

## بررسی پارامترهای موثر بر فیلتراسیون نانو ذرات از هوا با استفاده از فیلترهای نانولیفی پلی اورتان

۲۹

مجید حبیبی محرز<sup>۱</sup> - فریده گل‌بابایی<sup>۲\*</sup> - ایل ج یو<sup>۲</sup> - اصغر صدیق زاده<sup>۴</sup> - محمد علی منصورنیا<sup>۵</sup> - سمیه فرهنگ دهقان<sup>۶</sup>  
fgolbabaei@sina.tums.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۶/۳ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۸/۲۰

### چکیده

**مقدمه:** نانوالیاف ساخته شده از طریق فرآیند الکتروریسی گزینه مناسبی جهت ساخت بسترهای فیلترکننده ذرات ریز مقیاس معرفی شده‌اند. مطالعه حاضر با هدف ساخت بسترهای نانولیفی پلی اورتان از طریق فرآیند الکتروریسی و بررسی تاثیر پارامترهای مختلف از قبیل دانسیته فشردگی، سرعت سطحی فیلتراسیون و نوع ذره تست بر راندمان فیلتراسیون نانو ذرات از هوا و عامل کیفیت بسترهای نانولیفی پلی اورتان انجام گرفت.

**روش کار:** بسترهای نانولیفی از طریق فرآیند الکتروریسی محلول پلیمر پلی اورتان (۱۵ درصد وزنی) با سیستم حلال متشکل از دی متیل فرمامید و تتراهیدروفوران با نسبت اختلاط ۳ به ۲ تولید گردیدند. سپس سیستم تست عمل کرد فیلتراسیون در آزمایش گاه گروه مکانیک سیالات دانشگاه هانیانگ کشور کره جنوبی ساخته شد و راندمان فیلتراسیون و افت فشار بسترهای تولیدی مورد بررسی قرار گرفتند.

**یافته‌ها:** افزایش مدت زمان الکتروریسی، موجب افزایش دانسیته فشردگی، افت فشار اولیه و راندمان فیلتراسیون بسترها می شود و عامل کیفیت بسترها به دلیل افزایش افت فشار کاهش می یابد. با افزایش زمان الکتروریسی از ۱۵ دقیقه به ۴۵ دقیقه، افت فشار بستر از ۷ به ۳۲ پاسکال افزایش یافته و میانگین درصد کارایی به طور متوسط بین ۹-۱۰ درصد برای ذرات تست KCl و DEHS اضافه شد. هم چنین نتایج نشان داد که با افزایش سرعت سطحی از ۲ سانتی متر در ثانیه به ۵ و ۱۰ سانتی متر در ثانیه، راندمان فیلتراسیون برای ذرات با اندازه کم تر از ۴۲۵ نانومتر و عامل کیفیت در تمامی سایزها کاهش می یابد.

**نتیجه گیری:** با توجه به نتایج فوق می توان نتیجه گیری نمود که بسترهای ساخته شده از لحاظ راندمان فیلتراسیون و عامل کیفیت مقادیر قابل قبولی را به منظور کاربردهای فیلتراسیونی دارا می باشند. علاوه براین ضخامت و وزن پایه کم و هم چنین سهولت در تولید نیز از دیگر مزایای بسترهای نانولیفی نسبت به بسترهای معمول می باشد.

### کلمات کلیدی: نانو ذرات، نانوالیاف، پلی اورتان، راندمان فیلتراسیون، عامل کیفیت

- ۱- دکتری تخصصی، گروه مهندسی بهداشت حرفه ای، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی تهران، تهران، ایران
- ۲- استاد، گروه مهندسی بهداشت حرفه ای، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی تهران، تهران، ایران
- ۳- استاد، انستیتو تحقیقات ایمنی محصولات نانو، دانشگاه هوسئو، آسان، کره جنوبی
- ۴- دانشیار، آزمایشگاه مهندسی محیط، پژوهشگاه علوم و فنون هسته ای، تهران، تهران، ایران
- ۵- استادیار، گروه اپیدمیولوژی و آمار زیستی، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی تهران، تهران، ایران
- ۶- استادیار، گروه مهندسی بهداشت حرفه ای، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی، تهران، ایران

### مقدمه

در سال های اخیر با توسعه فن آوری نانو، کاربرد نانو مواد در صنایع و محصولات مختلف افزایش یافته است. همین امر باعث شده است که انتشار این مواد در محیط و هم چنین مواجهه افراد با این دسته از مواد افزایش یابد (۱). علاوه بر این نانو ذرات (به عنوان موادی با سه بعد خارجی در مقیاس نانو (۱-۱۰۰ نانومتر) به علت خصوصیات فیزیکی منحصر به فرد می توانند اثرات سوء در محیط ایجاد نمایند. به عنوان مثال نانو ذرات به دلیل اندازه کوچک مدت زمانی بیش تری در هوا باقی می مانند و پس از مواجهه تنفسی قادر هستند با عبور از بخش فوقانی و میانی سیستم تنفسی وارد حبابچه های ریوی شده و اثرات ناخوشایندی بر بافت ریه بگذارند و یا این که با ورود به جریان خون به سمت ارگان های هدف خود حرکت نمایند (۲، ۳). این امر اهمیت نانوفیلتراسیون را که یکی از بخش های نوظهور فن آوری فیلتراسیون می باشد بیش از پیش افزایش داده است (۴). در حال حاضر فن آوری های مختلفی برای حذف ذرات از هوا وجود دارد که عبارتند از سیکلون ها، اسکرابرها، ته نشین کننده های الکترواستاتیکی و غیره. ولی با وجود این، به دلیل سهولت به کارگیری، دسترسی آسان، هزینه کم و راندمان بالا برای جمع آوری موثر (با راندمان بالاتر از ۹۹ درصد) ذرات ریز با قطر پایین تر از یک میکرومتر، جایگزین بهتری از فیلترهای فیبری وجود ندارد (۵-۷). نانوالیاف ساخته شده از طریق فرآیند الکتروریسی به دلیل خصوصیات همانند قطر کمتر نانولیف ها، سطح ویژه و تخلخل بالا و هم چنین ایجاد جریان لغزشی در برابر هوای عبوری گزینه مناسبی جهت ساخت بسترهای فیلترکننده ذرات ریز مقیاس می باشند (۸). الکتروریسی فرآیندی است که در آن بسترهای نانولیفی با استفاده از شارژ با ولتاژ

بالای یک محلول پلیمری یا نانوکامپوزیتی تولید می شوند (۹). تاکنون پلیمرهای مختلفی از قبیل پلی اکریلونیتریل، پلی آمید، پلی وینیلیدین کلراید، پلی اتیلن و پلی وینیل الکل به منظور ساخت بسترهای نانولیفی با استفاده از الکتروریسی مورد استفاده قرار گرفته اند (۱۰، ۱۱) ولی با وجود این که پلی اورتان دارای خصوصیات فیزیکی مناسبی از قبیل مقاومت مکانیکی و کشسانی بالا، دوام و عدم حلالیت در آب، سطح متخلخل جهت جذب آلاینده های گازی و ... می باشد کمتر مورد مطالعه قرار گرفته است (۱۲). مطالعه حاضر با هدف ساخت بسترهای نانولیفی پلی اورتان از طریق فرآیند الکتروریسی و بررسی تاثیر پارامترهای مختلف از قبیل دانسیته فشردگی، نوع ذره تست و سرعت سطحی فیلتراسیون بر راندمان فیلتراسیون و عامل کیفیت بستر نانولیفی پلی اورتان به منظور فیلتراسیون نانو ذرات انجام گرفت.

### روش کار

#### مواد

پلیمر پلی اورتان ( $MW=2 \times 10^5$ ) از شرکت Lubrizol آمریکا خریداری گردید. حلال های دی متیل فرمامید (DMF) ( $MW=73.09g/mol$ )، تتراهیدروفوران (THF) ( $MW=72.11g/mol$ ) از شرکت مرک آلمان، پودر کلرید پتاسیم (KCl) ( $MW=74.55g/mol$ ) و دی اتیل هگزیل سباسات (DEHS) ( $MW=426.67g/mol$ ) از شرکت سیگما آلدریج آمریکا خریداری شد.

#### ساخت بسترهای نانولیفی

پلیمر پلی اورتان برای ایجاد غلظت ۱۵ درصد وزنی به مخلوط حلال متشکل از دی متیل

به طور تصادفی انتخاب شدند و قطر آن ها مورد سنجش قرار گرفت. وزن پایه نانوالیاف به وسیله تقسیم نمودن وزن نمونه ای از بستر بر سطح موثر آن (دایره ای به شعاع ۱۰ میلی متر از مرکز هر نمونه) به دست آمد. ضخامت بستر نانو لیفی در چند نقطه از آن وبا استفاده از یک کالیپر دیجیتال (ACCUP, Austria) اندازه گیری گردید. دانسیته فشردگی نشان دهنده حجم جامد بستر در واحد حجم آن می باشد. دانسیته فشردگی در واقع عکس تخلخل است

$[\varepsilon = 1 - \alpha]$  که بخش خالی از فضای سه بعدی بستر می باشد. دانسیته فشردگی نانوالیاف با استفاده از فرمول (۱) محاسبه شد (۱۳،۱۴).

$$\alpha = \frac{W}{\rho_f \times Z} \quad (1)$$

در این معادله  $W$  وزن پایه بستر نانولیفی (وزن نانوالیاف در واحد سطح بستر بر حسب گرم بر متر مربع)،  $\rho$  دانسیته مواد نانو الیاف (گرم بر متر مکعب) و  $Z$  ضخامت بستر نانولیفی(متر) می باشد.

#### طرح سیستم تست و اجزای آن

شکل شماره(۱) اجزای سیستم تست مورد استفاده را نشان می دهد. این سیستم از سه قسمت شامل بخش مولد نانو ذرات، سیستم تامین و تنظیم جریان و سیستم اندازه گیری غلظت و افت فشار تشکیل شده است. قابل ذکر است این سیستم در آزمایش گاه گروه مکانیک سیالات دانشگاه هانیانگ و تحت حمایت انستیتو محصولات نانو کشور کره جنوبی طراحی شد و به منظور بررسی راندمان و افت فشار بسترهای تولیدی مورد استفاده قرار گرفت.

فرمامید و تتراهیدروفوران با نسبت اختلاط ۳ به ۲ اضافه گردید و با استفاده از هم زن مغناطیسی در دمای اتاق (Standard-Hei MR: Heidolph) به مدت ۱۲ ساعت محلول یکنواختی از پلی اورتان آماده گردید.بسترهای نانولیفی از طریق فرآیند الکترورسی و با استفاده از دستگاه الکترورسی (شرکت فناوران نانو مقیاس، ایران) تولید شدند. برای این منظور ابتدا محلول پلیمری به سرنگی با قطر سوزن شماره ۲۱ انتقال داده شد و سپس پارامترهای الکترورسی بر اساس نتایج به دست آمده از مطالعه پایلوت در شرایط ذکر شده، تنظیم گردید : فاصله سر سوزن تا صفحه جمع آوری کننده ۱۰ سانتی متر، ولتاژ اعمال شده ۱۵ کیلو ولت، مقدار تزریق ۰/۳ میلی لیتر در ساعت و دمای ۲۵ درجه سانتی گراد. از آن جایی که بستر های نانولیفی به دلیل ضخامت کم مقاومت مکانیکی ضعیفی دارند، معمولاً این بسترها را روی زیر لایه های میکرولیفی آماده سازی می نمایند، البته با این شرط که این بسترها به گونه ای انتخاب شوند که افت فشار و نقش فیلتراسیونی ناچیزی داشته باشند. در مطالعه حاضر از زیر لایه ای از پارچه اسپان باند پلی پروپیلن با وزن پایه ۱۷ گرم بر مترمربع و ضخامت ۱۵۰ میکرومتر (شرکت بافتینه، ایران) استفاده شد.

#### تعیین مشخصات بسترهای الکترورسی شده

مطالعه ریخت شناسی و تعیین میانگین قطر نانوالیاف از روی میکروگراف های میکروسکوپ الکترونی روبشی (Hitachi, Tokyo, Japan) و با استفاده از نرم افزار آنالیز تصویر (ImageJ 1.44p) انجام شد. به منظور تعیین میانگین قطر نانوالیاف با استفاده از نرم افزار آنالیز تصویر، ۵۰ نانولیف

به منظور بررسی راندمان فیلتراسیون بسترها از دو نوع آئروسول شامل آئروسول های جامد کلرید پتاسیم (KCl) و آئروسول های مایع دی اتیل هگزیل سبسات (DEHS) استفاده شد. برای تولید نانو ذرات کلرید پتاسیم و دی اتیل هگزیل سبسات با دامنه اندازه ۱۰ تا ۱۰۰۰ نانومتر از یک اتمایزر استفاده گردید (HCT Co., Ltd., Korea, 4810). سوسپانسیون ۰/۰۱ درصد کلرید پتاسیم در آب و دی اتیل هگزیل سبسات در ایزوپروپیل الکل به وسیله اختلاط ۲۰ دقیقه ای توسط هم زن برقی آماده سازی گردیدند و در اتمایزر مورد استفاده قرار گرفتند. راندمان فیلتراسیون ذرات با اندازه مشخص با استفاده از فرمول (۲) محاسبه گردید (۱۵)

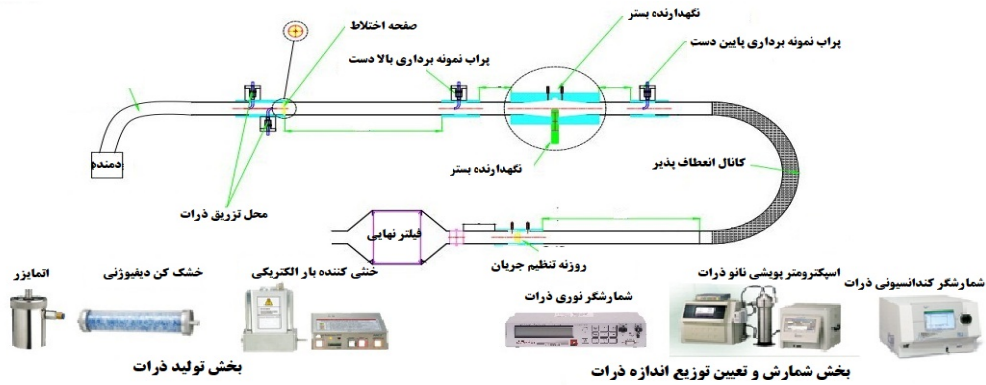
$$\eta_{0F}(d_p) = 1 - \frac{C_{downstream}(d_p)}{C_{upstream}(d_p)} \quad (2)$$

در این فرمول،  $\eta_{0F}$  راندمان فیلتراسیون برای ذره با اندازه  $d_p$  (نانومتر)،  $C$  (غلظت شمارشی ذرات با اندازه  $d_p$  تعداد ذره در سانتی متر مکعب) می باشد. عامل کیفیت بسترها در سرعت های سطحی مختلف با استفاده از فرمول (۳) محاسبه گردید (۱۶).

$$q_f = \frac{\ln\left(\frac{1}{1-\eta_{0F}}\right)}{\Delta p} \quad (3)$$

در این فرمول  $q_f$  فاکتور کیفیت ( $Pa^{-1}$ )،  $\Delta p$  افت فشار (پاسکال) و  $\eta_{0F}$  مقدار راندمان فیلتراسیون برای اندازه ذره  $d_p$  (نانومتر) می باشد. برای هر نمونه از بستر نانولیفی در سرعت های سطحی فیلتراسیون مختلف، پارامترهای افت فشار، راندمان فیلتراسیون و عامل کیفیت اندازه گیری گردید.

هوای ورودی به مولد نانو ذرات توسط سیستم تامین هوایی که متشکل از بدام اندازنده مواد روغنی، خشک کن انتشاری و فیلتر هوای با راندمان بالا بود، تامین گردید. به منظور حذف رطوبت، جریان ذرات اتمیزه شده در مولد پس از عبور از خشک کن انتشاری (HCT Co., Ltd., Korea, 4920) وارد سیستم تست گردید. در سیستم تست بسترها از هوای تصفیه شده با فیلترهای با عمل کرد بالا به منظور رقیق سازی غلظت ذرات تست استفاده شد. بستر های نانولیفی مورد تست در نگه دارنده مخصوص قرار داده شد و نمونه برداری از بالادست و پایین دست بستر از طریق دو پراب به طور متناوب و با اختلاف زمانی پنج دقیقه انجام گردید. تراکم عددی و توزیع اندازه ذرات ورودی و خروجی از هر نمونه با استفاده از سیستم اسپکترومتر پویشی نانو ذرات (SNPS, HCT Co., Ltd., Korea) که شامل یک ایمپکتور، طبقه بندی کننده الکترواستاتیکی مجهز به ستون آنالیزگر افتراقی مبتنی بر تحرک پذیری الکتریکی ذره (DMA) متصل شده به شمارش گر کندانسیونی ذرات (CPC, model 3022A, TSI Inc., Shoreview, MN, USA Model 1.1.09, Grimm) و غبار (Technologies Inc., Douglasville, GA, USA) پایش گر گرد و غبار (Model 1.1.09, Grimm) بود، اندازه گیری گردید. شکل شماره (۲) توزیع اندازه قطر نانو ذرات مورد استفاده در آزمایشات را نشان می دهد. بسترهای نانولیفی در سرعت های سطحی مختلف شامل ۲، ۵، ۱۰ سانتی متر در ثانیه مورد آزمون قرار گرفتند. افت فشار ایجاد شده توسط بسترها در تست های فیلتراسیون با استفاده از فشار سنج دیجیتالی اندازه گیری گردید. (Model CP 110, Kimo Co, France)

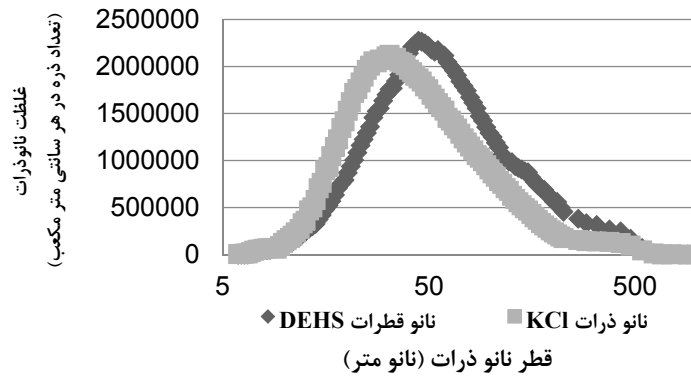


شکل ۱. اجزای سیستم تست مورد استفاده برای تست عملکرد فیلتراسیون بسترها

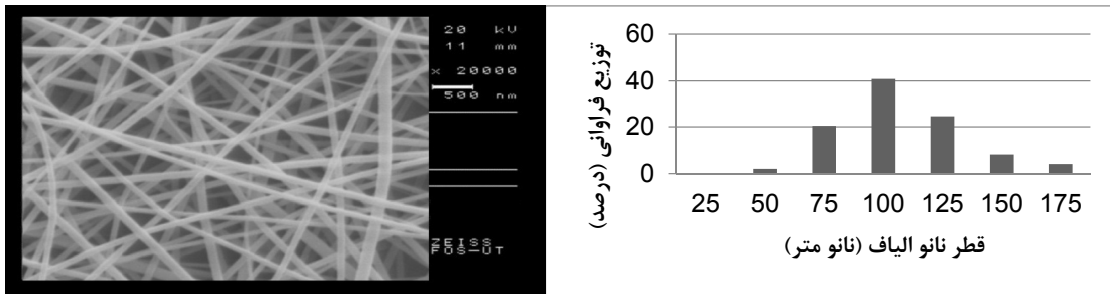
### یافته ها

۱/۹۸ و برای نانو ذرات دی اتیل هگزیل سبسات به ترتیب ۴۳ نانومتر و ۱/۹۷ به دست آمد. شکل (۳) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) از نانوالیافی پلی اورتان با قطر میانگین ۱۲۹ نانومتر به همراه توزیع فراوانی قطر نانوالیاف را نشان می دهد.

شکل (۲) توزیع سایزی نانو ذرات کلرید پتاسیم و دی اتیل هگزیل سبسات مورد استفاده برای تست بسترهای ساخته شده را نشان می دهد. مقادیر میانگین و انحراف معیار هندسی اندازه قطر نانو ذرات کلرید پتاسیم به ترتیب ۳۹ نانومتر و



شکل ۲. توزیع سایزی نانوذرات مورد استفاده در تست بسترها



شکل ۳. تصویر SEM از نانوالیاف پلی اورتان با قطر میانگین ۱۲۹ نانومتر به همراه توزیع فراوانی قطر نانوالیاف

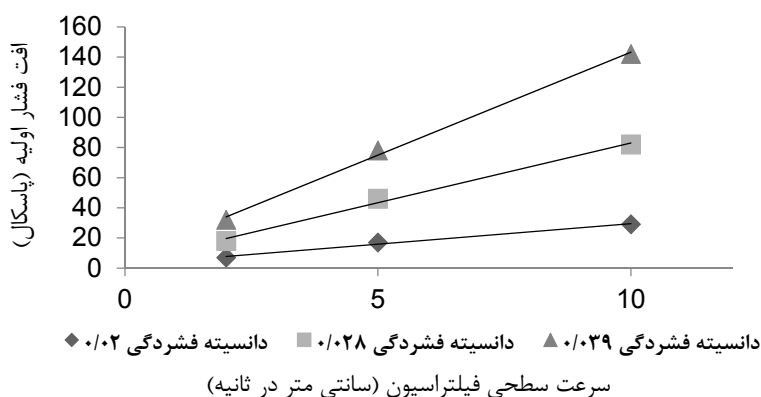
هر سه سرعت سطحی افزایش دانسیته فشردگی با افزایش افت فشار اولیه همراه بوده است به طوری که کم ترین مقدار افت فشار اولیه به میزان ۷ پاسکال و مربوط به بستر با دانسیته فشردگی ۰/۰۲ در سرعت سطحی ۲ سانتی متر در ثانیه و بیش ترین مقدار افت فشار ۱۴۲ پاسکال برای بستر با دانسیته فشردگی ۰/۰۳۹ در سرعت سطحی ۱۰ سانتی متر در ثانیه اندازه گیری شد.

جدول شماره (۱) خصوصیات و مشخصات فیزیکی مهم سه بستر نانولیفی پلی اورتان مورد مطالعه (با زمان های الکترورسی مختلف) را نشان می دهد که عبارتند از قطر نانولیف، ضخامت بستر، وزن پایه، دانسیته فشردگی و افت فشار اولیه و هم چنین میانگین راندمان فیلتراسیون و عامل کیفیت آن ها در سرعت سطحی ۲ سانتی متر در ثانیه (به عنوان سرعت سطحی بهینه از لحاظ افت فشار ایجاد شده در بسترها) برای دامنه سایزی ۱۰ تا ۱۰۰۰ نانومتر. همان طور که مشاهده شده است با افزایش مدت زمان الکترورسی و وزن پایه، ضخامت، دانسیته فشردگی، افت فشار اولیه و راندمان فیلتراسیون بسترها افزایش و عامل کیفیت بسترها به دلیل افزایش افت فشار کاهش یافته است. با افزایش زمان

شکل (۳) نانولیف پلی اورتان تولید شده به وسیله فرآیند الکترورسی را در شرایطی که غلظت محلول پلیمری ۱۵ درصد وزنی- حجمی، ولتاژ اعمال شده ۱۵ کیلو ولت، فاصله سوزن تزریق تا کالکتور ۱۰ سانتی متر و میزان تزریق پلیمر ۰/۳ میلی لیتر در ساعت بود، نشان می دهد. بر اساس این شکل، الیف از لحاظ خصوصیات ساختاری دارای ساختاری یکنواخت (ضریب تغییرات = ۰/۱۷) و فاقد گره (دانه) بودند. در مواردی که ضریب تغییرات (نسبت انحراف معیار قطر لیف به میانگین قطر) کم تر از ۰/۳ باشد، نوع مورفولوژی یکنواخت و در غیر این صورت غیر یکنواخت در نظر گرفته می شود (۱۳).

شکل (۴) افت فشار اولیه بسترهای پلی اورتان با دانسیته فشردگی ۰/۰۲، ۰/۰۲۸ و ۰/۰۳۹ را در سرعت های سطحی ۲، ۵ و ۱۰ سانتی متر در ثانیه نشان می دهد.

نتایج ارایه شده در شکل (۴) نشان می دهد که با افزایش سرعت سطحی فیلتراسیون از ۲ به ۵ و ۱۰ سانتی متر در ثانیه، افت فشار اولیه بستر نانو لیفی پلی اورتان در هر سه دانسیته فشردگی به صورت خطی افزایش یافته است. هم چنین در



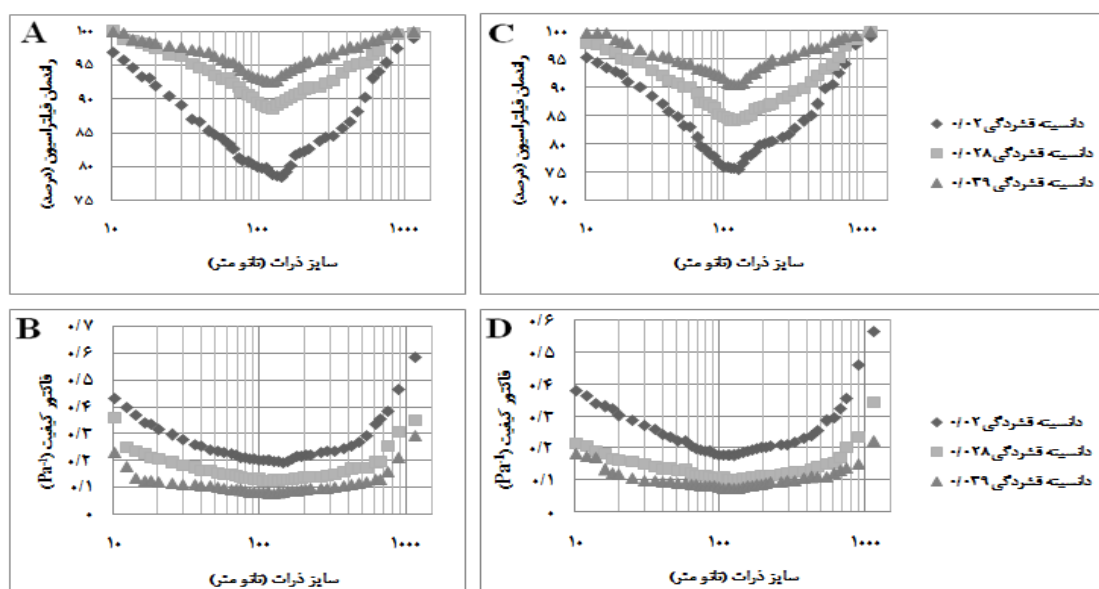
شکل ۴. افت فشار اولیه بسترهای پلی اورتان با دانسیته فشردگی ۰/۰۲، ۰/۰۲۸ و ۰/۰۳۹ در سرعت های سطحی مورد ۲، ۵ و ۱۰ سانتی متر در ثانیه

الکتروروسی از ۱۵ دقیقه به ۴۵ دقیقه، افت فشار بستر از ۷ تا ۳۲ پاسکال افزایش و میانگین درصد کارایی به طور متوسط بین ۹-۱۰ درصد برای ذرات تست KCl و DEHS بالاتر رفته است. عامل کیفیت نیز طور متوسط بین ۰/۱۶-۰/۱۵ واحد کاهش یافته است.

شکل (۵) راندمان فیلتراسیون و عامل کیفیت بسترهای تک لایه با دانسیته فشردگی متفاوت (۰/۰۲، ۰/۰۲۸، ۰/۰۳۹) را در سرعت سطحی ۲ سانتی متر در ثانیه نشان می دهد.

همان طور که در شکل (۵) نشان داده شده است با افزایش دانسیته فشردگی، راندمان فیلتراسیون بسترها به خصوص در اندازه های ذرات ۲۰ تا ۶۰۰ نانومتر بهبود یافته است. نتایج جدول (۱) و شکل (۵) (A و C) حاکی از این است که راندمان فیلتراسیون از دانسیته فشردگی ۰/۰۲ به ۰/۰۲۸ به میزان قابل توجهی بهبود یافته است و از دانسیته فشردگی ۰/۰۲۸ به ۰/۰۳۹ نیز تا حدودی

افزایش راندمان را شاهد بوده ایم. هم چنین میانگین افت فشار اولیه برای بسترهای با دانسیته فشردگی ۰/۰۲، ۰/۰۲۸ و ۰/۰۳۹ در سرعت سطحی ۲ سانتی متر در ثانیه به ترتیب مقادیر ۷، ۱۸ و ۳۲ پاسکال به دست آمد. اثر افزایش افت فشار اولیه به دلیل افزایش دانسیته فشردگی بر روی عامل کیفیت بسترها در شکل (۵) (B و D) نشان داده شده است، نتایج به دست آمده نشان می دهد که اگرچه افزایش دانسیته فشردگی باعث بهبود راندمان فیلتراسیون بسترها شده ولی افزایش افت فشار ناشی از افزایش دانسیته فشردگی موجب کاهش مقادیر عامل کیفیت آن ها شده است. هم چنین مقایسه میانگین راندمان فیلتراسیون بسترهای مختلف نشان می دهد که راندمان فیلتراسیون تمامی بسترها برای نانو ذرات کلرید پتاسیم به طور جزیی بالاتر از نانو ذرات دی اتیل هگزیل سبسات می باشد. به عنوان مثال میانگین راندمان فیلتراسیون و عامل کیفیت برای بستر پلی اورتان با



شکل ۵. راندمان فیلتراسیون و عامل کیفیت بسترهای نانولیفی پلی اورتان با دانسیته فشردگی مختلف در برابر نانو ذرات جامد KCl (A و B) و نانو ذرات مایع DEHS در سرعت سطحی ۲ سانتی متر در ثانیه (C و D)

عامل کیفیت برای هر سه بستر با مقادیر دانسیته فشرده‌گی مختلف در اثر تغییر سرعت سطحی فیلتراسیون تقریباً مشابه بود، نتایج مربوط به بستر با دانسیته فشرده‌گی ۰/۰۲ (به عنوان بستر بهینه از لحاظ میزان عامل کیفیت) به منظور بررسی اثر تغییر سرعت سطحی بر عمل کرد فیلتراسیونی بسترها در شکل (۶) ارایه گردید.

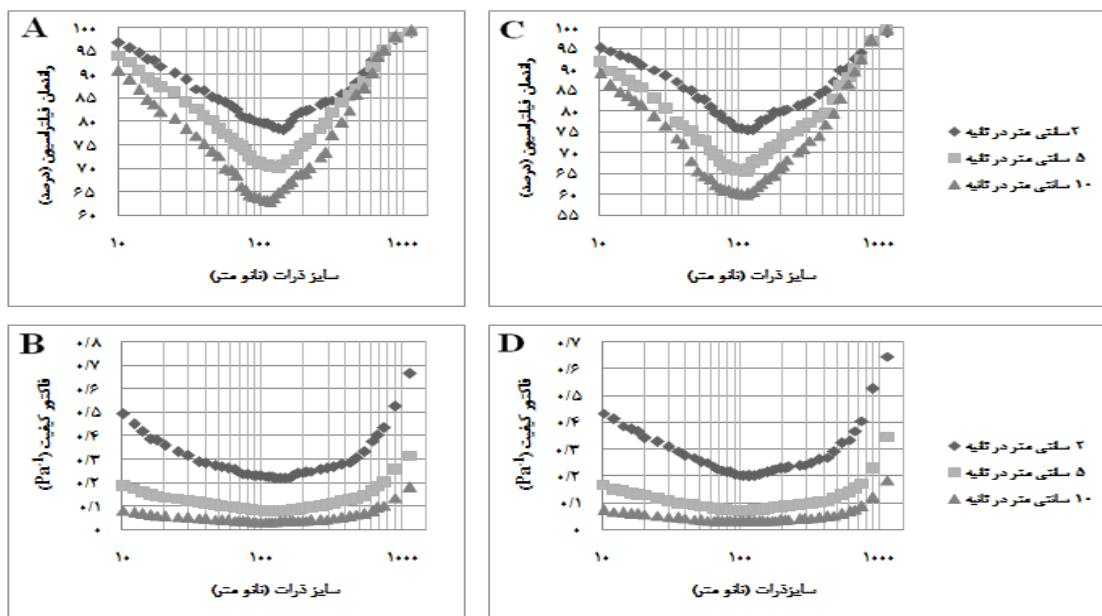
تاثیر افزایش سرعت سطحی بر روی راندمان و عامل کیفیت بستر پلی اورتان با دانسیته فشرده‌گی ۰/۰۲ در برابر نانو ذرات جامد KCl (B و A) و نانو ذرات مایع DEHS (D و C) در شکل (۶) نشان داده شده است.

نتایج به دست آمده از شکل (۶) نشان می دهد که راندمان فیلتراسیون و عامل کیفیت بستر پلی اورتان برای هر دو نوع نانو ذره با افزایش سرعت سطحی فیلتراسیون کاهش یافته است. البته میزان این کاهش برای ذرات با اندازه کم تر از ۴۲۵ نانومتر

زمان الکتروریسی ۱۵ دقیقه برای نانو ذرات KCl و نانو قطرات DEHS به ترتیب ۸۶/۰۹ درصد، ۰/۲۶۶ (Pa<sup>-1</sup>) و ۸۴/۳ درصد و ۰/۲۵ (Pa<sup>-1</sup>) می باشد.

اندازه ذره دارای حداکثر میزان نفوذ (MPPS) برای بسترهای با دانسیته فشرده‌گی ۰/۰۲، ۰/۰۲۸ و ۰/۰۳۹ برای نانو ذرات KCl به ترتیب ۱۳۵، ۱۴۶ و ۱۳۰ نانومتر و برای نانو قطرات DEHS به ترتیب ۱۲۶، ۱۱۸ و ۱۱۳ نانومتر می باشد که نشان دهنده کاهش اندازه ذره دارای حداکثر میزان نفوذ با افزایش دانسیته فشرده‌گی می باشد. از طرفی نتایج جدول (۱) نشان داد که با افزایش زمان الکتروریسی قطر نانولیف ها بطور جزئی افزایش یافته است، به طوری که قطر میانگین نانولیف ها برای زمان های الکتروریسی ۱۵، ۳۰ و ۴۵ به ترتیب ۱۲۹، ۱۳۲ و ۱۳۷ نانومتر به دست آمد.

با توجه به این که تغییرات پارامترهای عمل کرد فیلتراسیونی همانند افت فشار، راندمان و



شکل ۶. راندمان و عامل کیفیت فیلتراسیون بستر پلی اورتان در برابر نانو ذرات جامد KCl (A و B) و نانو ذرات مایع DEHS (C و D) در سرعت های سطحی موردتست

ملموس تر می باشد و برای اندازه های بزرگتر راندمان فیلتراسیون بستر در سرعت های سطحی مختلف مقادیر نزدیکی می باشد.

هم چنین شکل (۶) نشان می دهد که اندازه دارای حداکثر میزان نفوذ ذره برای بستر پلی اورتان در سرعت های سطحی فیلتراسیون ۲، ۵ و ۱۰ سانتی متر در ثانیه برای نانو ذرات KCl به ترتیب ۱۴۶، ۱۳۵ و ۱۱۸ نانومتر و برای نانو قطرات DEHS به ترتیب ۱۲۶، ۱۱۸ و ۱۱۴ نانومتر می باشد. این یافته ها نشان می دهد که افزایش سرعت سطحی منجر به کاهش MPPS می گردد.

### بحث

ضخامت، وزن پایه، دانسیته فشردگی و قطر لیف ها از مهم ترین خصوصیات بسترهای فیلتراسیونی هستند که تاثیر زیادی بر روی راندمان و افت فشار ایجاد شده توسط این بسترها دارند. نتایج به دست آمده از مطالعه حاضر نشان داد که با افزایش مدت زمان الکتروروسی وزن پایه، ضخامت، دانسیته فشردگی، افت فشار اولیه و راندمان فیلتراسیون بسترها افزایش و عامل کیفیت بسترها به دلیل افزایش افت فشار کاهش یافته است. در مطالعه‌ی مچوله‌ویسیاس و همکاران (۲۰۱۶) نشان داده شد که ویژگی‌های ریخت شناسی و اندازه قطر لیف ممکن است تنها عوامل حاکم در عمل کرد فیلتراسیون نباشد و در این مورد، ضخامت، وزن پایه و دانسیته فشردگی اثر قابل توجه‌تری را ایفا می‌کنند. آن‌ها اختلاف وزن پایه را ناشی از تفاوت در طول زمان الکتروروسی یا همان زمان جمع‌آوری نمونه دانستند (۱۷). در مطالعه حاضر با افزایش دانسیته فشردگی از ۰/۰۲ به ۰/۰۲۸ و ۰/۰۳۹ میانگین راندمان فیلتراسیون برای نانو ذرات KCl در محدود سایزی ۱۰ تا ۱۰۰۰ نانومتر از ۸۶/۰۹ درصد به ترتیب ۷/۵ و ۲/۶۴

درصد افزایش نشان داد و برای نانو ذرات DEHS نیز در همان محدوده سایزی میانگین راندمان از ۸۴/۳ درصد به ترتیب ۵/۸۹ و ۴/۸۲ درصد افزایش داشت. با توجه به این که زمان الکتروروسی بسترها به ترتیب ۱۵، ۳۰ و ۴۵ دقیقه بود نتایج به دست آمده حاکی از این بود که افزایش زمان الکتروروسی از ۱۵ به ۳۰ دقیقه تاثیر کم تری در بهبود راندمان فیلتراسیون داشته است، در حالی که افت فشار بستر افزایش یافته است. به نظر می رسد در فیلترهای نانولیفی با افزایش زمان الکتروروسی پس از مدتی با افزایش ضخامت بستر تنها لایه های اولیه نانو الیاف نقش فیلتراسیونی را ایجاد می نمایند و لایه های بعدی کم تر در فرآیند فیلتراسیون شرکت نموده و از طرفی باعث افزایش افت فشار بستر می گردند، بنابراین یافتن نقطه تعادل میان خصوصیات بستر و راندمان و افت فشار ایجاد شده توسط آن می تواند به به کارگیری بهینه از این بسترها کمک نماید. بر اساس یافته های جدول (۱) بسترهای با دانسیته فشردگی کم تر به دلیل ایجاد افت فشار کم در برابر عبور جریان هوا از عامل کیفیت بالایی برخوردار می باشند. به طور مثال میانگین افت فشار اولیه و میانگین عامل کیفیت بستر پلی اورتان (در سرعت سطحی ۲ سانتی متر در ثانیه و نانو ذرات KCl) به ترتیب از ۷ پاسکال و ۰/۲۶۶ برای زمان الکتروروسی ۱۵ دقیقه به ۱۸ پاسکال و ۰/۱۷ برای زمان الکتروروسی ۳۰ دقیقه و ۳۲ پاسکال و ۰/۱۱ برای زمان الکتروروسی ۴۵ دقیقه تغییر یافت. این یافته ها با نتایج سایر مطالعات نیز هم خوانی دارد. به طوری که وانگ (Wang) و همکارانش (۲۰۰۸) با بررسی عامل کیفیت فیلترهایی متشکل از یک لایه نانولیف بر روی یک بستر میکرولیفی بی‌بافت، 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

کننده برای افزایش دانسیته فشردگی بسترها می باشد و یافتن یک نقطه تعادل میان افت فشار و راندمان از طریق تعیین زمان بهینه الکترورسی جهت دست یابی به عامل کیفیت قابل قبول ضروری می باشد که البته این نقطه تعادل به میزان زیادی به این بستگی دارد که چه مقدار راندمان و افت فشار مطلوب مصرف کننده می باشد، چون نتایج مطالعه حاضر نشان داد که اگر چه بسترهای با دانسیته فشردگی بالاتر راندمان بالاتری دارند اما بستر با دانسیته فشردگی پایین به دلیل ایجاد افت فشار کم، عامل کیفیت مطلوب تری دارد.

نتایج به دست آمده از مطالعه حاضر نشان داد که میانگین قطر نانو الیاف با افزایش زمان الکترورسی بطور جزئی افزایش یافته است به طوری که میانگین قطر نانوالیاف برای زمان های الکترورسی ۱۵، ۳۰ و ۴۵ از ۱۲۹ نانومتر به ترتیب به ۱۳۲ و ۱۳۷ نانومتر افزایش یافت. این افزایش در قطر الیاف را می توان ناشی از افزایش ضخامت لایه نانولیف دانست که به تدریج به صورت یک لایه عایق عمل کرده و منجر به کاهش نیروی کشش الکتریکی اعمال شده به پلیمر در حد فاصل نوک نیدل تزریق تا کالکتور می گردد. کاهش نیروی کشش الکتریکی اعمال شده بر محلول پلیمری می تواند منجر به تولید نانولیف های با قطر بالاتر در فرآیند الکترورسی گردد (۱۹، ۲۱، ۲۲).

افت فشار نشان دهنده میزان مقاومت بستر در برابر عبور هوا می باشد، در واقع بستری که بتواند در افت فشار کم راندمان فیلتراسیون بالایی ایجاد نماید از لحاظ میزان صرفه جویی در مصرف انرژی بستر مناسب تری می باشد (۲۳، ۲۴). یکی از پارامترهایی که باعث تغییر در افت فشار فیلترها می گردد، سرعت سطحی فیلتراسیون می باشد. نتایج مطالعه حاضر نشان داد که یک رابطه مستقیم و خطی بین افت فشار و

و کاهش تخلخل و حجم حفرات و در نتیجه افزایش سطح فیلتراسیون است. آن ها نشان دادند درصد کارایی فیلتراسیون نانوالیاف با فشردگی  $0/134$  نسبت به نمونه ی با فشردگی  $0/059$  برای ذرات  $0/3$  میکرونی حدود دو برابر بیش تر است ( $80/01\%$  در مقابل  $38/40\%$ ) و میزان افت فشار آن حدود  $3/8$  برابر بالاتر می باشد ( $29/4$  Pa در مقابل  $7/7$  Pa)، در نهایت عامل کیفیت آن به رغم کارایی فیلتراسیون دو برابری کم تر می شود ( $0/0547$  Pa<sup>-1</sup> در مقابل  $0/0629$  Pa<sup>-1</sup>) (۱۸). در مطالعه دیگر ژانگ و همکارانش نشان دادند که با افزایش زمان الکترورسی مدیای PAN (با بستر کربن فعال و میانگین قطر نانوالیاف  $224$  نانومتر) از  $15$  به  $30$  دقیقه افت فشار از  $172$  به  $340$  پاسکال افزایش، عامل کیفیت از  $0/029$  به  $0/016$  Pa<sup>-1</sup> کاهش و میزان کارایی برای ذرات  $300$  نانومتری از  $99/39$  به  $99/56$  درصد افزایش می یابد. در مطالعه آن ها افزایش زمان الکترورسی باعث کاهش عامل کیفیت مدیا گردید زیرا با افزایش این زمان، قطر الیاف بزرگ تر، الیاف در سطح بستر غیر یکنواخت تر پوشش داده می شدند (۱۹). در مطالعه یوکر دیده شد که با افزایش زمان الکترورسی و در نتیجه افزایش فشردگی نانوالیاف، درصد کارایی فیلتراسیون افزایش و میزان افت فشار نیز افزایش می یابد. به طور مثال برای لایه نانولیفی (میانگین قطر لیف  $265$  نانومتر) درصد کارایی برای حذف ذرات  $0/3$  میکرون و میزان افت فشار از  $77/16$  درصد و  $210$  پاسکال در زمان الکترورسی  $4$  دقیقه به  $97/83\%$  و  $840/3$  پاسکال در زمان الکترورسی  $12$  دقیقه می رسد. اگرچه در این شرایط عامل کیفیت از  $0/0703$  به  $0/0456$  Pa<sup>-1</sup> کاهش یافت (۲۰).

به طور کلی از نتایج مطالعه حاضر و سایر مطالعات می توان دریافت که افت فشار عامل محدود

دام افتادن آن‌ها توسط مکانیسم انتشار را کاهش می‌دهد. بنابراین انتظار می‌رود افزایش سرعت سطحی منجر به کاهش راندمان فیلتراسیون ذرات ریزتر گردد. عدم تغییر راندمان فیلتراسیون در اندازه‌های بالاتر از ۴۲۵ نانومتر هم می‌تواند به این دلیل باشد که در نانو الیاف به دلیل پایین بودن قطر الیاف نسبت به ذرات و جریان لغزشی حاکم، افزایش سرعت سطحی تاثیر چندانی بر مکانیسم‌های به دام اندازی ذرات نداشته و در نتیجه راندمان فیلتراسیون تغییر قابل ملاحظه‌ای نمی‌کند. در مطالعه لئونگ و همکارانش دیده شد که با افزایش سرعت سطحی از ۵ به ۱۰ سانتی متر در ثانیه کارایی فیلتراسیون کاهش یافت و این میزان کاهش در اندازه ذرات کوچک تر (به ویژه زیر ۱۰۰ نانومتر) فاحش تر بود (۲۸). کاهش کارایی فیلتراسیون به ویژه برای ذرات کوچک تر با افزایش سرعت سطحی موافق با پیش بینی تئوریک این موضوع است، زیرا با دو برابر شدن سرعت سطحی، ضریب زمان ماند ذرات در کنار نانوالیاف نصف می‌گردد، بنابراین شانس ذرات برای برخورد با الیاف از طریق مکانیسم انتشار (حرکت براونین) کاهش می‌یابد. از آن جایی که مکانیسم حذف ذرات کوچک تر از ۱۰۰ نانومتر عمدتاً انتشار است، کارایی فیلتراسیون این ذرات به شدت تحت تاثیر قرار می‌گیرد. برای ذرات بزرگ تر از ۳۰۰ نانومتر، با افزایش سرعت سطحی کارایی فیلتراسیون غالباً تغییر قابل ملاحظه‌ای نخواهد کرد که این ناشی از آن است که عدد رینولدز (که مبتنی بر قطر نانوالیاف است) بین  $10^{-3} \times 1/4 - 10^{-4} \times 7$  قرار دارد که کم تر از جریان با عدد رینولدز پایین ( $Re \ll 1$ ) است و خطوط جریان در چنین جریانی تغییر نمی‌کند، بنابراین ذرات معلق در جریان هوا بدون تغییر مانده و به وسیله نانوالیاف از طریق مکانیسم‌هایی چون برخورد مستقیم به دام می‌افتند (۲۸).

سرعت سطحی اعمال شده بر بستر نانولیفی پلی اورتان برقرار می‌باشد. به عنوان نمونه برای بستر پلی اورتان با دانسیته فشردگی ۰/۰۲ با تغییر سرعت سطحی از ۲ سانتی متر بر ثانیه به ۵ و ۱۰ سانتی متر در ثانیه، افت فشار به ترتیب از ۷ پاسکال به ۱۷ و ۲۹ پاسکال افزایش یافت. می‌توان گفت اعمال قانون داری در نتیجه عبور جریان هوا از ساختار متخلخل بسترهای نانولیفی سبب می‌شود که رابطه مستقیم بین افت فشار و سرعت سطحی فیلتراسیون برقرار باشد (۲۵). بنابراین همانند بسترهای میکرولیفی، می‌توان از قانون داری برای تفسیر رفتار بسترهای نانولیفی نیز استفاده نمود. یون و همکارانش نشان دادند که افت فشار فیلترمدیای PAN با میانگین قطر ۴۲۰ نانومتر و فیلترمدیای کامپوزیت نانولیف PAN و ذره پلیمر PMMA رابطه خطی با سرعت سطحی اعمال شده دارد (۲۶). این رابطه خطی در مقالات دیگری همانند مطالعه بائو برای نانوالیاف تفلون و فلوروزین نیز به اثبات رسیده است (۲۷).

نتایج به دست آمده از شکل (۶) نشان می‌دهد که با افزایش سرعت سطحی فیلتراسیون راندمان فیلتراسیون و عامل کیفیت بستر نانولیفی پلی اورتان کاهش یافته است. البته افزایش سرعت سطحی اثر کاهشی بیش تری بر راندمان فیلتراسیون ذرات کوچک تر از ۴۲۵ نانومتر داشت و راندمان فیلتراسیون ذرات بزرگ تر کم تر تحت تاثیر افزایش سرعت فیلتراسیون قرار گرفت. بر اساس تئوری فیلتراسیون نیز افزایش سرعت سطحی اثر افزایشی بر راندمان فیلتراسیون ذرات با اندازه بالا دارد، زیرا مکانیسم‌های غالب جدا کننده ذرات در این اندازه‌ها معمولاً مکانیسم‌های وابسته به اینرسی هستند و از طرفی مکانیسم انتشار مکانیسم غالب برای به دام اندازی ذرات ریز می‌باشد. افزایش سرعت سطحی با کم نمودن زمان ماند ذرات احتمال به

بر عمل کرد فیلتراسیون بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که وقتی سرعت سطحی کاهش می‌یابد میزان MPPS افزایش پیدا می‌کند. این نتیجه بیان گر آن است که در جمع آوری ذرات توسط بستر، مکانیسم انتشار نسبت به مکانیسم برخورد مستقیم غالب گشته است. برای یک عدد پکلت ثابت، که اثربخشی ته نشست ذرات به وسیله انتشار همرفتی را تعریف می‌نماید، افزایش سرعت ذره همراه با افزایش ضریب انتشار ذره (که کاهش قطر ذره است) خواهد بود (۲۷). نتایج مطالعه حاضر نشان داد که میانگین راندمان فیلتراسیون و عامل کیفیت بسترهای نانولیفی پلی اورتان برای نانو ذرات جامد KCl کمی بیش تر از نانوقطرات مایع DEHS می باشد که نشان از تاثیر جزئی نوع نانو ذرات در راندمان فیلتراسیون آن ها دارد. این یافته در انطباق با نتایج مطالعه Jackiewicz و همکارانش می باشد که نشان دادند راندمان کلی فیلتراسیون بسترهای پلی پروپیلن در دامنه سایزی مورد مطالعه آن ها یعنی صفر تا ۲۰۰ نانومتر برای نانو ذرات KCl و DEHS تفاوت چندانی ندارد (۳۰).

### نتیجه گیری

بسترهای نانولیفی پلی اورتان به منظور ساخت بستری با کارایی بالا به منظور حذف نانو ذرات از جریان هوا با استفاده از فرآیند الکترورسی ساخته شد. بررسی تاثیر پارامترهای مهم از قبیل دانسیته فشردگی، سرعت سطحی فیلتراسیون و نوع ذره بر روی راندمان فیلتراسیون و عامل کیفیت بسترها در دامنه سایزی ۱۰ تا ۱۰۰۰ نانومتر نشان داد که با افزایش سرعت سطحی راندمان فیلتراسیون ذرات کوچک تر از ۴۲۵ نانومتر به دلیل کاهش زمان ماند ذرات در حین فیلتراسیون کاهش می یابد، در حالی که با افزایش سرعت سطحی تغییر چندانی در فیلتراسیون ذرات

در خصوص کاهش عامل کیفیت بستر نانولیفی پلی اورتان در اثر افزایش سرعت سطحی نیز می توان گفت به دلیل این که مقدار عامل کیفیت هر بستر علاوه بر راندمان فیلتراسیون به افت فشار ایجاد شده توسط بستر در شرایط فیلتراسیونی نیز وابسته می باشد، بنابراین افزایش سرعت سطحی فیلتراسیون از طریق کاهش راندمان فیلتراسیون و افزایش افت فشار منجر به کاهش عامل کیفیت بسترها در مقایسه با سرعت های سطحی کم تر می گردد. در نتیجه در صورت امکان به کارگیری بسترها در سرعت های سطحی پایین به دلیل اعمال افت فشار کم تر می تواند منجر به افزایش صرفه جویی انرژی در سیستم های فیلتراسیونی گردد.

یافته های مطالعه حاضر حاکی از این بود که افزایش سرعت سطحی منجر به کاهش MPPS بسترهای نانولیفی پلی اورتان می گردد. این نتیجه نیز می تواند به دلیل تغییر در نحوه عمل کرد مکانیسم های فیلتراسیون (انتشار، برخورد مستقیم و ...) به دلیل تغییر در سرعت سطحی فیلتراسیون باشد. به نظر می رسد کاهش سرعت سطحی با افزایش نقش پدیده انتشار و کاهش نقش پدیده های وابسته به اینرسی باعث متمایل شدن MPPS به سمت ذرات با اندازه بیش تر گردد. این یافته نیز در انطباق با نتایج به دست آمده از سایر مطالعات نظیر مطالعه هونگ و همکاران می باشد که بروی نانوالیاف Nylon 6 انجام شده است. نتایج مطالعه آن ها نشان داد که افزایش سرعت سطحی فیلتراسیون از ۱ سانتی متر در ثانیه به ۵ سانتی متر در ثانیه MPPS را از ۱۴۰ نانو متر به ۱۰۰ نانومتر کاهش می دهد. هم چنین آن ها دریافتند که افزایش سرعت سطحی فیلتراسیون باعث افت بالای راندمان فیلتراسیون در اندازه های کوچک تر از ۱۲۰ نانومتر می گردد (۲۹). بائو و همکارانش اثر سرعت سطحی مدیا را

میان کارایی (۹۳/۵۹ درصد)، افت فشار (۱۸ پاسکال) و عامل کیفیت (۰/۱۷) برقرار نماید.

به طور کلی بسترهای ساخته شده از لحاظ راندمان فیلتراسیون و عامل کیفیت مقادیر قابل قبولی را به منظور کاربرد در ساخت فیلترهای صنعتی و حفاظت تنفسی نشان دادند، با توجه به این که ضخامت و وزن پایه کم و هم چنین سهولت در تولید نیز می تواند مزیت مهمی برای این بسترها باشد.

### تشریح و قدردانی

این مقاله (بخشی از) طرح تحقیقاتی مصوب دانشگاه علوم پزشکی و خدمات بهداشتی درمانی تهران به کد 94-01-27-28553 می باشد که با حمایت دانشگاه علوم پزشکی و خدمات بهداشتی درمانی تهران اجرا شده است. هم چنین نویسندگان از مساعدت مالی و همکاری انسیتو ایمنی محصولات نانو کشور کره جنوبی در اجرای بخش های مختلف عملی این پروژه کمال تشکر و سپاس گزاری را به عمل می آورد.

بزرگ تر از ۴۲۵ نانومتر ایجاد نمی شود. در نتیجه در صورت امکان، به کارگیری بسترها در سرعت های سطحی پایین به دلیل اعمال افت فشار کم تر می تواند منجر به افزایش صرفه جویی انرژی در سیستم های فیلتراسیونی گردد. یافته ها نشان داد که اگرچه افزایش ضخامت و دانسیته فشردگی باعث بهبود راندمان فیلتراسیون به خصوص در محدوده MPPS بسترها شده است ولی افزایش افت فشار ناشی از افزایش دانسیته فشردگی موجب کاهش مقادیر عامل کیفیت آن ها می گردد. نتایج به دست آمده نشان دادند که راندمان فیلتراسیون بسترهای نانولیفی پلی اورتان برای نانو ذرات KCl و DEHS تفاوت معناداری ندارد و نوع ذره تاثیر چندانی بر راندمان فیلتراسیون این بسترها نداشته است.

در این مطالعه برای ربایش ذرات ۱۰-۱۰۰۰ نانومتری از جریان هوا، بسترهای نانولیفی پلی اورتان با دانسیته فشردگی ۰/۰۲۸ در سرعت سطحی فیلتراسیون ۲ سانتی در ثانیه توانسته است حالت تعادلی و بهینه

### REFERENCES

- Nowack B, Bucheli TD. Occurrence, behavior and effects of nanoparticles in the environment. *Environmental pollution*. 2007;150(1):5-22.
- ISO. ISO/TS 27687: Nanotechnologies-Terminology and definitions for nano-objects Nanoparticle nanGIOFS.
- Zhang Y, Bai Y, Jia J, Gao N, Li Y, Zhang R, et al. Perturbation of physiological systems by nanoparticles. *Chemical Society Reviews*. 2014;43(10):3762-809.
- Palit S. Application of Nanotechnology, Nanofiltration and the Future Vision of Environmental Engineering Science-A Critical Overview. *i-Manager's Journal on Future Engineering and Technology*. 2015;10(4):38.
- Beck R. Electrospun Carbon Nanofiber Membranes for Water Treatment Applications: South Dakota School of Mines and Technology, Rapid City; 2016.
- SHOKRI A, GOLBABAIE F, SEDDIGH-ZADEH A, BANESHI M-R, ASGARKASHANI N, FAGHIHI-ZARANDI A. Evaluation of Physical Characteristics and Particulate Filtration Efficiency of Surgical Masks used in Iran's Hospitals. *International Journal of Occupational Hygiene*. 2015;7(1):10-6.
- Golbabaie F, Azar A, Ganji MK. Designing a model for selection of air pollution control equipment using fuzzy logic, *Journal of Health and Safety at Work* 2014;4(2)[Persian].
- Sundarrajan S, Tan KL, Lim SH, Ramakrishna S. Electrospun nanofibers for air filtration applications. *Procedia Engineering*. 2014;75:159-63.
- Bhardwaj N, Kundu SC. Electrospinning: a fascinating fiber fabrication technique. *Biotechnology advances*. 2010;28(3):325-47.

10. Li J, Gao F, Liu L, Zhang Z. Needleless electrospun nanofibers used for filtration of small particles. *Express Polymer Letters*. 2013;7(8).
11. 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.
12. Sheikh FA, Kanjwal MA, Saran S, Chung W-J, Kim H. Polyurethane nanofibers containing copper nanoparticles as future materials. *Applied Surface Science*. 2011;257(7):3020-6.
13. Matulevicius J, Kliucininkas L, Martuzevicius D, Krugly E, Tichonovas M, Baltrusaitis J. Design and characterization of electrospun polyamide nanofiber media for air filtration applications. *Journal of Nanomaterials*. 2014;2014:14.
14. Dehghan FS, 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 [Persian].
15. Farhang Dehghan S, 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.
16. 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 [Persian].
17. 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.
18. 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.
19. 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.
20. Uecker JC, Tepper GC. The production and filtration efficiency testing of nonwoven electrospun fiber mats: Virginia Commonwealth University; 2009.
21. Ding B, Yu J. Electrospun nanofibers for energy and environmental applications: Springer Science & Business Media; 2014.
22. Karakaş H, Jahangiri S, Saraç A. Structure and Process Parameter Relations of Electrospun Nanofibers. 2016.
23. 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.
24. Mousavi T, Golbabaee F, Pourmand mR, Rezaei S, Hosseini M, Kohneshahri MH, et al. Evaluating the efficiency of UVC radiation on HEPA filters to remove airborne microorganisms. *Journal of Health and Safety at Work*. 2017;7(2):111-20[Persian].
25. Barhate R, Loong CK, Ramakrishna S. Preparation and characterization of nanofibrous filtering media. *Journal of Membrane Science*. 2006;283(1):209-18.
26. 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.
27. 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.
28. Leung WW-F, Hung C-H, Yuen P-T. 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.
29. Hung C-H, Leung WW-F. Filtration of nano-aerosol using nanofiber filter under low Peclet number and transitional flow regime. *Separation and Purification Technology*. 2011;79(1):34-42.
30. Jackiewicz A, Werner L. Separation of Nanoparticles from Air Using Melt-Blown Filtering Media. *Aerosol and Air Quality Research*. 2015;15(6S):2422-35.

## Investigating effective parameters on the nanoparticles air filtration using Polyurethane nanofiber mats

Majid Habibi Mohraz<sup>1</sup>, Farideh Golbabaei<sup>2,\*</sup>, Il Je Yu<sup>3</sup>, Asghar Sedigh Zadeh<sup>4</sup>,  
Mohammad Ali Mansournia<sup>5</sup>, Somayeh Farhang Dehghan<sup>6</sup>

<sup>1</sup> Ph.D, Department of Occupational Health, School of Public Health, Tehran University of Medical Sciences, Tehran, Iran

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

<sup>3</sup> Professor, Institute of Nano Products Safety Research, Hoseo University, Asan, Korea

<sup>4</sup> Associate Professor, Nuclear Science and Technology Research Institute, Environmental Engineering Laboratory, Tehran, Iran

<sup>5</sup> Assistant Professor, Department of Epidemiology and Biostatistics, Tehran University of Medical Sciences, Tehran, Iran

<sup>6</sup> Assistant Professor, Department of Occupational Health, School of Public Health, Shahid Beheshti University of Medical Sciences, Tehran, Iran

### Abstract

**Introduction:** Electrospun nanofibers are suitable option to synthesize filtering mats for nanoparticles. This study was aimed to fabricate polyurethane nanofiber mats through electrospinning process and to investigate the effect of different parameters such as packing density, face velocity and particle type on the filtration efficiency and quality factor of electrospun polyurethane nanofiber mats.

**Material and Method:** The nanofiber mats were produced by electrospinning process. Polyurethane granules were dissolved (15w/w%) in a solvent system consisting of dimethylformamide and tetrahydrofuran (3:2). Then, the filtration performance testing system was made at the Fluid Mechanics Department of Hanyang University of South Korea and the filtration efficiency and pressure drop of prepared nanofiber mats were studied.

**Result:** Findings showed that by increasing the duration of electrospinning, the basis weight, thickness, packing density, initial pressure drop and filtration efficiency of the mats increased, and the quality factor of the mats decreased due to the increase of the pressure drop. The increase in electrospinning duration from 15 to 45 minutes was led to the increase in pressure drop from 7 to 32 Pa and the average filtration efficiency was increased about 9-10% for KCl and DEHS test particles. The filtration efficiency and quality factor of the prepared polyurethane nanofiber mats were declined with the increase of filtration face velocity from 2 to 5 and 10 cm/s. The reduction in filtration efficiency was more obvious for particles smaller than 425 nm.

**Conclusion:** The results demonstrated that prepared polyurethane nanofiber mats provide acceptable filtration performance. What is more, such nanofiber mats can have other potential benefits such as light basis weight, low thickness and simple production.

**Key words:** Nanoparticles, Nanofibers, Polyurethane, Filtration Efficiency, Quality Factor

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