلال به وجود آمده بودند (۱۷).

امروزه در تحقیقات، به منظور اثربخشی بیشتر فیلترهای نانولیفی، استفاده از نانوالیاف ترکیبی (۱۸)، اصلاح سطح فیلتر (۱۹) و بکارگیری فیلترهای چندلایه میکرو و نانولیفی (۴) مورد توجه قرار دارد. مطالعات نشان داده اند که افزودن مواد آلی یا غیر آلی مانند نانوذرات در محلول الکتروریسی می تواند اجازه تولید نانوالیاف هیبریدی با قابلیت های عملیاتی ویژه را فراهم آورد (۲۰). در مبحث فیلتراسیون، انتخاب کاتالیست مناسب اضافه شده به الیاف پلیمری می تواند علاوه بر امکان حذف فیزیکی ذرات، اجازه جذب سطحی یا عمقی را نیز فراهم آورد (۲۱) و به فیلتر خاصیت ضد میکروبی که یکی از خصوصیات مهم در سیستم های تهویه مطبوع و صنعتی محسوب می شود، نیز ببخشد (۲۲). اثرات جذبی و ضد میکروبی نانوذرات اکسیدمنیزیم (MgO) در مطالعات بسیاری نشان داده شده است (۲۳، ۲۴)، ضمن آنکه دیده شده است

افزودن نانوذرات MgO در محلول پلیمری می تواند باعث افزایش مقاوت مکانیکی غشاء و تولید حفره های ریز با اندازه نانو در مدیا گردد (۲۵). در مطالعه ای توسط Sun، ترکیبی از خواص جذب و اکسیداتیو پارچه های بافته شده معمولی پنبه / پلی استر آغشته شده با نانو ذرات MgO و همچنین الیاف ترکیبی پلی آکریلونیتریل و دی اکسیدتیتانیوم الکتروریسی شده بررسی گردید. هر دو ماده قابلیت مناسبی را در حذف سمومی مثل Aldicarb از خود نشان دادند. آن ها در تحقیق خود به این نتیجه نایل شدند که اکسیدهای فلزی خواص ضد عفونی در سطح پارچه و همچنین در الیاف هیبریدی اکسید فلزی نشان می دهند، در نتیجه آن ها قابلیت کاربرد را در لباس های حفاظتی و بهبود کیفیت هوای داخل دارا هستند (۲۶).

با اینکه فناوری الکتروریسی با ظهور فرایندهای هم-محوری، کنار به کنار و سه محوری به سرعت در حال پیشرفت است، اما جریان اصلی این فناوری هنوز هم الکتروریسی تک-ماتریس از یک محلول کار حاوی یک ماده عملکردی مهمان و ماتریس پلیمری میزبان شکل دهنده الیاف است. بنابراین مطالعه حاضر سعی در توسعه فیلترمدیاهای نانولیفی الکتروریسی شده حاوی پلیمر پلی آکریلونیتریل (به عنوان ماتریس پلیمری) نانوذرات اکسید منیزیم (به عنوان یک ماده عملکردی با اثرات جذبی و ضد میکروبی) به منظور کاربرد آتی در حذف ذرات با اندازه نانو از جریان گازی را دارد. از اینرو ساخت نانوالیاف پلی آکریلونیتریل (PAN) حاوی نانوذرات اکسیدمنیزیم (MgO) به روش الکتروریسی و بهینه سازی پارامترهای آن برای رسیدن به ویژگی های مدنظر از فیلتر مثل کیفیت و قطر الیاف و تخلخل مدیا مد نظر قرار گرفت. در نهایت نیز مقایسه عملکردی بین فیلتر ساخته شده طبق شرایط بهینه از پارامترهای الکتروریسی و فیلتر هیا از نقطه نظر کارایی و افت فشار صورت گرفت. ضمنا این مطالعه اهدافی چون:

۱. تعیین شرایط بهینه متغیرهای الکتروریسی به منظور کسب مقدار دلخواه از ویژگی های فیلتر، ۲. بررسی کمی رابطه ای بین پارامترهای الکتروریسی و ویژگی های مورد نظر فیلتر، ۳. ارائه

- آماده سازی محلول

پلیمر پلی آکریلونیتریل ($MW = 80,000 \text{ g/mol}$) از شرکت پلی آکریل اصفهان و حلال ۹۹٪ NN-دی متیل فراماید (DMF) ($MW = 73/1 \text{ g/mol}$) از شرکت مرک آلمان خریداری گردید. نانوذرات MgO ۹۹٪ از شرکت مرک آلمان PAN/MgO ($MW = 40/3 \text{ g/mol}$) خریداری شد. محلول PAN/MgO به نسبت ۳:۱ در حلال DMF آماده گردید (۲۸). محلول حاوی نانو ذرات برای ۲۰ h توسط همزن مغناطیسی صفحه-داغ (Heidolph: MR Hei-Standard) به منظور به دست آوردن محلول همگن در دمای اتاق هم زده شد (۲۹). سپس به منظور رسیدن به یک پراکندگی بهینه برای الکتروریسی به مدت ۲ h در حمام اولتراسونیک (Sono Swiss: SW 6H) قرار داده شد (۳۰).

- تولید مدیا

فیلترمدیاهای نانولیفی پلی آکریلونیتریل/اکسید منیزیم توسط فرایند الکتروریسی با دستگاه تجاری الکتروریسی (شرکت فناوران نانو مقیاس، ایران) در این شرایط تولید شدند: غلظت محلول بین ۱۶-۸ wt٪، ولتاژ کاربردی ۱۰-۲۰ kV، فاصله سوزن تا صفحه جمع آوری کننده ۱۵-۱۰ cm، دما 30°C ، مدت زمان ۵ min، صفحه جمع آوری پوشیده شده با فویل آلومینیوم، نرخ تزریق ۱ mL/h و سرنگ ۵ mL (قطر سوزن: شماره ۱۸).

- تعیین ویژگی مدیاهای حاصله

با کمک تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM, Hitachi S 4160) و نرم افزار پردازش تصویر (Ferdowsy Microstructure Measurement University, Iran)، مطالعات ریخت شناسی فیلترها و قطر الیاف تولیدی صورت گرفت. برای هر آزمایش، متوسط قطر الیاف با حدود ۵۰ اندازه گیری از الیاف تصادفی تعیین شد. جهت بررسی خصوصیات ریخت شناسی الیاف، تعداد تقریبی

مدل ریاضی بین متغیرها، تجزیه و تحلیل اثرات مستقیم و تداخلی پارامترهای الکتروریسی بر ویژگی های مد نظر فیلتر را نیز دنبال می نماید.

مواد و روش ها

بهینه سازی پارامترهای الکتروریسی برای رسیدن به مقادیر دلخواه از ویژگی های مدنظر فیلتر با تهیه طرح آزمایش و تجزیه و تحلیل نتایج حاصله توسط نرم افزار Design Expert (Version 7, Stat-Ease, Minneapolis) از طریق روش سطح پاسخ (RSM) صورت گرفت. در این طرح آزمایش، پارامترهای غلظت محلول، ولتاژ دستگاه و فاصله سوزن تزریق تا جمع آوری کننده به عنوان متغیرهای ورودی و پارامترهای تخلخل مدیا، قطر الیاف و تعداد گره به عنوان متغیر پاسخ در نظر گرفته شد. تعیین سطوح بهینه پارامترهای عملیاتی در پروسه های شیمیایی از طریق روش های سنتی کاری زمان بر و نیازمند انجام تعداد بی شماری آزمایش است. ضمن آنکه در روش های سنتی، اثرات ترکیبی همه فاکتورهای موثر بر متغیر پاسخ مد نظر گرفته نمی شود. تکنیک RSM آمیخته ای از روش های آماری و ریاضی است و برای شرایطی مناسب است که چندین پارامتر عملیاتی مستقل بر یک متغیر پاسخ تاثیرگذار است و معمولاً با کمک آن، ارزش یابی میزان اهمیت فاکتورهای موثر بر متغیر پاسخ با تهیه یک طرح آزمایش کوچک امکان پذیر است (۲۷).

در طرح حاضر، قبل از تهیه طرح آزمایش ابتدا محدوده عملیاتی برای هر متغیر مورد بررسی در الکتروریسی تعیین شد. این مقادیر مرزی از طریق مطالعات مقدماتی به منظور شکل گیری الیاف پیوسته و بدون شکستگی الیاف و تشکیل قطرات، و همچنین بر اساس شرایط عملیاتی دستگاه الکتروریسی مورد استفاده مشخص گردیدند. طرح آزمایش تهیه شده، شامل ۱۵ اجرای آزمایشی بود که طی انجام آن ها پارامترهای الکتروریسی در مقادیر مشخصی تنظیم شدند (جدول ۱). بعد از تهیه طرح آزمایش، مراحل آزمایش به ترتیب زیر بود:

بی‌بافت پلی‌پروپیلن اسپان‌باند (شرکت بافتینه، ایران) با وزن مبنای ۱۸ gsm و ضخامت ۱۰۰ μm بود. آزمون عملکرد فیلتر هپا توسط دستگاه (DOP Step Aerosol Photometer) SOLUTIONS LTD, UK و آزمون افت فشار توسط Pressure Drop Test Setup Penetrometer (مجمع صنعتی بعثت قم، ایران) مبتنی بر استاندارد MIL-STD-282 (۳۴) انجام شد.

دستگاه Step Aerosol Photometer می‌تواند به طور پیوسته ذرات مونودیسپرس ۳۰۰ nm دی اکتیل فتالات (DOP) در رنج غلظتی ۰/۰۰۰۰۱ تا ۱۰۰ μg/L با هواگذر ۲۸ L/min تولید نماید. این دستگاه مجهز به پروب اسکن کننده‌ای است که بر روی سطح فیلتر مورد نظر قرار می‌گیرد. این فتومتر می‌تواند به صورت قرائت مستقیم غلظت ذرات را قبل و بعد از فیلتر اندازه گرفته و کارایی جمع آوری آن یا درصد نفوذش را تعیین نماید. جهت قبولی در آزمون عملکرد فیلترهپا، کارایی جمع آوری فیلتر مورد نظر باید بیش از ۹۹/۹۷۵٪ یا میزان نفوذ آن کمتر از ۰/۰۲۵٪ باشد (۳۵).

قبل از آزمون ذره، آزمون افت فشار با عبور جریان هوا در هواگذر اسمی معین از مدیای مورد نظر انجام شد. دستگاه اندازه‌گیری افت فشار از طریق یک پمپ استخراجی عمل نموده و با وسایل اندازه‌گیری و تنظیم هواگذر تکمیل می‌شود (۳۶).

یافته‌ها

جدول ۱، طرح آزمایش مورد استفاده برای پارامترهای الکتروریسی و نتایج ارزیابی متغیرهای پاسخ را شرح می‌دهد. همان‌طور که مشخص است ۱۵ مرحله آزمایش انجام گردیده است که در هر اجرا، مقادیر پارامترهای الکتروریسی و نتایج ارزیابی‌های ساختاری مدیا و ریخت‌شناسی الیاف حاصله بیان شده است. تصاویر SEM مدیاهای تولیدی در شکل ۱ به نمایش گذاشته شده است. از نظر ویژگی‌های ریخت‌شناسی مثل پیوستگی الیاف، عدم وجود شاخه‌های اضافی و تعداد کم تر گره و برجستگی، آزمایش شماره ۲ بهترین شرایط را

گره از طریق شمارش تعداد آن در تصاویر SEM (مقیاس تصویر: ۶۲۵ X) تعیین گردید. برای محاسبه درصد تخلخل فیلترها، الگوریتم‌های تجزیه و تحلیل تصاویر SEM از طریق نرم افزار MATLAB (MathWorks, Version 7) مورد استفاده قرار گرفت (۳۱). در این روش، تصاویر سیاه و سفید (باینری) تهیه و یک آستانه ثابتی برای بخش‌بندی تصاویر در نظر گرفته می‌شود. همه پیکسل‌های بزرگتر و مساوی آستانه، به شیء و بقیه به زمینه نسبت داده می‌شوند. درصد تخلخل با استفاده از میانگین شدت تصاویر به صورت زیر محاسبه می‌گردد:

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

در این رابطه n تعداد پیکسل‌های سفید و N تعداد کل پیکسل‌های موجود در تصویر و P درصد تخلخل است (۳۲، ۳۳).

- تجزیه و تحلیل آماری

تجزیه و تحلیل آماری نتایج نیز با استفاده از نرم افزار Design-Expert و تجزیه و تحلیل واریانس (ANOVA) انجام شد. ارائه مدل ریاضی چندجمله‌ای برای متغیرهای مورد بررسی الکتروریسی به منظور پیش‌بینی متغیرهای پاسخ مد نظر، تعیین شرایط بهینه متغیرهای آزمایش جهت بیشینه یا کمینه کردن مقدار متغیرهای پاسخ، و تجزیه و تحلیل اثرات مستقیم و تداخل بین پارامترها با کمک این نرم افزار صورت گرفت.

- آزمون عملکرد فیلتر

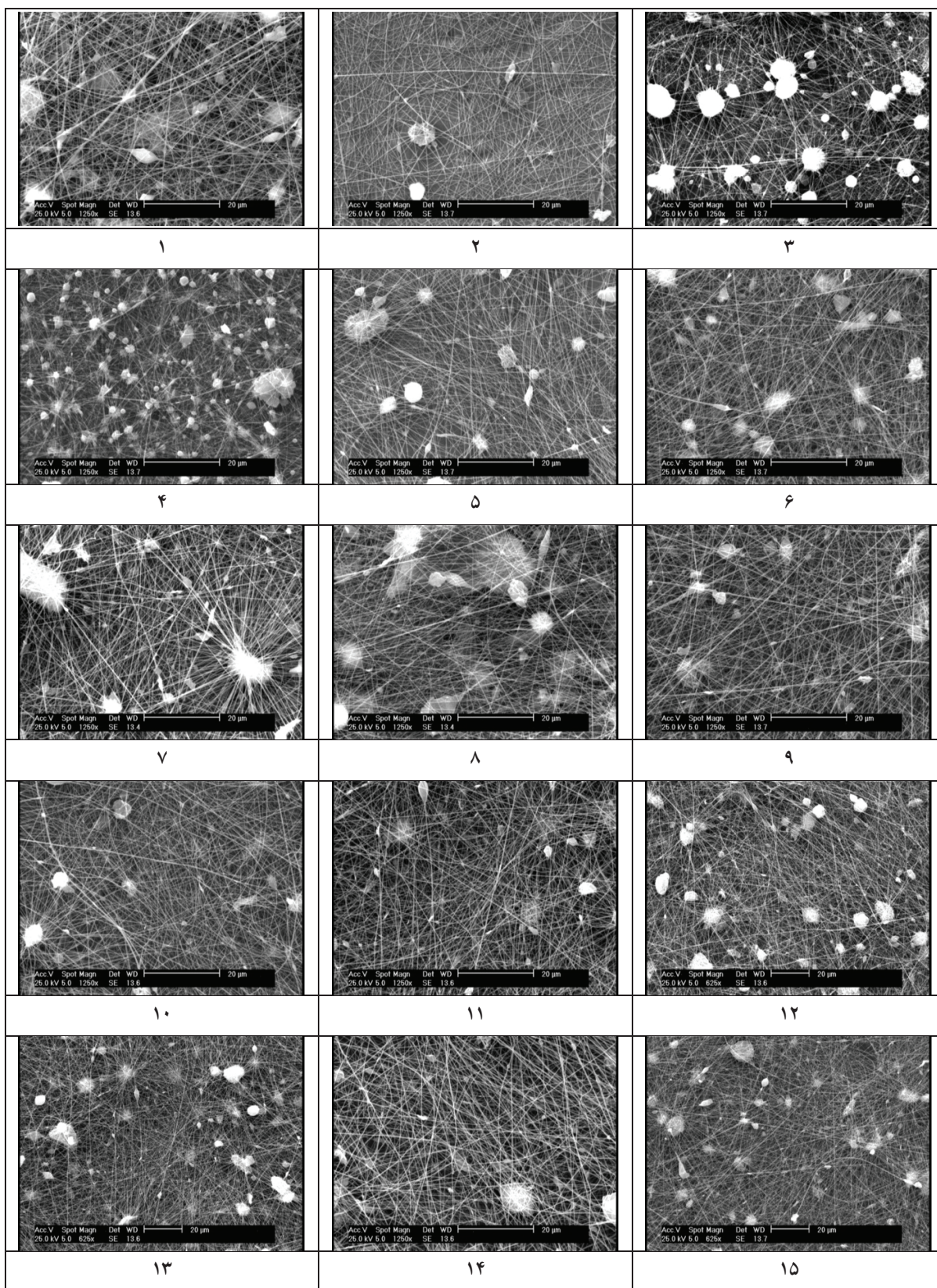
بعد از انتخاب شرایط بهینه الکتروریسی مبتنی بر موارد دلخواه از ویژگی‌های فیلتر (کیفیت و قطر الیاف و تخلخل)، فیلترمدیای نهایی بر روی بستر مناسب تولید شد. از آنجایی که نانوالیاف پلیمری تولید شده توسط الکتروریسی نرم بوده و به راحتی می‌تواند با تماس ملایم آسیب ببیند، از این رو، نانوالیاف به‌ندرت به‌تنهایی به عنوان فیلتر هوا استفاده می‌شوند و معمولاً روی یک بستر بی‌بافت نشانده می‌شوند. بستر انتخابی، صفحه

نسبت به سایرین در حد بالایی است. در این آزمایش حداکثر تخلخل مدیا در حداکثر مقدار غلظت مورد بررسی، حداکثر ولتاژ کاربردی و حداقل فاصله الکترورسی حاصل شده است.

داراست. در این شماره آزمایش، بالاترین قطر الیاف نیز دیده می‌شود. بیشترین درصد تخلخل در آزمایش شماره ۱ بدست آمد، یعنی در آزمایشی که در آن تعداد تقریبی گره نسبت به سایر اجراها در حد متوسط و متوسط قطر الیاف آن نیز

جدول ۱- طرح آزمایش و نتایج ارزیابی متغیرهای پاسخ

شماره آزمایش	متغیرهای الکترورسی			متغیرهای پاسخ	
	غلظت (در گستره ۸-۱۶ wt%)	ولتاژ (در گستره ۱۰-۲۰ kV)	فاصله (در گستره ۱۰-۱۵ cm)	متوسط قطر الیاف (nm)	تخلخل (%) (تعداد تقریبی گره (مقیاس تصویر: ۶۲۵ X))
۱	۱۶	۲۰	۱۰	۲۶۳/۳۳	۵۷/۸۷
۲	۱۶	۱۰	۱۵	۳۱۳/۵۸	۴۰/۰۳
۳	۸	۲۰	۱۵	۶۹/۰۵	۲۹/۴۶
۴	۸	۱۰	۱۰	۴۶/۴۵	۳۶/۵۳
۵	۹/۶	۱۵	۱۲/۵	۲۷/۷۸	۳۸/۱۵
۶	۱۴/۴	۱۵	۱۲/۵	۱۱۳/۴	۴۴/۷۳
۷	۱۲	۱۲	۱۲/۵	۱۰۵/۵	۳۷/۴۹
۸	۱۲	۱۸	۱۲/۵	۴۵/۴	۴۳/۲۵
۹	۱۲	۱۵	۱۱	۴۳/۰۲	۵۱/۱۷
۱۰	۱۲	۱۵	۱۴	۹۸/۵	۴۸/۰۹
۱۱	۱۲	۱۵	۱۲/۵	۵۴/۸	۴۳/۰۵
۱۲	۱۲	۱۵	۱۲/۵	۶۸/۱	۴۵/۶۹
۱۳	۱۲	۱۵	۱۲/۵	۸۴/۴	۴۴/۲۳
۱۴	۱۲	۱۵	۱۲/۵	۷۲/۴	۴۶/۱۲
۱۵	۱۲	۱۵	۱۲/۵	۵۲/۲۳	۴۲/۴



شکل ۱- تصاویر SEM در اجراهای آزمایشی مختلف

تعیین گردید (به ترتیب $P < 0/05$ و $P < 0/01$). رابطه مثبت و ضعیفی بین قطر الیاف تولیدی و درصد تخلخل مدیا ($r=0/29$) و رابطه منفی و ضعیفی بین قطر الیاف و تعداد گره حاصله ($r=-0/2$) یافت شد.

ضرایب همبستگی پارامترهای الکتروریسی مورد بررسی و مشخصه‌های مورد نظر فیلتر مدیا در جدول ۲ لیست شده است. در بین پارامترهای الکتروریسی، بالاترین ضریب همبستگی بین غلظت محلول و متغیرهای پاسخ دیده شد و این رابطه برای قطر الیاف و درصد تخلخل از نظر آماری معنی دار

جدول ۲- ضریب همبستگی بین پارامترهای الکتروریسی و متغیرهای پاسخ

متغیرهای پاسخ			پارامتر الکتروریسی
تعداد گره	تخلخل	قطر	
-0/6	0/66**	0/77*	غلظت محلول
-0/29	0/26	-0/09	ولتاژ دستگاه
-0/33	-0/49	0/16	فاصله الکتروریسی
متغیرهای پاسخ			پارامتر الکتروریسی
تعداد گره	تخلخل	قطر	
-0/2	0/29	-	قطر
-0/45	-	0/29	تخلخل
-	-0/45	-0/2	تعداد گره

*رابطه در سطح 0/05 معنی دار است
**رابطه در سطح 0/01 معنی دار است

که از نظر آماری معنی دار نبودند در مدل وارد نشدند. آزمون تناسب مدل با کمک نرم افزار DX انجام شد و بدین ترتیب مشخص گردید مدل درجه دوم برای هر سه متغیر پاسخ حکم فرماست.

به منظور در نظر گرفتن اثرات تعاملی (تداخلی) و همزمان پارامترهای الکتروریسی بر مشخصه‌های مورد بررسی فیلتر، تجزیه و تحلیل‌های واریانس (ANOVA) صورت گرفت و مدل‌های ریاضی موجود تعیین شد (جدول ۳). فاکتورهای

جدول ۳- مدل ریاضی موجود بین متغیرهای الکتروریسی به منظور پیش‌بینی متغیرهای پاسخ

معادله	نوع مدل	متغیر پاسخ
$\text{Diameter} = +219.34 + 2.92A^* - 37.35B^{**} - 6.64C^{***} - 4.32AC - 3.52BC + 1.18B^2$	درجه دوم	قطر (nm)
$\text{Porosity} = +264.79 + 7.5A + 14.05B - 0.48A^2 - 0.43B^2 + 2.4C^2$	درجه دوم	تخلخل (%)
$\text{Bead number} = +3105 + 2.02AB + 2.47AC + 4.49BC + 2.49B^2$	درجه دوم	تعداد گره

* A - غلظت
** B - ولتاژ
*** C - فاصله

رگراسیون و شرایط پیشنهادی نرم افزار با کمک آزمایشات عملی اعتبار سنجی شدند. نتایج آزمون ۳ شرایط پیشنهادی نرم افزار، حاکی از آن بود که اختلاف کمتر از ۱٪ بین مقادیر پیش بینی شده و مقادیر تجربی وجود دارد. در نهایت به منظور تست کارایی، فیلتری مشابه شرایط جدول ۴ آماده گردید. همان طور که در جدول ۴ نیز مشخص است، کارایی جمع آوری فیلتر ساخته شده برای حذف ذرات ۳۰۰ nm، قابل مقایسه با فیلترهای هپا بوده، ضمن اینکه از افت فشار کمتری نیز نسبت به فیلترهای معمول تجاری (با افت فشار ۳۰۰ pa در هواگذر ۲۰ L/min) برخوردار است.

بعد از کسب این نتایج، به منظور ساخت فیلتر نهایی بر مبنای شرایط بهینه الکترورسی از نقطه نظر دستیابی به مقادیر دلخواه از قطر، تخلخل و تعداد گره، بهینه سازی با کمک نرم افزار DX صورت گرفت. از آنجایی که هر کدام از این مشخصه های ساختاری فیلتر تاثیر مجزایی بر فاکتور کیفیت آن دارند، در دستور بهینه سازی نرم افزار، متغیرهای پاسخ به جای مقادیر کمینه یا بیشینه، در شرایط "در گستره" (In Range) تنظیم شدند. مجموعه از شرایط الکترورسی برای پارامترهای مورد بررسی به همراه مقادیر پیش بینی شده برای متغیرهای فیلتر، توسط نرم افزار پیشنهاد شد. معادلات

جدول ۴- نتایج آزمون عملکرد فیلتر هپا و افت فشار

کارایی جمع آوری در مقایسه با فیلتر هپا	افت فشار (pa)				شرایط الکترورسی	مدیا
	هواگذر: ۸۰ L/min	هواگذر: ۶۰ L/min	هواگذر: ۴۰ L/min	هواگذر: ۲۰ L/min		
قبول	۶۰۲	۴۴۰	۲۸۲	۱۳۲	غلظت: ۱۲ wt. % ولتاژ: ۱۵ kV فاصله: ۱۳ cm زمان: ۱۰ min	لایه نانولیفی (۱۰ عدد)
رد	۴۸	۳۱	۱۷	۷	-	بستر

افزایش غلظت محلول، تعداد گره شکل گرفته در الیاف نیز کم تر می شود. از طرفی گزارش شده است که با افزایش غلظت محلول به علت افزایش ویسکوزیته آن، میزان تحرک پذیری زنجیره های پلیمری کم تر شده و محلول پلیمری به میزان کم تری دچار کشش و پخش شدگی می گردد و در نتیجه آن، الیافی با قطر بزرگ تر تولید می شوند (۱۶). یعنی برای افزایش کارایی فیلتر از طریق کاهش قطر الیاف، ویژگی های ریخت شناسی الیاف می تواند دستخوش تغییر قرار گیرد. Gu و همکاران (۲۰۰۵) گزارش کردند که در غلظت های پایین تر، ضمن تشکیل گره های دوکی شکل بر روی الیاف، متوسط قطر الیاف نیز کاهش می یابد (۳۸). Tan و همکاران (۲۰۱۳) نیز در

بحث

طبق نتایج حاصله از شکل ۱ و جدول ۱، بهترین مدیا از نظر ویژگی های ریخت شناسی مثل پیوستگی الیاف، عدم وجود شاخه های اضافی و تعداد کمتر گره و برجستگی مربوط به اجرای آزمایش شماره ۲ است. گره و برجستگی معمولاً از تجمع مولکول های حلال در الیاف شکل می گیرد و دیده شده است در غلظت های بالاتر محلول الکترورسی، به علت افزایش درهم تنیدگی بیشتر زنجیره های پلیمری، پخش شدن مولکول های حلال در میان این زنجیره های درهم تنیده و تمایل بیشترشان برای جمع شدگی، حضور آن ها کم تر می گردد (۳۷). نتایج مطالعه حاضر نیز موید همین مطلب است که با

الکتروریسی همزمان پلی وینیل پیرولیدون و دی اکسید تیتانیوم (PVP/TiO₂) دریافتند که سائز الیاف با افزایش غلظت محلول الکتروریسی افزوده می گردد (۳۹)، که نتایج مطالعه حاضر در راستای یافته های قبلی است.

فانکتور تخلخل مدیاهای حاصله که پارامتر موثر بر افت فشار است، در آزمایش شماره ۱ بیشترین مقدار را بدست آورده است. در این باره می توان گفت قطر الیاف به عنوان مهمترین عامل تاثیرگذار بر شکل گیری ساختارهای حفره ای نقش خود را ایفا کرده است (۴۰)، یعنی با افزایش قطر الیاف، اندازه حفرات نیز بزرگ تر شده است. اگرچه سائز بزرگ حفرات اثر معکوس بر کارایی جمع آوری فیلتر دارد ولی در مقابل با افزایش دادن درصد تخلخل باعث کاهش افت فشار در فیلتر می گردد. Dadvar و همکاران (۲۰۱۲) دریافتند که با افزودن نانوذرات MgO به محلول PAN می تواند حجم کلی حفرات را نسبت به حالت مدیای فاقد MgO افزایش دهند (۴۱). رابطه بین درصد تخلخل مدیا و قطر الیاف در جدول ۲ آورده شده است. همان طور که دیده می شود یک رابطه مثبت نسبتا ضعیف که از نظر آماری نیز معنی دار نیست بین این دو حاکم است (Pearson $r=0.29$; $P > 0.05$, correlation; IBM SPSS Statistics 22) بطوری که مدیاهایی با درصد تخلخل بیشتر، الیاف قطورتری دارند. در مطالعه Kwon و همکاران (۲۰۰۵) نشان داده شد که با کاهش قطر الیاف الکتروریسی پلی ال لاکتید کوکاپرولاکتون درصد تخلخل حاصله از روش پروژیمتری نفوذ جیوه کاهش می یابد (۴۲). لازم به ذکر است روش مورد استفاده در این مطالعه برای تعیین درصد تخلخل، روش تجربه و تحلیل تصویر است که صرفا یک لایه سطحی از فیلتر را مورد بررسی قرار می دهد. با این حال در مطالعات گذشته همبستگی خوب نتایج حاصله از این روش ساده با روش های معمول و البته پیچیده و هزینه برتری مانند پروژیمتری که حجم کلی مدیا را بررسی می کند، به اثبات رسیده است (۳۲، ۳۳).

طبق جدول ۲، در بین پارامترهای الکتروریسی، بیشترین میزان

تاثیرگذاری بر مشخصه های ساختاری فیلتر مربوط به غلظت محلول الکتروریسی است که این رابطه مستقیم برای قطر الیاف و درصد تخلخل از نظر آماری معنی دار تعیین شد (به ترتیب $p < 0.05$ و $P < 0.01$). در واقع در غلظت های بالاتر با افزایش ویسکوزیته محلول، مقاومت جت پلیمری در مقابل کشیدگی و نازک تر شدن افزایش می یابد (۴۳). این یافته ها موافق با نتایج مطالعات گذشته بوده و نشان می دهد که غلظت محلول نقش به سزایی را در تعیین قطر الیاف و به تبع آن اندازه تخلخل ایفا می نماید (۱۶، ۴۴).

رابطه بین قطر الیاف و ولتاژ دستگاه معکوس و ضعیف بدست آمد. با افزایش ولتاژ دستگاه، توان میدان الکتریکی افزوده شده، بنابراین اعمال نیروهای دافعه الکترواستاتیکی بر جت پلیمری اضافه می شود و این باعث کشیدگی بیشتر و کوچک تر شدن قطر الیاف می گردد (۱۶). رابطه مستقیم و نسبتا ضعیف مشاهده شده بین قطر الیاف و فاصله الکتروریسی نشان می دهد با افزایش فاصله صفحه جمع آوری تا نوک سوزن حاوی محلول، زمان بیشتری برای تبخیر حلال به محلول پلیمری داده می شود و در نتیجه باعث کوچک تر شدن قطر الیاف می گردد (۴۵). به طور کلی، تاثیر ولتاژ و فاصله به اندازه غلظت محلول بر ویژگی های ساختاری فیلتر نیست (۴۶) و در ولتاژ و فاصله ثابت، پارامترهایی مثل قطر لیف، درصد تخلخل و تعداد گره به شدت تحت تاثیر غلظت محلول قرار می گیرند.

تعداد گره نیز با متغیر قطر الیاف و با نسبت بیشتر با متغیر درصد تخلخل همبستگی منفی نشان داد، به طوریکه با افزایش قطر الیاف مدیا و درصد تخلخل آن که هر دو در کاهش افت فشار و از طرفی کاهش راندمان جمع آوری موثر هستند (۶)، بهبود کیفیت ساختاری فیلتر از نقطه نظر کاهش تعداد برجستگی های دانه مانند در الیاف حاصل خواهد شد. مطالعات بیان گر آن است که حضور تعداد زیاد گره در الیاف می تواند با تاثیر بر دانسیته فشردگی فیلتر، باعث کاهش اندازه حفرات (پورسایز) و میزان تخلخل و در نتیجه کاهش نفوذپذیری سیال عبوری گردد (۴۷). با این حال، Yun و همکاران (۲۰۱۰)

میکرولیفی (به عنوان نگهدارنده) با یک لایه نانولیفی با متوسط قطر 150 nm ، بدین نتیجه رسیدند که با یک وزن مبنای مشابه فیلتر هپا می‌توان حتی به فاکتور کیفیت بهتری در حذف ذرات 300 nm دست یافت (۵۳). با توجه به قابلیت کاربرد فیلترهای نانولیفی در زمینه‌های مهمی از جمله صنایع هسته‌ای، خودروسازی، شیمیایی و پزشکی، توسعه آزمایشگاهی این فیلترها می‌تواند بسیار نوید بخش بوده و در صورت توسعه این فناوری از صرف هزینه جهت واردات فیلتر مدیاهای با کارایی بالا (هپا) ممانعت به عمل آورد.

نتیجه گیری

این پژوهش با هدف توسعه فیلتر مدیاهای نانولیفی حاوی نانوذرات برای حذف ذرات از جریان گازی، به دنبال ایجاد یک طرح پیش‌بینی کننده از حوزه‌های پارامترهای الکتروریسی برای رسیدن به مقادیر مطلوب از مشخصه‌های ساختاری فیلتر PAN-MgO مثل قطر الیاف و درصد تخلخل به عنوان عواملی موثر بر کارایی، افت فشار و فاکتور کیفیت فیلتر بود. نحوه تاثیرگذاری پارامترهای الکتروریسی بر مشخصات فیلتر توسط روش سطح پاسخ (RSM) انجام گرفت. ارزیابی‌های ریخت‌شناسی الیاف تولیدی نشان داد که غلظت محلول به عنوان شاخص‌ترین پارامتر الکتروریسی موثر بر ویژگی‌های فیلتر، می‌تواند تاثیر مستقیمی بر متغیرهای قطر و درصد تخلخل و تاثیر معکوس بر تعداد گره داشته باشد. پارامترهای قطر الیاف و درصد تخلخل همبستگی مثبتی با یکدیگر و رابطه منفی با تعداد گره داشتند. از آنجایی که متغیرهای قطر الیاف، تخلخل و تعداد گره هر یک می‌توانند تاثیر مجزا و بعضا معکوسی بر عملکرد فیلتر داشته باشند، انتخاب نقطه تعادل بین آن‌ها می‌تواند از جدی‌ترین مباحث مطرح شده باشد. به طور کلی روش سطح پاسخ به خوبی توانست روابط بین متغیرهای ورودی و پاسخ را تعیین نماید و فیلتر ساخته شده بر حسب شرایط پیشنهادی آن نیز توانست کارایی جمع آوری ذرات 300 nm و افت فشار قابل قبولی را در مقایسه فیلترهای هپای

دریافتند که فیلترهای PAN با نانوالیاف حاوی گره در مقایسه با الیاف فاقد گره دارای افت فشار کم‌تر و در نتیجه فاکتور کیفیت بالاتری هستند (۴۸). به علت کمبود مطالعات کافی در این زمینه، نتیجه گیری قطعی مشکل خواهد بود.

به‌هنگام در نظر گرفتن تاثیر همزمان متغیرهای الکتروریسی بر روی قطر الیاف (جدول ۳) مشخص گردید که همه این سه پارامتر و برخی از تعاملات (اینترکشن) آنها (AB, AC, BC, B^2) از نظر آمار تاثیر گذار هستند ($P < 0.05$). در مورد درصد تخلخل و تعداد گره، پارامترهای معنی‌دار کمتری وجود داشت. در مطالعه Hasanzadeh و همکاران (۲۰۱۳) نتیجه گرفته شد که یک مدل درجه دوم برای نحوه تاثیرگذاری پارامترهای الکتروریسی غلظت (X_1)، ولتاژ (X_2) و فاصله (X_3) بر روی قطر الیاف PAN الکتروریسی وجود دارد. با این حال صرفا پارامترهای $X_1, X_2, X_3, X_1^2, X_1X_2, X_1X_3$ و X_2^2 از نظر آماری معنی‌دار تعیین شدند ($P < 0.05$) (۱۶). میزان نفوذپذیری فیلترهای PAN الکتروریسی شده توسط Abuzade و همکاران (۲۰۱۲) مورد مطالعه قرار گرفت و مشخص گردید که غلظت‌های بالای محلول پلیمری در ولتاژ کاربردی و فاصله الکتروریسی ثابت، می‌تواند منجر به افزایش تخلخل و در نتیجه نفوذپذیری هوا گردد (۴۹). اختلافات مشاهده شده در مطالعات این چینی می‌تواند ناشی از تفاوت در خواص نوع پلیمر انتخابی (مانند رئولوژی، ویژگی‌های ترمودینامیک حلال)، پارامترهای عملیاتی دستگاه (مانند دبی تزریق، روش جمع آوری) و شرایط محیطی (مانند دما و رطوبت) باشد (۵۰).

طبق نتایج تست عملکرد فیلتر، فیلتر تولیدی بر اساس شرایط بهینه الکتروریسی توانست به خوبی آزمون هپا را گذرانیده و کارایی $99/97$ درصدی در حذف ذرات 300 nm آدی اکتیل فتالات (DOP) از خود نشان دهد. فیلترهای نانولیفی با توجه با قطر کوچک الیاف، پورسایز کوچک و تخلخل مناسب قابلیت به‌دام اندازی ذرات کوچک در حد نانومتر را دارند (۵۱، ۵۲). Wang و همکاران (۲۰۰۸) با ترکیب یک لایه

۲۷-۰۱-۹۲) است که با حمایت دانشگاه علوم پزشکی و خدمات بهداشتی درمانی تهران اجرا شده است. پژوهشگران بر خود لازم می‌دانند مراتب سپاس و امتنان خود را از مجتمع صنعتی بعثت قم بعثت همکاری صمیمانه در انجام تست فیلتر داشته و از شرکت فن آوران نانومقیاس بعثت مساعدت در انجام امور الکتروریسی تقدیر و تشکر بعمل آورند.

معمول تجاری به دست آورد. امید آن است که نتایج حاصله از این مطالعه راهنمایی برای مطالعات آتی تولید فیلترهای نانولیفی برای حذف نانوذرات از جریان گازی باشد.

تشکر و قدردانی

این مقاله حاصل بخشی از طرح تحقیقاتی مصوب دانشگاه علوم پزشکی و خدمات بهداشتی درمانی تهران (کد: ۲۱۸۰-)

منابع

- Alipour V, Rezaei L. Upgrading of the mono media filters in water treatment plants by changing filter media. *Iranian Journal of Health and Environment*. 2011;3(4):431-38 (in Persian).
- Jackiewicz A, Podgorski A, Gradon L, Michalski J. Nanostructured media to improve the performance of fibrous filters. *KONA Powder and Particle Journal*. 2013;30:244-55.
- Mortazavi B, Barikbin B, Moussavi GR. Survey of nano filtration performance for hexavalent chromium removal from water containing sulfate. *Iranian Journal of Health and Environment*. 2010;3(3):281-90 (in Persian).
- Wang C-S, Otani Y. Removal of nanoparticles from gas streams by fibrous filters: a review. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2012;52(1):5-17.
- Ding B, Yu J. *Electrospun Nanofibers for Energy and Environmental Applications*. Berlin: Springer; 2014.
- Huang S-H, Chen C-W, Kuo Y-M, Lai C-Y, McKay R, Chen C-C. Factors affecting filter penetration and quality factor of particulate respirators. *Aerosol and Air Quality Research*. 2013;13:162-71.
- Rebaï M, Prat M, Meireles M, Schmitz P, Baclet R. Clogging modeling in pleated filters for gas filtration. *Chemical Engineering Research and Design*. 2010;88(4):476-86.
- Chazelet S, Bemer D, Gripari F. Effect of the test aerosol charge on the penetration through electret filter. *Separation and Purification Technology*. 2011;79(3):352-56.
- Wang J, Kim SC, Pui DY. Figure of merit of composite filters with micrometer and nanometer fibers. *Aerosol Science and Technology*. 2008;42(9):722-28.
- Barhate R, Ramakrishna S. Nanofibrous filtering media: filtration problems and solutions from tiny materials. *Journal of Membrane Science*. 2007;296(1):1-8.
- Shi L, Zhuang X, Tao X, Cheng B, Kang W. Solution blowing nylon 6 nanofiber mats for air filtration. *Fibers and Polymers*. 2013;14(9):1485-90.

12. Podgórski A, Bałazy A, Gradoń L. Application of nanofibers to improve the filtration efficiency of the most penetrating aerosol particles in fibrous filters. *Chemical Engineering Science*. 2006;61(20):6804-15.
13. Podgórski A. Estimation of the upper limit of aerosol nanoparticles penetration through inhomogeneous fibrous filters. *Journal of Nanoparticle Research*. 2009;11(1):197-207.
14. Ingle PV, Chatap VK, Bhatia N. Design Considerations for Parenteral Production Facility. *International Journal of Pharmaceutical Sciences Review and Research*. 2014;3:15-28.
15. Ahn Y, Park S, Kim G, Hwang Y, Lee C, Shin H, et al. Development of high efficiency nanofilters made of nanofibers. *Current Applied Physics*. 2006;6(6):1030-35.
16. Hasanzadeh M, Hadavi Moghadam B, Moghadam Abatari M, Haghi A. On the production optimization of polyacrylonitrile electrospun nanofiber. *Bulgarian Chemical Communications*. 2013;45:178-90.
17. Subbiah T, Bhat G, Tock R, Parameswaran S, Ramkumar S. Electrospinning of nanofibers. *Journal of Applied Polymer Science*. 2005;96(2):557-69.
18. Pant HR, Bajgai MP, Nam KT, Seo YA, Pandeya DR, Hong ST, et al. Electrospun nylon-6 spider-net like nanofiber mat containing TiO₂ nanoparticles: a multifunctional nanocomposite textile material. *Journal of Hazardous Materials*. 2011;185(1):124-30.
19. Kayaci F, Aytac Z, Uyar T. Surface modification of electrospun polyester nanofibers with cyclodextrin polymer for the removal of phenanthrene from aqueous solution. *Journal of Hazardous Materials*. 2013;261:286-94.
20. Saquing CD, Manasco JL, Khan SA. Electrospun nanoparticle–nanofiber composites via a one-step synthesis. *Small*. 2009;5(8):944-51.
21. Dadvar S, Tavanai H, Morshed M, Ghiaci M. A study on the kinetics of 2-chloroethyl ethyl sulfide adsorption onto nanocomposite activated carbon nanofibers containing metal oxide nanoparticles. *Separation and Purification Technology*. 2013.
22. Song J, Kang H, Lee C, Hwang SH, Jang J. Aqueous synthesis of silver nanoparticle embedded cationic polymer nanofibers and their antibacterial activity. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2011;4(1):460-65.
23. Behnam R, Morshed M, Tavanai H, Ghiaci M. Destructive adsorption of diazinon pesticide by activated carbon nanofibers containing Al₂O₃ and MgO nanoparticles. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*. 2013;91(4):475-80.
24. Lange LE, Obendorf SK. Effect of plasma etching on destructive adsorption properties of polypropylene fibers containing magnesium oxide nanoparticles. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*. 2012;62(2):185-94.
25. Kim Y, Cho S, Lee S, Lee Y-S. Fabrication and characterization of porous non-woven carbon based highly sensitive gas sensors derived by magnesium oxide. *Carbon Letters*. 2012;13(4):254-59.
26. Obendorf SK, Sun G. Hybrid microporous membranes intended for protective clothing. USA: National Textile Center Research Briefs – Chemistry Competency; 2006 [cited 2014 Jun 25]. Available from: <http://www.ntcresearch.org/projectapp/?project=C05-CR01> NTC Project: C05-CR011: 2009.
27. Lenth RV. Response-Surface Methods in R, using rsm. *Journal of Statistical Software*. 2009;32(7):1-17.
28. Im J-S, Park S-J, Kim T, Lee Y-S. Hydrogen storage evaluation based on investigations of the catalytic properties of metal/metal oxides in electrospun carbon fibers. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2009;34(8):3382-88.
29. Nasouri K, Bahrambeygi H, Rabbi A, Shoushtari AM, Kaflou A. Modeling and optimization of electrospun PAN nanofiber diameter using response surface methodology and artificial neural networks. *Journal of Applied Polymer Science*. 2012;126(1):127-35.
30. Dadvar S, Tavanai H, Morshed M. UV-protection properties of electrospun polyacrylonitrile nanofibrous mats embedded with MgO and Al₂O₃ nanoparticles. *Journal of Nanoparticle Research*. 2011;13(10):5163-69.
31. Ziabari M, Mottaghitalab V, Haghi AK. Evaluation of electrospun nanofiber pore structure parameters. *Korean Journal of Chemical Engineering*.

- 2008;25(4):923-32.
32. Deshpande S, Kulkarni A, Sampath S, Herman H. Application of image analysis for characterization of porosity in thermal spray coatings and correlation with small angle neutron scattering. *Surface and Coatings Technology*. 2004;187(1):6-16.
 33. Ghasemi-Mobarakeh L, Semnani D, Morshed M. A novel method for porosity measurement of various surface layers of nanofibers mat using image analysis for tissue engineering applications. *Journal of Applied Polymer Science*. 2007;106(4):2536-42.
 34. Department of Defense. *Filter Units, Protective Clothing, Gas Mask Components and Related Products*. Washington DC: Department of Defense; 1956.
 35. British Standards Institution. *High efficiency air filters (EPA, HEPA and ULPA)-Part 1: Classification, performance testing, marking*. London: British Standards Institution; 2009.
 36. International Standard Organization. *Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular cross-section conduits running full — Part 1: General principles and requirements*. Geneva: International Standard Organization; 2003.
 37. Pilehrood MK, Heikkilä P, Harlin A. Preparation of carbon nanotube embedded in polyacrylonitrile (PAN) nanofiber composites by electrospinning process. *AUTEX Research Journal*. 2012;12(1):1-6.
 38. Gu S, Ren J, Vancso G. Process optimization and empirical modeling for electrospun polyacrylonitrile (PAN) nanofiber precursor of carbon nanofibers. *European Polymer Journal*. 2005;41(11):2559-68.
 39. Tan AW, Pinguan-Murphy B, Ahmad R, Akbar SA. Advances in fabrication of TiO₂ nanofiber/nanowire arrays toward the cellular response in biomedical implantations: a review. *Journal of Materials Science*. 2013;48(24):8337-53.
 40. Bagherzadeh R, Latifi M, Kong L. Three-dimensional pore structure analysis of polycaprolactone nano-microfibrous scaffolds using theoretical and experimental approaches. *Journal of Biomedical Materials Research, Part A*. 2014;102(3):903-10.
 41. Dadvar S, Tavanai H, Morshed M. Effect of embedding MgO and Al₂O₃ nanoparticles in the precursor on the pore characteristics of PAN based activated carbon nanofibers. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2012;98:98-105.
 42. Keun Kwon I, Kidoaki S, Matsuda T. Electrospun nano-to microfiber fabrics made of biodegradable copolyesters: structural characteristics, mechanical properties and cell adhesion potential. *Biomaterials*. 2005;26(18):3929-39.
 43. Wong S. *An investigation of process parameters to optimize the fiber diameter of electrospun vascular scaffolds through experimental design*. California: California Polytechnic State University; 2010.
 44. Amiraliyan N, Nouri M, Kish MH. Electrospinning of silk nanofibers. I. An investigation of nanofiber morphology and process optimization using response surface methodology. *Fibers and Polymers*. 2009;10(2):167-76.
 45. Li Z, Wang C. *One-Dimensional Nanostructures: Electrospinning Technique and Unique Nanofibers*. New York: Springer; 2013.
 46. Boland ED, Wnek GE, Simpson DG, Pawlowski KJ, Bowlin GL. Tailoring tissue engineering scaffolds using electrostatic processing techniques: a study of poly (glycolic acid) electrospinning. *Journal of Macromolecular Science, Part A*. 2001;38(12):1231-43.
 47. Kaur S, Gopal R, Ng WJ, Ramakrishna S, Matsuura T. Next-generation fibrous media for water treatment. *MRS Bulletin*. 2008;33(01):21-26.
 48. Yun KM, Suryamas AB, Iskandar F, Bao L, Niinuma H, Okuyama K. Morphology optimization of polymer nanofiber for applications in aerosol particle filtration. *Separation and Purification Technology*. 2010;75(3):340-45.
 49. Abuzade RA, Zadhoush A, Gharehaghaji AA. Air permeability of electrospun polyacrylonitrile nanoweb. *Journal of Applied Polymer Science*. 2012;126(1):232-43.
 50. Gu SY, Ren J. Process Optimization and empirical modeling for electrospun poly (D, L-lactide) fibers using response surface methodology. *Macromolecular materials and Engineering*. 2005;290(11):1097-105.
 51. Dehghan SF, Golbabaei F, Maddah B, Latifi M, Pezeshk H, M. H. Effect of single-walled carbon nanotubes on the porosity of nonwoven nanofiber filter media. *Nanomaterials*. 2015;22(7):75-85 (in Persian).

52. Dehghan SF, Golbabaei F, Maddah B, Yarahmadi R, Zadeh AS. Experimental investigations on electrospun mat production: For use in high-performance air filters. *International Journal of Occupational Hygiene*. 2015;7(3):110-18.
53. Wang J, Kim SC, Pui DY. Investigation of the figure of merit for filters with a single nanofiber layer on a substrate. *Journal of Aerosol Science*. 2008;39(4):323-34.



Available online: <http://ijhe.tums.ac.ir>

Original Article



The Development of Nanofibrous Media Filter Containing Nanoparticles for Removing Particles from Air Stream

S. Farhang Dehghan¹, B. Maddah², F. Golbabaie^{3*}

1- PhD Candidate, Department of Occupational Health, School of Public Health, Tehran University of Medical Sciences, Tehran, Iran.

2- Associate Professor, Department of Chemistry, Imam Hossein University, Tehran, Iran.

3- Professor, Department of Occupational Health, School of Public Health, Tehran University of Medical Sciences, Tehran, Iran.

ARTICLE INFORMATION:

Received: 16 September 2015;

Accepted: 13 December 2015

Key words: Nanofibrous Filter, Electrospinning, HEPA Filter, Efficiency, Pressure Drop

***Corresponding Author:**

fgolbabaie@sina.tums.ac.ir

Tel: +9821 88951390

Fax: +9821 88954781

ABSTRACT

Background and Objectives: The goal of the present study was to develop nanofibrous media filters containing MgO nanoparticles for future application in removing particles from gas stream.

Materials and Methods: Electrospun nanofibers were fabricated using experimental design prepared by Response Surface Methodology. Optimization of electrospinning parameters was conducted for achieving the desired filter properties including fiber diameter, porosity, and bead number. After taking SEM images, the determination of fiber diameter and number of beads were performed through Image Analysis and the calculation of porosity percent was performed by MATLAB. A filter media was produced based on the optimized conditions of electrospinning and it was certified by the HEPA filter performance test.

Results: In terms of morphological quality of fibers including fiber uniformity, absence of branching and lower numbers of beads, experiment standard No. 2 (STD 2: concentration 16 wt%, voltage 10 kV, and distance 15 cm) had the best combination. Maximum fiber diameter was also observed in STD 2. Among the electrospinning, the highest correlation coefficient was observed between solution concentration and response variables and the relationship between concentration and both fiber diameter and porosity percent was statistically significant ($p < 0.05$ and $p < 0.01$, respectively). A weak positive correlation was found between fiber diameter and porosity percent ($r = 0.29$, $p > 0.05$) and a weak negative relationship was seen between fiber diameter and bead number ($r = -0.2$, $p > 0.05$).

Conclusion: Solution concentration was found as the most affecting factor on the filter properties, so that the higher concentration led to the lower bead number and greater fiber diameter. Increase in fiber diameter resulted in larger pore size and higher porosity. Quadratic models were known for understudy variables. Efficiency of the optimized filter was comparable with the HEPA filter and it had the lower pressure drop.