

## امکان سنجی کاربرد نانوالیاف هیبریدی پردازش شده با پلازما برای حذف گاز تولوئن

سمیه فرهنگ دهقان<sup>۱</sup>، فریده گل بابایی<sup>۲\*</sup>، اصغر صدیق زاده<sup>۳</sup>، حمزه محمدی<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup> گروه بهداشت حرفه‌ای و ایمنی کار، مرکز تحقیقات ارتقاء سلامت محیط کار، دانشکده بهداشت و ایمنی، دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی، تهران، ایران

<sup>۲</sup> گروه بهداشت حرفه‌ای، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی تهران، تهران، ایران

<sup>۳</sup> مرکز تحقیقات گداخت هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی، تهران، ایران

<sup>۴</sup> دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی تهران، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۹۷/۵/۱۷، تاریخ پذیرش: ۹۷/۱۱/۲۴

### مکیده

**مقدمه:** با وجود اقبال روز افزون کاربرد فیلترهای نانولیفی برای تصفیه آلاینده‌های ذره‌ای از جریان هوا، مطالعات کم تری به بحث در خصوص امکان سنجی کاربرد آن‌ها در حذف آلاینده‌های گازی پرداخته است، در حالی که در اکثر محیط‌های کاری هر دو شکل آلاینده وجود دارد. تولوئن ماده‌ای سمی و موتازنیک می‌باشد و مواجهه مزمن با غلظت‌های پایین آن ممکن است باعث طیف وسیعی از اثرات سوء سلامتی بر افراد در معرض مواجهه شود. مطالعه حاضر با هدف تولید نانوالیاف پلیمری بر پایه نانولوله کربنی تک جداره از طریق روش الکترورسی و پردازش سطح آن با پلاسمای سرد و هم چنین ارزیابی عمل کرد آن در حذف گاز تولوئن انجام گرفت.

**روش کار:** لایه‌های نانولیفی توسط فرآیند الکترورسی از محلول الکترورسی شامل پلیمر پلی آکریلونیتریل (PAN) و نانولوله کربنی تک جداره (SWNT) به نسبت ترکیبی ۱:۹۹ تحت شرایط عملیاتی ولتاژ کاربردی: ۲۰ کیلوولت، فاصله سوزن تا صفحه جمع‌آوری کننده: ۱۰ سانتی متر، میزان تزریق: ۱ میلی لیتر بر ساعت، قطر سوزن: گیج ۱۸ و سرعت چرخش درام: ۱۰۰۰-۵۰۰ دور در دقیقه تولید شدند. سطح نانوالیاف تولیدی مورد پردازش پلازما قرار گرفتند. دستگاه پلاسمای مورد استفاده با منبع تغذیه فرکانس رادیویی (۱۳/۵۶ مگاهرتز با توان ۲۰ وات)، گاز تشکیل‌دهنده آرگون و فشار عملیاتی ۰/۲ بود. شرایط آزمون نمونه‌های تولیدی برای حذف گاز تولوئن مطابق استاندارد ISO 10121-1:2014 آماده گردید که روش آزمون عمل کرد مدیاهای تصفیه هوا نوع فاز گازی را برای انواع مدیاهای صفحه تخت ارائه می‌دهد. به منظور اندازه‌گیری غلظت بخار تولوئن از دستگاه قرائت مستقیم Firstcheck مجهز به دتکتور PID استفاده گردید. مطالعات ریخت شناسی الیاف با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی انجام شد. طیف سنجی مادون قرمز- تبدیل فوری (FTIR) به منظور شناسایی ترکیبات آلی و گروه‌های عاملی در نانوالیاف صورت گرفت.

**یافته‌ها:** نتایج حاصل از آنالیز تصاویر نشان داد که میانگین قطر الیاف  $169/16 \pm 7/19$  نانومتر و میانگین ضریب تغییرات آن ۰/۲۳ محاسبه گردید. ریخت شناسی الیاف، یکنواخت و دانه دار تعیین شد. میانگین ضخامت، درصد تخلخل و ضریب نفوذپذیری هوا مدیا به ترتیب ۰/۱۵ میلی متر، ۴۳ درصد و ۵/۷۵ داری مشخص گردید. میانگین درصد کارایی نانوالیاف PAN/SWNT پردازش شده با پلازما در حذف گاز تولوئن ۹۸ درصد و میانگین افت فشار آن‌ها حدود ۱۰۰ پاسکال به دست آمد. طیف FTIR مدیای آزمون نشان داد که پیک‌های ظاهر شده در طول موج‌های معین مربوط به ارتعاش گروه‌های آلیفاتیک C-H باندهای C-C و C=O مربوط به پلیمر PAN و نانولوله کربنی می‌باشد.

**نتیجه‌گیری:** حذف گاز تولوئن از طریق ساخت نانوالیاف هیبریدی PAN و SWNT پردازش شده با پلازما محقق شد. نانوالیافی با مشخصات ریخت شناسی یکنواخت تولید شدند و کارایی حذف مناسب و افت فشار پایین از خود نشان دادند.

**کلمات کلیدی:** نانوالیاف هیبریدی PAN و SWNT، پردازش پلاسمای سرد، کارایی حذف، تولوئن

\* پست الکترونیکی نویسنده مسئول مکاتبه: [fgolbabaie@tums.ac.ir](mailto:fgolbabaie@tums.ac.ir)

## مقدمه

ترکیبات آلی فرار (VOCs<sup>1</sup>) به مواد شیمیایی آلی اشاره دارند که می‌توانند به دلیل فشار بالای بخار و نقطه جوش پایین از شکل مایع یا جامد تبخیر و یا تصعید شده و وارد هوای محیط اطراف شوند (1). امروزه VOCs به عنوان یکی از اصلی‌ترین آلاینده‌های هوا در محیط‌های داخل و بیرون، جزء نگرانی‌های مهم محیط زیستی و شغلی محسوب می‌شوند که می‌توانند از منابع متحرک (به عنوان مثال اتومبیل و کامیون) و منابع ثابت (مانند تاسیسات صنعتی) منتشر شوند (2). در مطالعات نشان داده شده است که برخی از VOCs برای سلامت انسان، اکوسیستم و جو مضر هستند (3). هیدروکربن‌های مونو آروماتیک (BTEX<sup>2</sup>) گروهی از ترکیبات آلی فرار هستند که از منابع مانند پالایشگاه‌ها، صنایع پتروشیمی، میادین استخراج نفت و گاز و صنایع رنگ و چسب تولید می‌شوند (4). تولوئن (متیل بنزن) ماده‌ای سمی و موتاژنیک می‌باشد و مواجهه مزمن با دزهای پایین آن ممکن است باعث طیف وسیعی از اثرات سوء سلامتی مانند اختلالات ایمنولوژیک و عصبی شود. تولوئن به عنوان یک محرک پوست و غشای موکوسی می‌تواند منجر به ضعف اعصاب، خستگی، سرگیجه، ضعف، بی‌خوابی، کم‌اشتهایی و کم شدن دید و شنوایی شود (5). این ترکیب در اثر مصرف سوخت‌های فسیلی به مقدار زیادی تولید می‌شود. هم‌چنین در صنایع به عنوان حلال در تهیه رنگ‌ها، انواع چسب، لاستیک، پلاستیک و تولید ترکیبات شیمیایی مختلف کاربرد دارد. گرچه سمیت تولوئن نسبت به بنزن کم تر است و به عنوان ماده سرطان زا تلقی نشده است اما همراه با ترکیبات دیگر اثر سرطان زایی آنها را افزایش می‌دهد (6). سازمان تحقیقات سرطان (IARC<sup>3</sup>) تولوئن را در گروه ۳ از مواد سرطان زا قرار داده و انجمن متخصصین بهداشت صنعتی آمریکا (ACGIH<sup>4</sup>) آن را در گروه A4 مواد شیمیایی طبقه بندی کرده است (7).

فیلتراسیون یکی از روش‌های موثر برای حذف آلاینده‌های ذره‌ای از جریان هوا محسوب می‌شود. در این میان توسعه در شکل‌گیری ساختارهای لیفی خاص، وعده ساخت فیلترهای بسیار کارآمد برای حذف آلاینده‌ها را می‌دهد (8). فیلترهای لیفی نبافته به طور گسترده‌ای در زمینه‌های مختلف فیلتراسیون هوا قابلیت کاربرد دارند. استفاده از نانوالیاف در فیلترهای لیفی نبافته نشده بسیار امیدبخش ظاهر شده است، زیرا آن‌ها می‌توانند بهره‌وری بیش تر در فیلتراسیون و عمل کرد بالاتر نسبت به الیاف معمولی داشته باشند (9،10).

نانوالیاف پلیمری به طور فزاینده‌ای در زمینه‌های مختلف با توجه به مساحت رویه بزرگ خود در واحد جرم و پور سائز کوچک مورد استفاده قرار می‌گیرند. آن‌ها غالباً به وسیله روش الکتروریسی تولید می‌شوند که در آن از طریق ایجاد یک میدان الکتریکی با ولتاژ بالا بین نوک سوزن حاوی محلول الکتروریسی و صفحه جمع آوری، نانوالیاف شکل می‌گیرند (11، 12). از آن جایی که لایه نانولیفی به خودی خود نرم و شکننده است، در تلاش برای حمایت خوب ساختاری بدون تغییر ویژگی نانوالیاف، فیلترهای نانولیفی نشانداده شده معرفی شده‌اند. یعنی نانوالیاف بر روی یک بستر سفت نشانداده شود تا یک کامپوزیت تشکیل گردد (13). یکی از چالش‌های عمده در ساختارهای کامپوزیت، چسبندگی خوب توده نانوالیاف بر روی بستر و رسیدن به دوام رضایت بخش از توده نانوالیاف در برابر خم شدن و سایش در هنگام استفاده عملی می‌باشد (14) که در این خصوص، پردازش پلازما روش پاک و سازگار با محیط زیست برای اصلاح سطح تلقی می‌گردد. در واقع، رادیکال‌های آزاد و الکترون‌هایی که در پردازش پلازما ایجاد می‌شوند، می‌توانند برای تغییر شیمیایی نانوالیاف پلیمری مورد استفاده قرار گیرند. اتصال کووالانسی از ترکیبات عملیاتی به سطح لیف پلیمر رویکردی ارجح با راندمانی بالا نسبت به ایجاد ویژگی‌های دائمی است (15).

باوجود اقبال روز افزون کاربرد فیلترهای نانولیفی برای تصفیه آلاینده‌های ذره‌ای (به ویژه نانوذرات) از

1- Volatile organic compounds

2- Benzene, Toluene, Ethylbenzene and Xylene

3- International Agency for Research on Cancer

4- American Conference of Governmental Industrial Hygienists

جداره (SWNT<sup>7</sup>) از طریق روش الکتروریسی و پردازش سطح آن با پلاسمای سرد و هم چنین ارزیابی عمل کرد آن برای حذف گاز تولوئن انجام گرفت. امید است این نمونه بتواند برای تصفیه هوای صنایع و هم چنین سیستم‌های تهویه مطبوع ساختمان‌ها مورد استفاده قرار گیرند. این مطالعه بر آن بود که عمل کرد تصفیه یک آلاینده گازی هیدروکربنه را توسط فیلترهای نانولیفی که عمدتاً برای پاک سازی آلاینده‌های ذره‌ای به کار می‌روند، مورد ارزیابی قرار دهد و بررسی خاصیت جذب شیمیایی نمونه تولیدی را مدنظر نداشت.

### روش کار

#### تولید نانوالیاف

لایه‌های نانولیفی بافته نشده توسط فرآیند الکتروریسی (- Fanavaran Nano-Meghyas-ESDP30 (Iran تولید شدند. برای تولید محلول الکتروریسی، نانولوله کربنی تک جداره (SWNT) (اندازه 1 تا 2 نانومتر; Sigma Aldrich USA) با پلیمر پلی آکریلونیتریل (PAN<sup>8</sup>) (وزن مولکولی 80000 گرم بر مول; پلی آکریل اصفهان- ایران) با کمک حلال N,N-دی متیل فرمامید (DMF)<sup>9</sup>) (Merck, Germany) به نسبت 1:99 ترکیب و در دمای اتاق به مدت 12-24 ساعت به منظور به دست آوردن محلول همگن توسط هم زن مغناطیسی و حمام اولتراسونیک هم زده شد. به منظور حذف ناخالصی‌های آهن، پودر SWNT در کوره با دمای ۲۲۵ درجه سانتی گراد به مدت ۱۶ ساعت قرار داده شد. سپس آن به مدت یک روز در محلول اسید کلریدریک (HCL) غلیظ و سورفکتانت سدیم دودسیل سولفات (SDS) توسط هم زن مغناطیسی هم زده شد. بعد از آن محلول به دست آمده به قیف بوخنر منتقل و به مدت ۳ روز با آب مقطر شسته شد. برای آماده سازی محلول الکتروریسی PAN /SWNT حجم حلال DMF ۳ برابر میزان مورد نیاز برای رسیدن به غلظت مورد نظر تعیین شد به طوری که PAN به طور مجزا در یک

جریان هوا، مطالعات کم تری به بحث در خصوص امکان سنجی کاربرد آن‌ها در حذف آلاینده‌های گازی پرداخته است، درحالی که در اکثر محیط‌های کاری هر دو شکل آلاینده وجود دارد. در چندین مطالعه از خاصیت جذب سطحی نانوالیاف کربن فعال که بعد از تولید نانوالیاف پلیمری، تحت فرآیندهای تثبیت، کربنیزاسیون و فعال سازی قرار گرفتند، برای حذف آلاینده‌های گازی مانند تولوئن، فرمالدئید و دی اکسید نیتروژن استفاده شده است (16). از توده‌های<sup>۵</sup> نانولیفی که در محفظه ای پر شده اند نیز بدین منظور استفاده شده است (17)، ولی کارایی حذف آلاینده‌های گازی به خصوص هیدروکربن‌های مونوآروماتیک توسط نانوالیاف ساده بدون پردازش حرارتی به صورت صفحه تخت<sup>۶</sup> (مطابق استاندارد ISO 10121-1:2014 که روش آزمون عمل کرد مדיاهای تصفیه هوا نوع فاز گازی را برای انواع مדיاهای صفحه تخت ارایه می‌دهد) که امروزه کاربردهای صنعتی رو به رشدی برای تصفیه ذرات پیدا کرده‌اند، کم تر مورد مطالعه قرار گرفته است. درحالی که لایه های نانولیفی دارای خصوصیتی هستند که امکان ساخت بسترهای چند کاربردی (حذف آلاینده های ذره‌ای و گازی از طریق مکانیسم‌های فیزیکی و شیمیایی) را فراهم می‌سازند (18).

لایه‌های نانولیفی در صورتی که حاوی مواد جاذب باشند می‌توانند به عنوان یک لایه انتقال بین سیال و جریان عمل نمایند (19). نانولوله های کربنی نیز از زمان کشف آن توسط Iijima، به علت ساختار منحصر به فرد خود و خواص مکانیکی و الکترونیکی فوق العاده‌ای اش علاقه گسترده ای به دست آورده (20) و نانوالیاف الکتروریسی شده بر اساس ترکیب پلیمر / نانولوله کربنی در واقع می‌توانند به عنوان نانومواد چند منظوره به کار گرفته شوند. چرا که آن‌ها خواص جذب شیمیایی و قدرت هم تراز نانولوله کربنی را در ساختار نانوالیاف ترکیب می‌کنند، که تا حد زیادی می‌تواند خواص فیلتراسیون لیف را بهبود ببخشد (21). از این رو، مطالعه حاضر با هدف تولید نانوالیاف پلیمری بر پایه نانولوله کربنی تک

5- Mat  
6- Flat sheet

7- Single-Wall Nanotubes  
8- Polyacrylonitrile  
9- Dimethylformamide



شکل (۱)- تصویر پردازش پلاسما

RF (فرکانس رادیویی ۱۳/۵۶ مگاهرتز با توان ۲۰ وات) با گاز تشکیل‌دهنده آرگون و فشار عملیاتی ۰/۲ تور مورد پردازش قرار گرفتند (25). شکل (۱) تصویر دستگاه پلاسمای مورد استفاده را نشان می‌دهد که در آن جریان قوس پلاسما از الکتروود کاتد با شارژ مثبت به سمت آند متصل به زمین که نمونه روی آن قرار داشت، مشخص می‌باشد.

#### آزمون کارایی

شرایط آزمون نمونه تولیدی برای حذف گاز تولوئن مطابق استاندارد ISO 10121-1:2014 آماده گردید که روش آزمون عمل کرد مدیاهای تصفیه هوا نوع فاز گازی را برای انواع مدیاهای صفحه تخت ارایه می‌دهد (26). دو پارامتر عمل کردی فیلتر مدیا در این خصوص شامل افت فشار و کارایی حذف است. افت فشار اشاره به اختلاف فشار بین دو نقطه در سیستم جریان هوایی دارد به ویژه هنگامی که از فیلترمدیا عبور می‌کند. کارایی حذف، کسر یا درصد آلاینده آزمونی است که توسط فیلترمدیا در زمان مشخص حذف می‌شود (27, 28). طرح شماتیک ستاپ این آزمون در شکل (۲) آورده شده است. مدیای تحت آزمون بر روی یک هولدر اریفیزی (سطح مقطع باز دایره‌ای ۷۰ سانتی متر مربعی معادل سطح در معرض هوای فیلتر<sup>۱۱</sup>) و توری ضد زنگ با قطر منافذ ۶/۳۵ میلی‌متر فیکس شده و در تونل آزمون قرار می‌گرفت. دبی (گذر حجمی) هوا به گونه‌ای تنظیم می‌شد (42 L/min~)

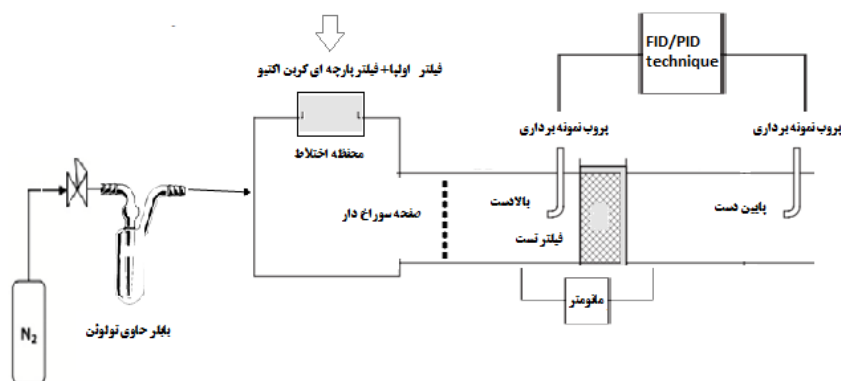
11- Exposed area

واحد DMF و SWNT در دو واحد DMF توسط هم زن مغناطیسی و حمام اولتراسونیک (-Sonoswiss-SW6H Switzerland) به مدت ۱۲ ساعت حل و هم زده شد. در نهایت هر دو محلول با هم ترکیب و حلال اضافه به منظور رسیدن به غلظت مورد نظر تبخیر شد (22, 23). شرایط انجام الکتروریسی که در مقالات قبلی نویسندگان بهینه سازی شده بود (8-11)، شامل غلظت محلول: ۱۶ درصد وزنی، ولتاژ کاربردی: 20 کیلوولت، فاصله سوزن تا صفحه جمع‌آوری کننده: ۱۰ سانتی متر، دما: ۲۵-۲۰ درجه سانتی‌گراد، مدت زمان: ۶۰ دقیقه، مقدار تزریق: 1 میلی‌لیتر بر ساعت، قطر سوزن: گيج 18، سرعت چرخش درام ۱۰۰۰-۵۰۰ دور در دقیقه و سرعت روبش نازل 300 میلی‌متر بر دقیقه بود. از آن جایی که نانوالیاف پلیمری تولید شده توسط الکتروریسی نرم و شکننده بوده و به راحتی می‌توانند با تماس ملایم آسیب ببینند، از این رو، نانوالیاف به‌ندرت به‌تنهایی به عنوان فیلتر هوا استفاده شده و معمولاً روی یک بستر بی‌بافت نشانده می‌شوند (24). بستر مورد استفاده در مطالعه حاضر، پارچه رول اسپان‌باند پلی‌پروپیلن با وزن مبنای (گراماژ) ۱۷ گرم بر مترمربع، قطر فیلامنت 5/3-5/11 میکرون و ضخامت 100 میکرون بود. از علل انتخاب این بستر می‌توان به مقاومت مکانیکی مناسب، قیمت ارزان، سهولت تهیه، افت فشار و راندمان ناچیز آن اشاره کرد.

#### پردازش سطح با پلاسما

دستگاه پلاسمای مورد استفاده دارای مولد RF<sup>10</sup> (فرکانس رادیویی ۱۳/۵۶ مگاهرتز با توان تولیدی بین ۰ تا ۲۰۰ وات)، گاز تشکیل‌دهنده پلاسما آرگون، فشار عملیاتی ۰/۲ تور و پلاسما نوع سرد (ساخت سازمان انرژی اتمی ایران) بود. به منظور پردازش پلاسما، نمونه‌ها بر روی صفحه مرکزی دستگاه پلاسما قرار گرفته و این صفحه به پتانسیل منفی وصل شده (متصل به زمین) و به عنوان کاتد عمل می‌کرد (شکل ۱). سطح رویی نمونه‌ها به مدت ۱۰ دقیقه تحت پلاسمای سرد با منبع تغذیه

10- Radio frequency



شکل (۲)- طرح شماتیک ستاپ حذف گاز توسط مدبای نانولیفی

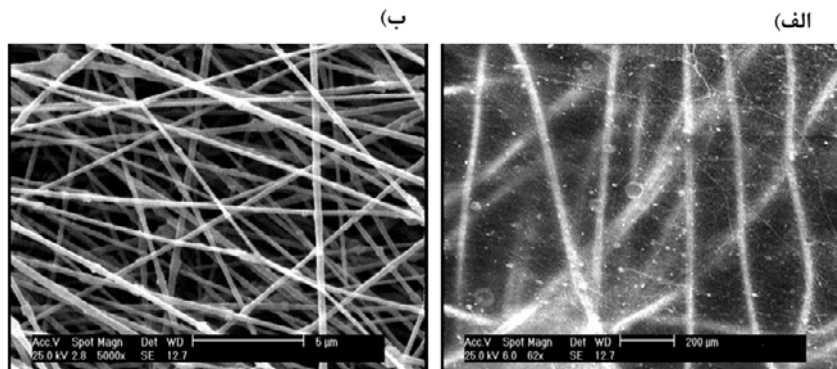
آزمون خارج می‌شد. قبل از شروع آزمون، دما، رطوبت بالادست و پایین دست مرتباً (حداقل ۵ دقیقه) اندازه گیری می‌گردید. اختلاف ۱٪ رطوبت و ۰/۲ درجه‌ای دما قابل پذیرش بود. اندازه گیری‌های غلظت در سه نقطه در برش عرضی کانال (بالادست و پایین دست) انجام و هر ۵ دقیقه ثبت می‌شد. محاسبه کارایی حذف با داشتن غلظت پایین دست و بالادست صورت می‌گرفت (29). به منظور اندازه گیری غلظت بخار تولوئن از دستگاه قرائت مستقیم Firstcheck با مدل ۵۰۰۰+ ساخت شرکت IonScience انگلستان مجهز به دتکتور  $^{13}\text{C}$ PID استفاده گردید. پاسخ این دستگاه در قرائت غلظت‌های مختلف تولوئن با یک دستگاه گازکروماتوگرافی (Varian CP-3800-USA) مجهز به دتکتور  $^{14}\text{C}$ FID با ستون موئینه‌ای دی فنیل دی متیل پلی سیلوکسان (با طول ۲۵ متر و قطر ۰/۲۵ میلی متر) مقایسه گردید. شکل (۲) طرح شماتیک ست تولوئن آزمون کارایی حذف تولوئن توسط فیلتر نانولیفی را نشان می‌دهد که در آن محل قرارگیری بابلر حاوی تولوئن، محفظه اختلاط هوای فیلتره شده و بخارات تولوئن تولید شده و نیز موقعیت قرارگیری فیلتر آزمون، مانومتر (وسیله سنجش فشار تفاضلی) و پروب نمونه برداری از جریان هوا در پایین دست و بالادست فیلتر برای تعیین راندمان حذف به خوبی مشخص است. آزمون عمل کرد فیلتر در میانگین دما ۲۵ درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی ۳۵ درصد انجام

تا سرعت سطحی<sup>12</sup> مورد نظر (10 cm/s) ایجاد گردد. غلظت تولیدی تولوئن طبق مقدار پیشنهادی استاندارد حدود 15-9 پی پی ام و زمان کلی انجام آزمون 1 ساعت در نظر گرفته شد. افت فشار (توسط مانومتر دیجیتال - TSI - Airflow MEDM5K-UK)، غلظت، دما (به وسیله سرعت سنج سیم داغ Standard- ST-8880- Hong Kong) و رطوبت بالادست و پایین دست (با کمک Thermo- HygronDIR CO<sub>2</sub> Meter: TES -1370 NDIR- Taiwan) حجم هوا و سرعت سطحی همگی پایش می‌شدند (29). غلظت سازی از طریق روش دینامیک با تبخیر تولوئن مایع صورت گرفت. تراکم آلودگی در دامنه ۱۰-۲۰ پی پی ام تولید می‌شد. همان طور که در شکل (۲) آمده است، حجم مشخصی از تولوئن مایع (MW 14/92 g/mol) ، خلوص بالای 99 درصد) در داخل یک بابلر ریخته شد و با عبور مقدار جزئی گاز ازت از داخل آن و اختلاط آن با هوای تصفیه شده، غلظت مورد نظر در بالا دست تهیه گردید. به منظور تصفیه هوای ورودی به محفظه اختلاط گاز ازت و بخارات تولوئن از سیستم فیلتراسیون متشکل از فیلتر اولپا و فیلتر پارچه ای کربن فعال استفاده گردید. قبل از نصب نمونه آزمون در هولدر خود، نشستی سیستم چک و از صحت دستگاه‌های اندازه گیری اطمینان حاصل می‌شد. از رسیدن به غلظت مشخص، غلظت آن برای ده دقیقه پایش می‌گردید. بعد از آن منبع تولوئن تا زمان رسیدن غلظت به صفر از مدار

13- Photoionization Detector

14- Flame Ionization Detector

12-Face velocity

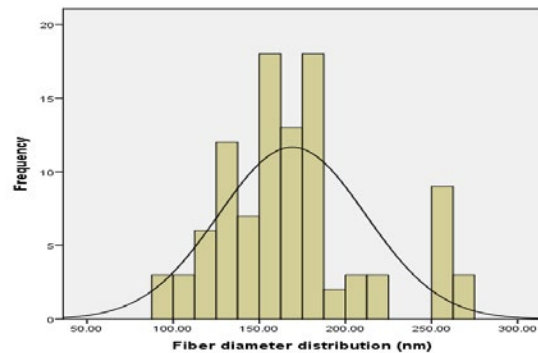


شکل (۳) - تصویر SEM از فیلتر آزمون (بستر + لایه نانولیفی) (الف) و نانولیف تولیدی (ب)

از پوشش دهی با طلا انجام گردید. طیف سنجی مادون قرمز - تبدیل فوریه (FTIR<sup>16</sup>) (Rayleigh- WQF-) (510-China) از نانولیف هیبریدی به منظور شناسایی ترکیبات آلی و گروه های عاملی در نانولیف گرفته شد. ضخامت فیلترمدیا توسط کولیس (-ASIMETO- 307) ABS- Hong Kong "6" (56-3) صورت پذیرفت. فشردگی نانولیف که یک منهای تخلخل است می تواند توسط فرمول تجربی = وزن مبنا / (ضخامت لایه × چگالی لیف) به دست آید (30). قابلیت عبور هوا از فیلترمدیا یا ضریب نفوذپذیری آن (بر حسب مترمربع) نیز از رابطه قانون دارسی = (ویسکوزیته هوا × گذرجمی × ضخامت فیلترمدیا) / (سطح مقطع فیلترمدیا × افت فشار) به دست آمد (31).

### یافته ها

شکل (۳) تصویر SEM از فیلتر آزمون متشکل از بستر اسپان باند پلی پروپیلن و لایه نانولیفی کوت شده روی آن در حین فرآیند الکتروریسی (الف) و تصویر SEM با بزرگ نمایی 5000X نانولیف تولیدی (ب) را به نمایش گذاشته است که از طریق پردازش تصاویر تهیه شده میانگین قطر الیف تعیین گردید. نمودار هیستوگرام از میانگین قطر نانولیف PAN/SWNT پردازش شده با پلاسما در شکل (۴) به نمایش گذاشته شده است. میانگین قطر الیف تولیدی  $19/7 \pm 16/169$  نانومتر



شکل (۴) - نمودار هیستوگرام از میانگین قطر نانولیف PAN/SWNT پردازش شده با پلاسما

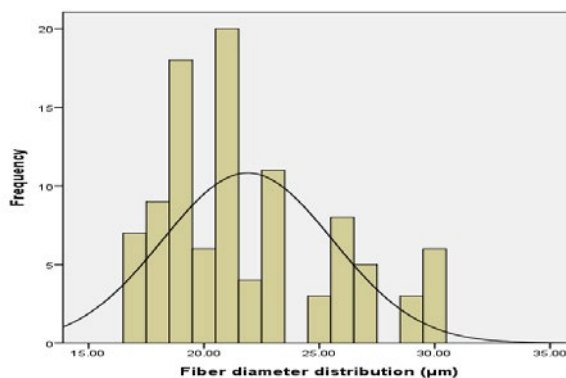
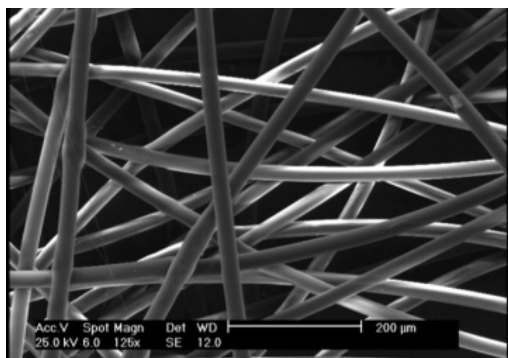
شد و شش فیلترمدیا که با شرایط یکسان تولید شدند، مورد آزمون عمل کرد (کارایی و افت فشار) قرار گرفتند. دیگر پارامترهای عمل کردی فیلترمدیا در این خصوص شامل ظرفیت و قدرت نگه داری است که به ترتیب به مقدار (جرم یا مول) ماده جذب شونده که می تواند در جاذب (فیلترمدیا) در شرایط آزمون نگه داشته شود و توانایی جاذب برای مقاومت در برابر واجذب ماده جذب شونده اشاره دارند (29). در مطالعه حاضر با توجه به اهداف در نظر گرفته شده برای آن صرفاً بررسی پارامترهای افت فشار و کارایی حذف برای مدیاهای تولیدی انجام شد.

### تعیین مشخصات ساختاری

مطالعات ریخت شناسی الیف با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM<sup>15</sup>) (Philips- XL 30- USA) پس

16- Fourier Transform Infrared Spectroscopy

15- Scanning Electron Microscope



شکل (۵) - تصویر SEM و نمودار هیستوگرام از توزیع سایزی قطر الیاف بستر پلی پروپیلن

جدول (۱) - مشخصات ساختاری و عمل کردی نمونه های مورد آزمون

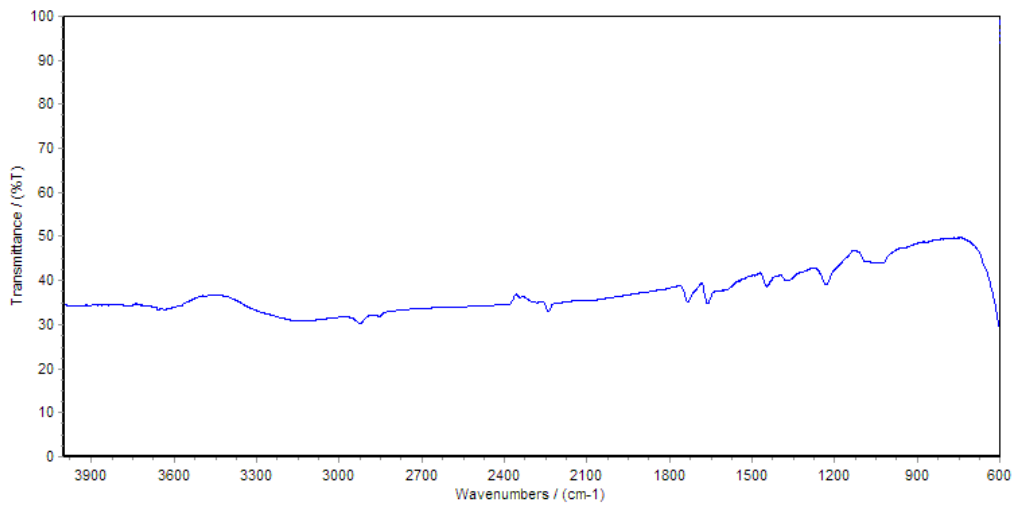
میانگین افت فشار (پاسکال)	میانگین درصد کارایی	ضریب نفوذپذیری هوا مدیا (داری)	فشردگی نانوالیاف	میانگین ضخامت مدیا (میلی متر)	میانگین قطر الیاف (نانومتر)	مدیا
۹۹	۹۹	۵/۸	۰/۶۱	۰/۱۵	۱۶۰	شماره ۱
۱۰۰	۹۸	۵/۶۵	۰/۵۹	۰/۱۵	۱۶۵	شماره ۲
۱۰۱	۹۸	۵/۷	۰/۵۷	۰/۱۵	۱۶۸	شماره ۳
۹۹	۹۸	۵/۹	۰/۵۶	۰/۱۵	۱۷۵	شماره ۴
۱۰۰	۹۸	۵/۶	۰/۵۸	۰/۱۵	۱۶۷	شماره ۵
۱۰۲	۹۷	۵/۹	۰/۵۵	۰/۱۵	۱۸۰	شماره ۶
۱۰۰/۱۶(۱/۱۶)	۹۸(۰/۶۳)	۵/۷۵(۰/۱۲)	۰/۵۷(۰/۰۲)	۰/۱۵	۱۶۹/۱۶(۷/۱۹)	میانگین کل (انحراف معیار)
۱	۱۵	۳۰/۱۵	۰/۲۴	۰/۱	۲۲/۳۷×۱۰ <sup>۳</sup>	بستر

درصد تخلخل لایه نانولیفی که پارامتر موثر بر میزان نفوذ پذیری هوا و افت فشار است و از رابطه یک منهای دانسیته فشردگی به دست می آید، حدود ۴۳ درصد محاسبه شد. این میزان برای بستر آزمون حدود ۷۶ درصد برآورد گردید که می تواند توجیهی بر افت فشار پایین بستر مورد استفاده باشد. همان طور که در جدول (۱) مشخص است میانگین درصد کارایی نانوالیاف PAN/SWNT پردازش شده با پلاسما در حذف گاز تولوئن ۹۸ درصد و میانگین افت فشار آن ها حدود ۱۰۰ پاسکال است.

شکل (۶) طیف FTIR فیلتر آزمون را نشان می دهد که پیک های ظاهر شده در طول موج های معین نیز مربوط به ارتعاش گروه های آلیفاتیک C-H باندهای C=O و C-C مربوط به پلیمر PAN و نانولوله کربنی می باشد. مطابق شکل ارتعاشات کششی خفیف در طول موج  $1600\text{ cm}^{-1}$ ، مربوط به باند C-C است. پیک های دیده شده در محدوده  $2935-2926\text{ cm}^{-1}$  مرتبط با

و میانگین ضریب تغییرات آن ۲۳/۰ محاسبه گردید. در صورتی که نسبت انحراف معیار قطر الیاف به میانگین آن کم تر از ۰/۳ باشد، از نظر ویژگی های ریخت شناسی (مورفولوژی<sup>۱۷</sup>) به آن نانوالیاف یکنواخت اطلاق می شود (32). از این رو مورفولوژی الیاف یکنواخت و دانه دار<sup>۱۸</sup> تعیین شد که به ترتیب از روی ضریب تغییرات و پردازش تصاویر SEM به دست آمد. شکل (۵) تصویر SEM بستر پلی پروپیلن و نمودار هیستوگرام از توزیع سایزی قطر الیاف آن را به نمایش گذاشته است. میانگین قطر الیاف تولیدی  $66/3 \pm 37/22$  میکرومتر و ضریب تغییرات آن ۰/۱۶ تعیین شد. مشخصات ساختاری فیلترهای مورد بررسی شامل میانگین قطر الیاف، ضخامت مدیا، فشردگی نانوالیاف و ضریب نفوذپذیری هوا فیلترمدیا و ویژگی های عمل کردی آن ها شامل میانگین درصد کارایی حذف و افت فشار در جدول (۱) آورده شده است. میانگین

17- Morphology  
18- Bead



شکل (۶) - طیف FTIR مدیای آزمون

مورفولوژی سطح و کاهش قطر موثر حفره‌های مدیا افزایش می‌یابد (34). افت فشار یک فیلترمدیا بسیار به قطر حفره حساس است، زیرا سرعت بینابینی<sup>19</sup> در یک فیلترمدیا رابطه عکس با مجذور قطر حفره دارد (34). دانه‌ها در الیاف باعث ایجاد جداسازی فیزیکی لایه‌های نانولیفی و افزایش فاصله بین نانوالیاف می‌شود، هم‌چنین نفوذپذیری هوا و عمل کرد فیتراسیون را بهبود می‌بخشند (35). وانگ (Wang) و همکارانش (2008) با بررسی فاکتور کیفیت فیلترهایی متشکل از یک لایه نانولیف بر روی یک بستر میکرولیفی نفاخته، به این نتیجه رسیدند که با افزایش فشردگی نانوالیاف درصد کارایی و میزان افت فشار هر دو افزایش می‌یابد، که این امر ناشی از افزایش جزء جامد لایه نانولیفی و کاهش تخلخل و حجم حفرات و در نتیجه افزایش سطح فیلتراسیون است (31). همان‌طور که قبلاً بیان شد، در حالی که لایه‌های نانولیفی دارای خصوصیتی هستند که امکان ساخت بسترهای چند کاربردی (حذف آلاینده‌های ذره‌ای و گازی از طریق مکانیسم‌های فیزیکی و شیمیایی) را فراهم می‌سازند، ولیکن مطالعات نسبتاً کم‌تری به بحث در خصوص امکان سنجی کاربرد آن‌ها در حذف آلاینده‌های گازی به خصوص هیدروکربن‌های مونو آروماتیک پرداخته

باندهای آلیفاتیک (کششی) C-H در CH<sub>2</sub>، CH و CH<sub>3</sub> است. پیک‌های موجود در 1737-1730 cm<sup>-1</sup> و 1170 cm<sup>-1</sup> مربوط به باندهای C=O (کربونیل کششی) یا C-O است. پیک ظاهر شده در 1628-1593 cm<sup>-1</sup> نیز به باندهای رزونانس C-O مرتبط است (33-34).

### بحث

به‌طور معمول یک فیلتر با فاکتور کیفیت بالا از کارایی زیاد و افت فشار کم برخوردار است. افت فشار پایین از طریق دانسیته فشردگی پایین (نسبت حجم فضای اشغال شده به وسیله الیاف فیلتر به کل حجم فیلتر است که همان یک منهای تخلخل می‌باشد)، تخلخل بالاتر، پورسایز (اندازه حفرات) بزرگ‌تر و قطر بزرگ‌تر الیاف محقق می‌شود. بنابراین یافتن نقطه بهینه برای ایجاد تعادل مناسب بین افت فشار فیلتر و کارایی آن جهت کسب فاکتور کیفیت قابل قبول ضروری است (32). مطالعات بیان‌گر آن است که حضور تعداد زیاد دانه در الیاف می‌تواند با تاثیر بر دانسیته فشردگی فیلتر، باعث کاهش پورسایز و میزان تخلخل و در نتیجه کاهش نفوذپذیری سیال عبوری گردد (33). کاروا (Karwa) و تاتارچاک (Tatarchuk) نشان دادند که با افزایش محتوی نانولوله کربنی در فیلترمدیا، افت فشار آن به علت تغییر

19- Interstitial velocity



(نیروهای واندروالس) اشاره دارد (38). نانوالیاف می‌توانند به علت سطح بالاتری که ظرفیت جذب فیزیکی را افزایش می‌دهد نیروی واندروالس قوی با آلاینده‌های گازی داشته باشند. از این رو، فیلتر لیفی با مساحت رویه بالا باید برای حذف آلاینده‌های گازی مد نظر قرار گیرد (37). جذب شیمیایی به معنای تبدیل آلاینده‌ها به ترکیبات ساده با یک عمل شیمیایی شامل احیاء کاتالیستی یا غیرکاتالیستی است. جذب شیمیایی انتخابی‌تر از جذب فیزیکی عمل می‌کند و می‌تواند با عامل دار کردن سطح و ایجاد یک سطح فعال شیمی بر روی ساختار لیف بهبود یابد. استفاده از نانوالیاف عامل دار شده می‌تواند برای این منظور مفید باشد. نانوالیاف الکترورسی شده می‌تواند از طریق افزودنی‌های خاص عامل دار شده تا برای افزایش قابلیت جذب آلاینده‌های گازی به کار گرفته شوند (37). در مطالعه حاضر جذب فیزیکی به عنوان مکانیسم حذف مد نظر قرار داشت زیرا که لایه‌های نانوالیاف عمدتاً برای پاک سازی آلاینده های ذره‌ای به کار می‌رود و این مطالعه بر آن بود که عمل کرد تصفیه آلاینده‌های گازی را توسط این فیلترها مورد ارزیابی قرار دهد و به دنبال افزایش قابلیت جذب شیمیایی فیلترها از طریق عامل دار کردن نانوالیاف نبود. جذب فیزیکی در فیلترهای آزمون از طریق ساخت نانوالیاف الکترورسی شده با مساحت رویه بالا محقق شد، که در این راستا افزودن نانولوله کربنی تک جداره به نانوالیاف و پردازش سطح فیلتر با پلاسما نیز صورت گرفت. افزودن نانولوله کربنی به محلول پلیمری در فرآیند الکترورسی نشان داده است که محاسن زیادی در بر دارد. به طور مثال الکترورسی هم زمان SWNT و PAN در مطالعه‌ای توسط کای (Chae) و همکاران (۲۰۰۵) گزارش شده که باعث بهبود جهت‌گیری و هم ترازای الیاف می‌گردد (21). افزایش قدرت مکانیکی، مدول و استحکام کششی الیاف PAN /SWNT نسبت به الیاف PAN را هو (Hou) و همکاران (2010) بیان کرده‌اند که این موضوع را به مدول الاستیسیته بالای نانولوله‌های کربنی نسبت داده اند که درجه سفتی پلیمر را افزایش می‌دهد (39). مطالعات نشان

است. شولتن (Scholten) و همکاران در سال 2011 به بررسی و مقایسه ویژگی‌های جذب شیمیایی VOC توسط نانوالیاف پلی‌اورتان و کربن فعال پرداختند (16). آن‌ها دریافتند که اگرچه کربن فعال مساحت رویه بالاتری نسبت به نانوالیاف پلی‌اورتان داشت، ولی ظرفیت جذب الیاف پلی‌اورتان مشابه کربن فعال تعیین شد. علاوه بر این، در مقایسه با جذب VOC بر روی کربن فعال جایی که در آن احیاء کامل جاذب امکان پذیر نبود، الیاف پلی‌اورتان جذب و واجذب برگشت پذیر کاملی را از خود نشان دادند و این الیاف تمایل (افینیتی) بیش تری را نسبت به تولوئن و کلروفرم داشتند. آن‌ها نتیجه گرفتند که انتخاب پذیری الیاف پلی‌اورتان نسبت به بخارات مختلف، همراه با سهولت احیاء، آن‌ها را به گزینه‌های مناسبی برای حذف VOC تبدیل می‌کند (16). کیم (Kim) و همکاران در سال 2013 به مطالعه ظرفیت جذب ممبران کامپوزیتی خاکستر<sup>۲۰</sup> / الیاف پلی‌اورتان برای حذف پنج VOC مختلف (کلروفرم، بنزن، تولوئن، زایلن و استایرن) از هوا پرداختند. ظرفیت جذب الیاف پلی‌اورتان با افزایش مقدار خاکستر در آن بهبود یافت. داده‌های تجربی آن‌ها نشان داد که استایرن بیش ترین میزان جذب را داشت (۴۰ میکروگرم بر گرم الیاف). کارایی بدون تغییر این الیاف در جذب VOC تاییدی بر رفتار جذب و واجذب کاملاً برگشت پذیر آن‌ها بود. افراد به این نتیجه رسیدند که این ممبران کامپوزیت یک ماتریس نبافته اقتصادی و سازگار با محیط زیست مناسب برای حذف VOC در محیط روبات و در محیط داخل است (36).

فیلتراسیون آلاینده‌های گازی با استفاده از ممبران نانولیفی الکترورسی شده یک مساله نسبتاً پیچیده است. اساساً، آلاینده‌های گازی می‌توانند یا به صورت شیمیایی کاهش یابند و یا توسط لایه نانولیفی جذب شوند (37). جذب شیمیایی<sup>۲۱</sup> و جذب فیزیکی<sup>۲۲</sup> دو مکانیسم اصلی حذف آلاینده‌های گازی هستند. جذب فیزیکی به حذف در منافذ سطحی ساختار لیف به دلیل جاذبه بین مولکولی

20- Fly ash  
21- Chemisorption  
22- Physiosorption

### نتیجه گیری

در مطالعه حاضر، برای اولین بار، نانوالیاف بر پایه نانولوله کربنی تک جداره تولید شده و مورد پردازش پلاسما قرار گرفته و میزان اثربخشی آن برای حذف گاز تولوئن در یک تونل آزمون مورد بررسی قرار گرفته است. در مطالعه حاضر جذب فیزیکی به عنوان مکانیسم حذف مد نظر قرار داشت. جذب فیزیکی در نمونه‌های آزمون از طریق ساخت نانوالیاف الکتروریسی شده با مساحت روبه بالا محقق شد که در این راستا افزودن نانولوله کربنی تک جداره به نانوالیاف پردازش سطح نمونه با پلاسما نیز صورت گرفت. نانوالیاف با مورفولوژی یکنواخت تولید شدند و کارایی حذف مناسب و افت فشار پایین از خود نشان دادند. با توجه به مزایای این فیلتر مانند تولید آسان، کارایی بالا، هزینه تمام شده نسبتاً پایین، وزن سبک، چسبندگی مناسب لایه نانولیف روی بستر و مقاومت پایین در برابر عبور جریان هوا و افت فشار کم، می‌توان امکان استفاده آن را در سیستم تهویه مطبوع برای فرآوری هوای ورودی به ساختمان‌ها و نیز در هودهای مکنده موضعی در سیستم تهویه صنعتی و یا در فیلترخانه‌های پارچه‌ای به صورت کیسه‌ای و یا استوانه ای مد نظر قرار داد و هم چنین می‌توان یک لایه نانولیفی حاوی نانولوله کربنی را بر روی فیلترهای تجاری مرسوم در سیستم‌های تصفیه هوا به کار گرفت.

### تشکر و قدردانی

این مقاله حاصل بخشی از طرح تحقیقاتی مصوب دانش گاه علوم پزشکی و خدمات بهداشتی درمانی تهران (کد: 21809-27-01-92) می‌باشد که با حمایت دانش گاه علوم پزشکی و خدمات بهداشتی درمانی تهران اجرا شده است.

داده‌اند که انجام پردازش پلاسما می‌تواند از طریق تخریب توده‌ها و ایجاد برآمدگی‌های یکنواخت در سطح منجر به شکل‌گیری سطحی یکنواخت‌تر و صاف‌تر گردد (40). بارش یونی در پردازش پلاسما می‌تواند از طریق تخریب بافت مدیا و ایجاد حفره در آن، سبب نفوذپذیری زیاد مدیا و کاهش قابل ملاحظه افت فشار و در نتیجه افزایش فاکتور کیفیت آن گردد (41). علاوه بر این موضوع در مطالعه حاضر پردازش سطح فیلتر با پلاسما به منظور افزایش چسبندگی لایه نانولیفی بر روی بستر و رسیدن به مقاومت مکانیکی مناسب در هنگام آزمون عمل کرد انجام شد (13).

هنگام به کارگیری نانوالیاف در تصفیه آلاینده‌های ذره‌ای و گازی، بهتر است به منظور بهبود عمل کرد فیلتراسیون، از فیلتر مدیاهای چند لایه استفاده گردد (23). به کارگیری مدیاهای نانولیفی چند لایه باعث می‌شود تا لایه جلویی جبران عدم یکنواختی لایه پشتی را بنماید (42). در واقع نقطه ضعف مدیای نانولیفی نازک و متخلخل می‌تواند مقاومت مکانیکی و دوام پذیری پایین آن باشد. بنابراین، توصیه می‌شود یک لایه نانوالیاف در ترکیب با لایه‌های پشتیبان<sup>۲۳</sup> میکرولیفی به کار گرفته شود. فاکتور کیفیت سیستم‌های چندلایه به طور قابل ملاحظه‌ای بالاتر از فیلترهای تک لایه نانولیفی و میکرولیفی است (43). در واقع برای کاهش نفوذ ذرات از فیلترهای الکتروریسی شده و افزایش توانایی حذف آلاینده گازی در آن‌ها بهتر است به صورت چند لایه تهیه شوند. البته عبور جریان از این فیلترها تابع قانون دارسی است و می‌تواند با افزایش ضخامت فیلتر میزان افت فشار به طور خطی افزوده گردد (44).

23- Backing support layer

## REFERENCES

- Jahren P, Sui T. Concrete and Sustainability. New York: CRC Press; 2013.
- Xu X, Wang P, Xu W, Wu J, Chen L, Fu M, et al. Plasma-catalysis of metal loaded SBA-15 for toluene removal: Comparison of continuously introduced and adsorption-discharge plasma system. *Chemical Engineering Journal*. 2016;283:276-84.
- Singh A, Neetu T, Jain C. Monitoring, assessment and status of benzene, toluene and xylene pollution in the urban atmosphere of Delhi, India. *Research Journal of Chemical Sciences ISSN*. 2012;2231:606X.
- Gholami M, Nassehinia HR, Jonidi-Jafari A, Nasser S, Esrafil A. Comparison of Benzene & Toluene removal from synthetic polluted air with use of Nano photocatalyticTiO<sub>2</sub>/ZNO process. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*. 2014;12(1):45.
- Kamel E-N, Shehata M. Effect of toluene exposure on the antioxidant status and apoptotic pathway in organs of the rat. *British journal of biomedical science*. 2008;65(2):75-9.
- Liang W-J, Ma L, Liu H, Li J. Toluene degradation by non-thermal plasma combined with a ferroelectric catalyst. *Chemosphere*. 2013;92(10):1390-5.
- Dehghan SF, Golbabaee F, Maddah B, Latifi M, Pezeshk H, Hasanzadeh M, et al. Optimization of Electrospinning Parameters for PAN-MgO Nanofibers Applied in Air Filtration. *Journal of the Air & Waste Management Association*. 2016;66(9):912-21.
- Dehghan SF, Golbabaee F, Maddah B, Yarahmadi R, Sadigh Zadeh A. Fabrication and Optimization of Electrospun Polyacrylonitrile Nanofiber for Application in Air Filtration. *Iran Occupational Health*. 2016;13(5):11-21[in Persian].
- Dehghan SF, Golbabaee F, Maddah B, Latifi M, Pezeshk H, Hasanzadeh M. Effect of single-walled carbon nanotubes on the porosity of nonwoven nanofiber filter media. *Nanomaterials*. 2015;22(7):75-85.
- Dehghan SF, Maddah B, Golbabaee F. The Development of Nanofibrous Filter Media Containing Nanoparticles for Removing Particles of Air Stream. *Iranian Journal of Health and Environment*. 2016;8(4):509-24.
- Dehghan SF, Golbabaee 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;7:110-8.
- Dharmanolla S, Chase GG. Computer program for filter media design optimization. *Journal of the Chinese Institute of Chemical Engineers*. 2008;39(2):161-7.
- Vitchuli N, Shi Q, Nowak J, Nawalakhe R, Sieber M, Bourham M, et al. Plasma-Electrospinning Hybrid Process and Plasma Pretreatment to Improve Adhesive Properties of Nanofibers on Fabric Surface. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*. 2012;32(2):275-291.
- Yao C, Li X, Neoh K, Shi Z, Kang E. Surface modification and antibacterial activity of electrospun polyurethane fibrous membranes with quaternary ammonium moieties. *Journal of membrane science*. 2008;320(1):259-67.
- Lee KJ, Shiratori N, Lee GH, Miyawaki J, Mochida I, Yoon S-H, et al. Activated carbon nanofiber produced from electrospun polyacrylonitrile nanofiber as a highly efficient formaldehyde adsorbent. *Carbon*. 2010;48(15):4248-55.
- Scholten E, Bromberg L, Rutledge GC, Hatton TA. Electrospun Polyurethane Fibers for Absorption of Volatile Organic Compounds from Air. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2011;3(10):3902-9.
- Desai K, Kit K, Li J, Davidson PM, Zivanovic S, Meyer H. Nanofibrous chitosan non-wovens for filtration applications. *Polymer*. 2009;50(15):3661-9.
- Hutten IMM. Handbook of nonwoven filter media. 2nd ed. Oxford :Butterworth-Heinemann; 2015.
- Hou H, Reneker DH. Carbon nanotubes on carbon nanofibers: a novel structure based on electrospun polymer nanofibers. *Advanced materials*. 2004;16(1):69-73.
- Kumar A, editor. Carbon Nanotubes Reinforced Electrospun Polymer Nanofibres. Vukovar : Croatia: InTech; 2010.
- Chae HG, Sreekumar T, Uchida T, Kumar S. A comparison of reinforcement efficiency of various types of carbon nanotubes in polyacrylonitrile fiber. *Polymer*. 2005;46(24):10925-35.
- Mahalingam P , Parasuram B, Maiyalagan T, Sundaram S. Chemical Methods For Purification Of Carbon Nanotubes-A Review. *J. Environ. Nanotechnol*. 2012; 1(1):53-61.

23. Leung WWF, Hung CH, Yuen PT. Effect of face velocity, nanofiber packing density and thickness on filtration performance of filters with nanofibers coated on a substrate. *Separation and purification technology*. 2010;71(1):30-7.
24. Chiang Y-C, Lee C-Y, Lee H-C. Surface chemistry of polyacrylonitrile-and rayon-based activated carbon fibers after post-heat treatment. *Materials Chemistry and Physics*. 2007;101(1):199-210.
25. (ISO) IOFS. ISO 10121-1: Test method for assessing the performance of gas-phase air cleaning media and devices for general ventilation -- Part 1: Gas-phase air cleaning media. Geneva: ISO; 2014.
26. Heikkilä P. Nanostructured Fibre Composites, and Materials for Air Filtration: Tampere University of Technology. Doctoral Thesis ; 2008.
27. Wang J, Kim SC, Pui DYH. 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.
28. Bao L, Seki K, Niinuma H, Otani Y, Balgis R, Ogi T, et al. Verification of slip flow in nanofiber filter media through pressure drop measurement at low-pressure conditions. *Separation and purification technology*. 2016;159:100-7.
29. Purchas D, Sutherland K. Handbook of filter media. United Kingdom: Elsevier Science Technology; 2002.
30. Matulevicius J, Kliucininkas L, Prasauskas T, Buivydiene D, Martuzevicius D. The comparative study of aerosol filtration by electrospun polyamide, polyvinyl acetate, polyacrylonitrile and cellulose acetate nanofiber media. *Journal of aerosol science*. 2016;92:27-37.
31. 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.
32. 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(1):162-71.
33. Kaur S, Gopal R, Ng WJ, Ramakrishna S, Matsuura T. Next-generation fibrous media for water treatment. *Mrs Bulletin*. 2008;33(01):21-6.
34. Karwa AN, Tatarchuk BJ. Aerosol filtration enhancement using carbon nanostructures synthesized within a sintered nickel microfibrinous matrix. *Separation and purification technology*. 2012;87(5):84-94.
35. 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):340-5.
36. Kim HJ, Pant HR, Choi NJ, Kim CS. Composite electrospun fly ash/polyurethane fibers for absorption of volatile organic compounds from air. *Chemical engineering journal*. 2013;230:244-50.
37. Kadam VV, Wang L, Padhye R. Electrospun nanofibre materials to filter air pollutants–A review. *Journal of Industrial Textiles*. 2016;DOI:1528083716676812.
38. Aluigi A, Vineis C, Tonin C, Tonetti C, Varesano A, Mazzuchetti G. Wool keratin-based nanofibres for active filtration of air and water. *Journal of Biobased Materials and Bioenergy*. 2009;3(3):311-9.
39. Hou X, Yang X, Zhang L, Waclawik E, Wu S. Stretching-induced crystallinity and orientation to improve the mechanical properties of electrospun PAN nanocomposites. *Materials & Design*. 2010;31(4):1726-30.
40. Liu J, Zeng B, Wu Z, Zhu J, Liu X. Improved field emission property of graphene paper by plasma treatment. *Applied Physics Letters*. 2010;97(3):033109.
41. Dehghan SF. The experimental development of nonwoven nanofibrous filter media for air filtration of nano-sized particles: Tehran University of Medical Sciences. Doctoral Thesis ; 2016.
42. Zhang Q, Welch J, Park H, Wu C-Y, Sigmund W, Marijnissen JC. Improvement in nanofiber filtration by multiple thin layers of nanofiber mats. *Journal of Aerosol Science*. 2010;41(2):230-6.
43. 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.
44. Yun KM, Hogan CJ, Matsubayashi Y, Kawabe M, Iskandar F, Okuyama K. Nanoparticle filtration by electrospun polymer fibers. *Chemical Engineering Science*. 2007;62(17):4751-9.

## Possibility of using plasma-processed hybrid nanofibers to remove toluene in air stream

Somayeh Farhang Dehghan<sup>1</sup>, Farideh Golbabaie<sup>2,\*</sup>, Asghar Sedigh Zadeh<sup>3</sup>,  
Hamzeh Mohammadi<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Department of Occupational Health and Safety at Work, Workplace Health Promotion Research Center, School of Public Health and Safety, Shahid Beheshti University of Medical Sciences, Tehran, Iran

<sup>2</sup> Department of Occupational Health, Tehran University of Medical Sciences, Tehran, Iran

<sup>3</sup> Nuclear Fusion Research Center, Atomic Energy Organization, Tehran, Iran

<sup>4</sup> School of Public Health, Tehran University of Medical Sciences, Tehran, Iran

\*Corresponding Author Email: [fgolbabaie@tums.ac.ir](mailto:fgolbabaie@tums.ac.ir)

Received: 2018-08-08, accepted: 2019-02-13

### ABSTRACT

**Introduction:** Despite nanofibers have attracted great interests for filtering particulate matters from the air stream, fewer studies have been done on the feasibility of their use in the removal of gas pollutants, while the both pollutants are present in the most workplaces. Toluene is a toxic and mutagenic substance, and chronic exposure to its low levels can lead to a wide range of adverse health effects on people who exposed. The purpose of this study was to produce polymer /single-walled carbon nanotube hybrid nanofibers by electrospinning technique and doing plasma surface treatment and evaluating their removal efficiency of toluene from air stream.

**Material and Methods:** The nanofiber layers were fabricated by electrospinning solution containing polyacrylonitrile polymer (PAN) and single-walled carbon nanotube (SWNT) with a 99: 1 ratio under following conditions: applied voltage 20 kV, distance between needle and collector: 10 cm, injection rate: 1 ml / h; needle diameter: 18 gauge and drum speed ranging from 1000 to 500 rpm. The surface of the manufactured nanofibers was treated by cold-plasma with a radio frequency power supply (13.56 MHz with a power of 20 watts), argon gas and operating pressure of 0.2 torr. Test conditions was prepared according to standard ISO 10121-1: 2014, which provides a method for testing the performance of gas-phase air filter for a variety of flat sheet media. In order to measure the concentration of toluene, the First check – handheld multi gas VOC detector equipped with a PID detector was used. The morphology characteristics of the fibers was performed using the analysis of scanning electron microscope images. Infrared spectroscopy-Fourier transform was used to identify organic compounds and functional groups in nanofibers.

**Results:** The results of the analysis of the images showed that the mean diameter of the fiber was  $169.16 \pm 7.19$  nm and the mean coefficient of variation was 0.23. The uniform and bead nanofibers were obtained. The thickness, porosity and air permeability coefficient of test media was 0.15 mm, 43% and 5.75 Darcy, respectively. The mean removal efficiency of PAN / SWNT nanofiber treated with plasma was 98% and the mean pressure drop was 100 Pascal. The FTIR spectrum of the test filter media showed that the peaks appearing at certain wavelengths related to the vibration of C-H aliphatic groups of C-C and C=O bands related to PAN polymer and carbon nanotubes.

**Conclusion:** Removal of toluene was achieved through the fabrication of PAN/SWNT hybrid nanofibers treated with plasma. Uniform nanofibers were obtained and showed the proper removal efficiency and low pressure drop.

**Keywords:** PAN and SWNT Hybrid Nanofibers, Cold Plasma Treatment, Removal Efficiency, Toluene

#### HOW TO CITE THIS ARTICLE

Farhang Dehghan S, Golbabaie F, Sedigh Zadeh A, Mohammadi A. (2019). Possibility of using plasma-processed hybrid nanofibers to remove toluene in air stream. *Journal of Health and Safety at Work*, 9(3): 179-190.

#### COPYRIGHTS

Copyright for this article is retained by the author(s), with publication rights granted to the Journal of Health and Safety at Work. This is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution. License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

