



## ساخت بستر نانو الیافی به روش الکتروریسی و تعیین کارایی آن در حذف نانوذرات آئروسولها

غلامرضا مرادی<sup>۱</sup>، اصغر صدیقی زاده<sup>۲</sup>، رسول یاراحمدی<sup>۳</sup>، شهناز باکند<sup>۴</sup>، علی اصغر فرشاد<sup>۵</sup>، بهزاد رضایی فرد<sup>۶</sup>، مرضیه علمدار خسرقی<sup>۷</sup>

تاریخ پذیرش: ۹۲/۱۰/۰۴

تاریخ ویرایش: ۹۲/۰۸/۰۵

تاریخ دریافت: ۹۱/۱۲/۰۷

### چکیده

**زمینه و هدف:** بسترهای نانو الیافی یکی از مهم‌ترین بی بافت‌هایی می‌باشند که اخیراً در صنعت نانوفیلتراسیون مورد بهره‌برداری قرار گرفته‌اند. در این مطالعه به عنوان ایده جدید اقدام به ساخت بسترهای نانو الیافی مبتنی بر روش الکتروریسی و تعیین کارایی آن با استفاده از نانو ذرات آئروسولی شد.

**روش بررسی:** کارایی و افت فشار بستر نانو الیافی با استفاده از ذرات آئروسول نانو مقیاس ساکاروز در گستره‌ی اندازه ۷۰۰-۷۰ نانومتر و در سرعت جریان‌های مختلف ۵-۱/۵۸ متر بر ثانیه اندازه‌گیری شد. سیستم آزمون به صورت استوانه‌ای شکل از جنس فولاد ضد زنگ با سطح فیلتراسیون ۱۳۰ سانتیمتر مربع ساخته شد. ذرات مورد نظر با استفاده از مولد دستگاه الکترواسپری ذرات مدل ۳۴۸۰ تولید شد. از شمارشگر ذرات LPC برای اندازه‌گیری غلظت عددی ذرات قبل و بعد از فیلتر و محاسبه کارایی بستر استفاده شد.

**یافته‌ها:** نتایج این مطالعه نشان داد که اندازه قطر الیاف و خلل و فرج بستر نانو الیاف سنتزی یکنواخت بوده و قطر الیاف آن در گستره بین ۲۰ تا ۷۰ نانومتر قرار دارد. همچنین نتایج بیانگر حداکثر میزان نفوذپذیری بسترهای نانو الیاف برای ذرات ۱۰۰ نانومتر در میان سایر اندازه‌های مورد مطالعه بود که به عنوان ناحیه MPPS در این مدیا تعیین شد. نتایج نشان داد با افزایش سرعت جریان، میزان نفوذپذیری و افت فشار در گستره اندازه ذرات مورد بررسی افزایش و فاکتور کیفیت کاهش می‌یابد.

**نتیجه‌گیری:** این مطالعه نشان داد که فرایند الکتروریسی، تکنولوژی موثر برای سنتز فیلترهای الیافی با کارایی بالا است.

**کلیدواژه‌ها:** نانو ذرات، فیلتراسیون، الکتروریسی، نانوالیاف، فاکتور کیفیت.

### مقدمه

گازی علاوه بر پروسه تولید در کاهش مواجهه افراد و نیز انتشار آن به محیط زیست موثر است [۱]. از فیلترهای الیافی به عنوان گزینه مناسب جهت جلوگیری از انتشار نانو ذرات در محیط کاری و اتمسفری استفاده می‌شود. الیاف به طور کلی به دو دسته طبیعی و مصنوعی تقسیم بندی می‌شوند. محدودیت‌هایی که از نظر تأمین منابع در مورد الیاف طبیعی وجود دارد، موجب جهت‌دهی دانشمندان به سمت تولید الیاف مصنوعی شده است. این الیاف معمولاً دارای قطری در محدوده ۵ تا ۵۰۰ میکرومتر هستند، ولی در سال‌های اخیر با پیشرفت فناوری نانو،

با گسترش فناوری نانو و مهندسی مواد، نانو ذرات مختلفی با خصوصیات نوظهور ساخته شده و با وجود اینکه پتانسیل اثرات سمی آن‌ها در بسیاری از موارد ناشناخته است این مواد کاربردهای روزافزون یافته‌اند. مطالعات اولیه نشان داده‌اند که نانو مواد می‌توانند سلامتی انسان را تحت تأثیر قرار داده و اثرات مخرب زیست محیطی نیز به همراه داشته باشند [۱، ۲]، بنابراین، در این تکنولوژی‌ها بکارگیری روش‌های کنترل مواجهه با نانو ذرات خصوصاً نانوذرات آئروسول‌ها ضروری می‌باشد لذا بدام‌اندازی نانو ذرات از جریان‌ات

۱- دانشجوی دکتری بهداشت حرفه‌ای، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی تهران، تهران، ایران.

۲- دانشیار گروه پژوهشی شیمی، پژوهشکده علوم هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران.

۳- (نویسنده مسئول)، مرکز تحقیقات بهداشت کار، عضو هیئت علمی بهداشت حرفه‌ای، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی ایران، تهران، ایران. rasoulpch@yahoo.com

۴- عضو مرکز تحقیقات بهداشت کار، دانشیار گروه بهداشت حرفه‌ای، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی ایران، تهران، ایران.

۵- عضو مرکز تحقیقات بهداشت کار، دانشیار گروه بهداشت حرفه‌ای، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی ایران، تهران، ایران.

۶- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی محیط زیست، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، تهران، ایران.

۷- عضو مرکز تحقیقات بهداشت کار، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی ایران، تهران، ایران.

ولتاژ بالایی که به سیال پلیمری اعمال می شود، بارهایی در آن ها تولید خواهد شد. هنگامی که بارها در سیال به مقدار بحرانی می رسد، جت سیال در نوک سوزن تشکیل می شود. جت الکتروریسی شده به سمت صفحه جمع کننده حرکت می کند [۴, ۶]. مورفولوژی لیف مانند قطر آن و یکنواختی الیاف پلیمری الکتروریسی شده به پارامترهای زیادی بستگی دارد. این پارامترها به سه گروه پارامتر محلول پلیمری، پارامتر دستگاهی و پارامتر محیطی تقسیم می شوند [۶]. در شکل ۱ فرایند الکتروریسی به همراه تصویر میکروسکوپی نانوالیاف تولید شده به این روش آورده شده است.

اگرچه تکنولوژی الکتروریسی بیش از یکصد سال است که مورد استفاده قرار می گیرد ولی مکانیزم شکل گیری نانوالیاف بدین روش هنوز بطور کامل شناخته نشده است. با وجود اینکه چندین مطالعه جهت بررسی مکانیزم شکل گیری الیاف به منظور طراحی و دوباره تولید داربست ها<sup>۳</sup> انجام شده است اما یافته های تئوریک اندکی از آنها حاصل شده است [۴] در طول فرایند الکتروریسی، ساختارهای نانوالیافی یکنواخت تنها تحت شرایط عملیاتی بهینه حاصل می شوند. تأثیر هر دو پارامترهای درونی و بیرونی بر روی مورفولوژی نانوالیاف تولیدی شناخته شده است. علاوه بر پارامترهای درونی از قبیل ولتاژ اعمالی، فاصله، هدایت، ویسکوزیته و غلظت محلول، پارامترهای بیرونی از قبیل رطوبت محیط و دما نیز جهت تولید الیاف یکنواخت باید بهینه سازی شوند بطور کلی پارامترهای درونی در تعیین مورفولوژی الیاف بحرانی تر هستند [۴, ۷]. لوونگ<sup>۴</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۰ به بررسی کارایی بسترهای نانوالیافی با استفاده از نانوذرات در گستره ۵۰ تا ۵۰۰ نانومتر پرداختند که نتایج حاکی از آن بود، زمانی که دانسیته سطحی نانو بستر افزایش یافت ناحیه مرزی یا MPPS<sup>۵</sup> (ناحیه ای با بیشترین میزان نفوذپذیری

تولید الیاف با قطر نانومتری مورد توجه فراوانی قرار گرفته است. نانوالیاف به صورت الیاف با قطر کمتر از ۱۰۰ نانومتر تعریف می شوند و با دارا بودن یک بعد خارج از محدوده نانومتری، جزء دسته نانومواد تک بعدی قرار می گیرند. نسبت سطح به حجم بسیار بالا این نسبت در مورد نانوالیاف تقریباً ۱۰۰۰ برابر الیاف میکرونی است)، انعطاف بالا در عامل دار کردن سطوح و خواص مکانیکی عالی و استحکام کششی از خواص مورد توجه نانوالیاف در مقایسه با الیاف معمولی است. این خواص برجسته موجب شده است تا نانوالیاف گزینه مناسبی برای بسیاری از کاربردهای مهم باشند [۳].

بسترهای نانو الیافی یکی از مهم ترین ساختارهای بی بافت<sup>۱</sup> می باشند که اخیراً در صنعت نانو فیلتراسیون توسط فرایند الکتروریسی<sup>۲</sup> مورد بهره برداری قرار گرفته اند غشاهای بی بافت تولید شده از نانو الیاف، سائز حفره های خیلی کوچکی دارند و تخلخل این غشاها زیاد است، پس راندمان فیلتراسیون در آن ها بالاست. این ویژگی باعث شده که مورد مناسبی برای کاربردهای متنوع فیلتراسیون در زمینه های نظامی (مثل ماسک های شیمیایی) و یا صنعتی (مثل فیلتر برای موتورها و ژنراتورهای که خیلی کثیف می شوند) و بهداشتی (مثل فیلترهای هوا) باشند [۳, ۴].

روش های مختلفی برای ساخت بسترهای نانو الیافی وجود دارد که از مهم ترین آن ها می توان به روش های کشش، دمش مذاب، الیاف چند جزئی، الکتروریسی، جدایی فازی و خود آرایی اشاره نمود. در این میان از روش های جدایی فازی و خود آرایی به طور گسترده ای برای تهیه نانو الیاف زیستی استفاده می شود. حال آنکه روش الکتروریسی که برای طیف وسیعی از مواد قابل استفاده می باشد امروزه به طور تجاری برای تولید نانو الیاف با قطرهای متنوع استفاده می شود [۵]. فرایند الکتروریسی شامل اعمال میدان الکتریکی به منظور کشیده شدن محلول بطور پیوسته از سوزن سرنگ به صفحه جمع کننده است، در الکتروریسی با استفاده از

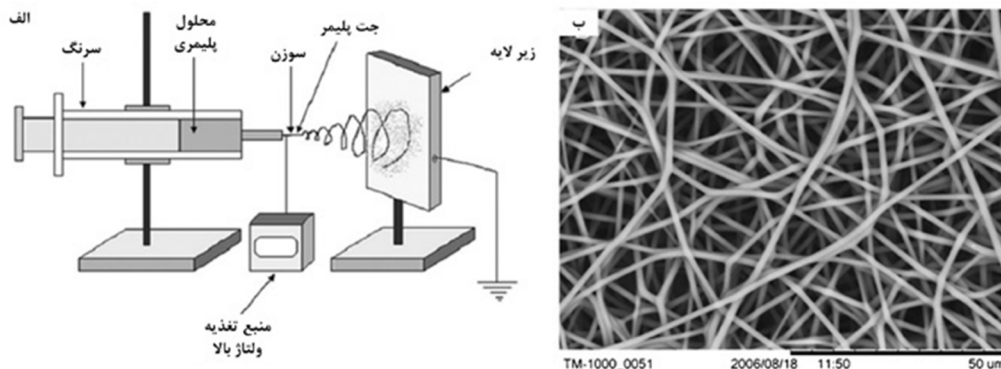
<sup>3</sup>. Scaffold

<sup>4</sup>. Fong-leang

<sup>5</sup>. Most penetration particle size

<sup>1</sup>. NonWoven

<sup>2</sup>. Electrospinning



شکل ۱- الف) دستگاه استاندارد الکتروروسی و ب) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از نانوالیاف پلی اورتان الکتروروسی شده (۶)

$$E = 1 - \exp\left(\frac{-\epsilon L (1 - \epsilon) \varphi_t}{D_f \pi \epsilon}\right) \quad (1)$$

که در آن  $\epsilon$  و  $L$  به ترتیب میزان تخلخل و ضخامت صافی،  $D_f$  و  $\varphi_t$  به ترتیب قطر و احتمال ربایش کل ذرات توسط هر یک از تارهای الیافی تشکیل دهنده فیلتر می باشد.

با فرض قابل اغماض بودن ربایش ذرات در اثر مکانیسم‌های گرانش، الکتروستاتیک و غربالی،  $\varphi_t$  از جمع سه احتمال گیراندازی ذرات در اثر سازوکارهای ذکر شده حاصل می شود.

$$\varphi_t = \varphi_i + \varphi_R + \varphi_D \quad (2)$$

که  $\varphi_i$  احتمال برخورد اینرسی،  $\varphi_R$  برخورد مستقیم و  $\varphi_D$  برخورد انتشاری است [۱۱].

برای بستره‌های نانو الیافی تعامل برخورد مستقیم و انتشاری مشخص است و معمولاً مکانیسم اینرسی نادیده گرفته می شود. کارایی فیلتراسیون  $E$  بر حسب (%) طبق رابطه (۳) حساب می شود.

$$E = 1 - \frac{C_{down}}{C_{up}} \quad (3)$$

که در آن  $C_{down}$  و  $C_{up}$  به ترتیب غلظت عددی ذرات در بالادست و پایین دست جریان می باشند [۱۰، ۱۲].

برای ذرات ائروسول) از ۱۴۰ به ۹۰ nm کاهش و با افزایش سرعت سطحی از ۵ تا ۱۰ cm/s، کارایی فیلتراسیون کاهش و در این سرعت کمترین کارایی برای ذرات ۱۰۰ nm مشاهده گردید [۸]. در مطالعه دیگری که توسط کوری و همکاران در سال ۲۰۰۷ با هدف تعیین کارایی نانو بستره‌های الیافی در حذف ذرات نانومتر صورت گرفت نتایج نشان داد که با افزایش سرعت جریان کارایی صافی کاهش می یابد [۱] مرادی و همکاران (۲۰۱۲) طی مطالعه‌ای آزمایشی کارایی بستره‌های اولپا را با نانوذرات ائروسولی مورد بررسی قرار دادند. طبق نتایج بدست آمده از این تحقیق، میزان کارایی با افزایش سرعت جریان کاهش یافت. همچنین یافته‌های تحقیق مذکور نشان داد که با افزایش سرعت جریان افت فشار افزایش و فاکتور کیفیت کاهش یافت [۹] اخیراً اثبات شده که راندمان فیلتراسیون این غشاها را می توان توسط الیاف باردار شده‌ای که خصوصیت جذب الکترواستاتیکی ذرات در آنها اصلاح شده است، افزایش داد [۴] هدف از این مطالعه ساخت نانوبستره‌های الیافی و تعیین کارایی آن جهت بدام اندازی و حذف نانو ائروسول‌ها می باشد.

**کارایی فیلتراسیون:** کارایی فیلتر بصورت تئوریکی مطابق رابطه ۱ بدست می آید [۱۰].

6. Couri

و ولتاژ اعمالی ۲۵ کیلو ولت تثبیت و پس از اعمال دبی ثابت ۱ میلی لیتر بر ساعت فرآیند الکتروریسی انجام شد. جهت ایجاد ساختار بی بافت یکنواخت از سرعت پایین جمع کننده یعنی ۳۰۰ دور بر دقیقه استفاده شد.

#### مشخصات نانو الیاف: تصویر سطح مقطعی از

بستر نانو الیافی به روش میکروسکوپ SEM (Scanning Electron Microscope) تهیه و توسط نرم افزار Image Pro Plus مورد آنالیز قرار گرفت. توزیع قطر فیبر نانوالیاف به روش آنالیز تصویر مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است.

#### ارزیابی کارایی بسترهای نانو الیافی: سیستم

آزمون به صورت استوانه‌ای شکل از جنس فولاد ضد زنگ می‌باشد. این سیستم همچنین به یک صافی با کارایی بالا جهت تهیه هوای خالص و یک دستگاه الکترواسپری مولد نانو ذرات<sup>۹</sup> (TSI ESP-3480) ساخت کشور آمریکا مجهز شده است. محلول نمونه در یک ویال مخروطی شکل ذخیره و در محفظه فشار دستگاه قرار گرفت. این محفظه دارای یک کاپیلاری و سیم پلاتینیم ولتاژ بالا (غوطه‌ور در محلول) است. میدان الکتریکی باعث خارج شدن محلول شارژ شده ناشی از اختلاف فشار از خروجی کاپیلاری می‌شود. قطره تشکیل شده ضمن اختلاط با هوای تمیز و CO<sub>2</sub> بردار شده و از طریق یک یونیزه کننده رادیو اکتیو (Polonium-210) خنثی سازی شده و مایع تبخیر می‌شود؛ و ذرات به صورت آئروسول از دستگاه خارج می‌شود. برای اندازه گیری تراکم عددی ذرات در دو طرف بستر نانو الیافی، از یک دستگاه شمارنده ذرات مدل Micro LPC DAS ساخت کارخانه Boulder آمریکا استفاده شده است و به منظور سنجش فلو و اختلاف فشار عبوری از بستر دبی سنج مدل TA2 و مانومتر دیجیتالی مدل APM50K ساخت شرکت Kimo، استفاده شد. نمای کلی از سیستم آزمون صافی در شکل ۲ نشان داده شده است.

دیویس<sup>۷</sup> جهت محاسبه افت فشار عبوری از فیلترهای الیافی بی بافت معادله تجربی زیر را پیشنهاد نموده است.

$$\frac{(\Delta P)d_f^2 \rho_f}{4\mu U_0 W} = 16\alpha^{0.5}(1 + 56\alpha^3) \quad (۴)$$

در این معادله  $d_f$  قطر الیاف،  $\alpha$  سختی<sup>۸</sup>،  $\Delta P$  افت فشار عبوری از فیلترهای الیافی بی بافت،  $W$  بیانگر جرم الیاف بر واحد سطح فیلتر،  $\rho_f$  دانسیته مواد الیافی می‌باشد. با داشتن  $W$  و  $\rho_f$  قبل و بعد از  $\Delta P$  عبوری از بستر، میزان سختی از طریق رابطه زیر قابل دستیابی است،

$$\alpha = \frac{W}{\rho_f Z} \quad (۵)$$

در این معادله  $Z$  ضخامت فیلترالیافی می‌باشد. این محاسبات بر اساس استفاده از معادله دیویس است [۱۱] فاکتور کیفیت ( $Q_f$ ) بر حسب (1/Pa) نیز طبق رابطه (۶) تعریف می‌شود:

$$Q_f = -\ln(1-\eta)/\Delta P \quad (۶)$$

در این معادله  $\Delta P$  افت فشار عبوری از فیلتر است.  $Q_f$  ارتباط بین کارایی فیلتراسیون و افت فشار را نشان می‌دهد. فیلتری با کارایی بالا و افت فشار کم، فاکتور کیفیت بالایی خواهد داشت [۱۳].

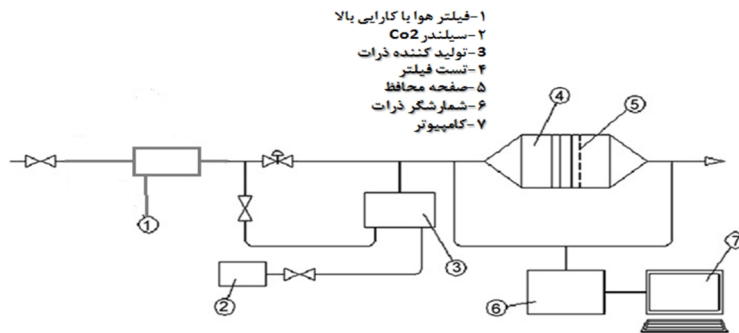
#### مواد و تجهیزات مورد استفاده

**فرایند تولید نانوالیاف:** مقدار ۲ گرم پلی آمید ۶ تهیه شده از شرکت پارسیلون در ۱۰ میلی لیتر حلال کلروفرم (ساخت شرکت Merck آلمان) به منظور تهیه پلیمر نانوالیاف با استفاده از یک همزن به مدت ۲۴ ساعت حل گردید. محلول پلیمری تهیه شده بر روی بستر بی بافت (تهیه تجاری) در فاصله ۱۰ سانتی متری

<sup>۹</sup>. Electro spray Aerosol Generator

<sup>۷</sup>. Davies

<sup>۸</sup>. Packing density



شکل ۲- نمایی از سیستم آزمون فیلتر (۱)

است. تست‌ها در سرعت جریان گازی  $1/58$  تا  $5 \text{ m.s}^{-1}$  انجام شد. در جریان آزمون ابتدا تمام ذرات موجود در هوای ورودی به سیستم، توسط یک صافی  $^{12}$ ULPA گرفته شده و سپس ذرات تک توزیعی ساکاروز به وسیله یک مولد آئروسول در جریان هوای تونل تست تزریق شد. غلظت ذرات قبل و بعد از بستر به وسیله شمارنده ذرات متراکم شمارش و به طور همزمان افت فشار در صافی نیز اندازه گیری شد.

### ۳- یافته‌ها

**بررسی مورفولوژی بستر نانو الیافی:** نتایج حاصل از بررسی ساختار بستر نانو الیافی از بخش‌های مختلف به شکل نتایج کمی و کیفی (برش سطح مقطع) توسط روش میکروسکوپی SEM در شکل ۳ و به همراه آنالیز توزیع قطر فیبر<sup>۱۳</sup> در نمودار ۱ نشان داده شده است. نتایج نشان داد که در نانوبستر الیافی سنتزی، بیشترین توزیع قطر، در گستره سایزی بین ۳۰ تا ۵۰ نانومتر می‌باشد.

**تعیین کیفیت بستر نانو الیافی:** نتایج مربوط به کارایی جمع آوری ذراتی با اندازه‌های مختلف در سرعت جریان گازی  $1/58$  تا  $5 \text{ m/s}$  در شکل ۴ نشان داده شده است. حداکثر میزان نفوذپذیری برای بستر

### نحوه انجام تست بستر نانو الیافی: متغیرهای

سرعت، قطر و بستر نانو الیافی به منظور تعیین راندمان حذف و همچنین تعیین اختلاف فشار مربوط به هر مرحله به عنوان طرح آزمایش<sup>۱۱</sup> بدست آمد. متغیر سرعت در ۷ سطح، قطر ذرات تولیدی در ۶ سطح و نمونه برداری از دو قسمت قبل و بعد از بستر الیافی و با میزان تکرار ۱۰ آزمایش برای هر اندازه جمعاً ۸۴۰ تست انجام گرفت. جهت تعیین پایایی دستگاه شمارشگر ذرات از روش باز آزمایی<sup>۱۱</sup> استفاده شده است در این روش پایایی دستگاه برای هر اندازه مشخص از ذره دقیقاً ۱۰ بار تکرار شد. ضریب همبستگی بین اعداد بدست آمده از ۱۰ بار اجرای آزمون حدود  $R^2=0.94$  بدست آمد.

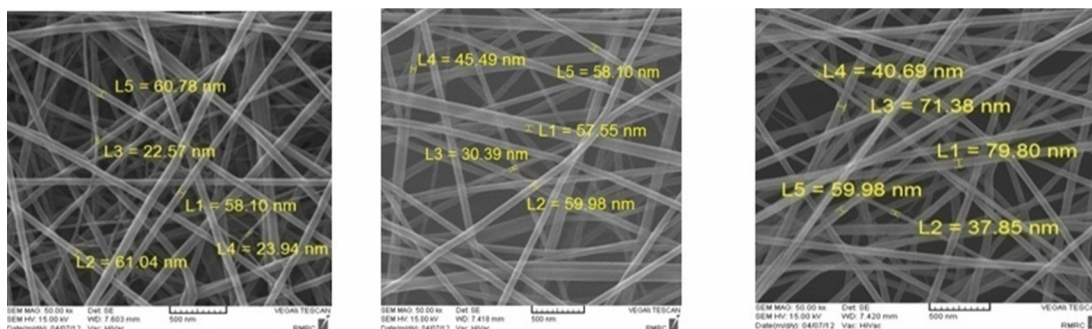
پس از تکمیل سیستم آزمون، کارایی و افت فشار بستر نانو الیافی با استفاده از ذرات ساکاروز در گستره‌ی اندازه‌ی ۷۰ تا ۷۰۰ نانومتر و در سرعت جریان‌های مختلف اندازه‌گیری شد. ذرات با استفاده از مولد ذرات الکترواسپری مدل ۳۴۸۰ تولید شد. این دستگاه قابلیت تولید نانو ذرات مونودیسپرس با غلظت  $10^7 \text{ P/cm}^3$  تحت فلوی  $2/5 - 0/2 \text{ L/min}$  را دارا می‌باشد. کارایی فیلتر از طریق شمارش ذرات قبل و بعد از فیلتر با استفاده از شمارشگر ذرات مورد بررسی قرار گرفته

<sup>12</sup>. Ultra-Low Penetration Air

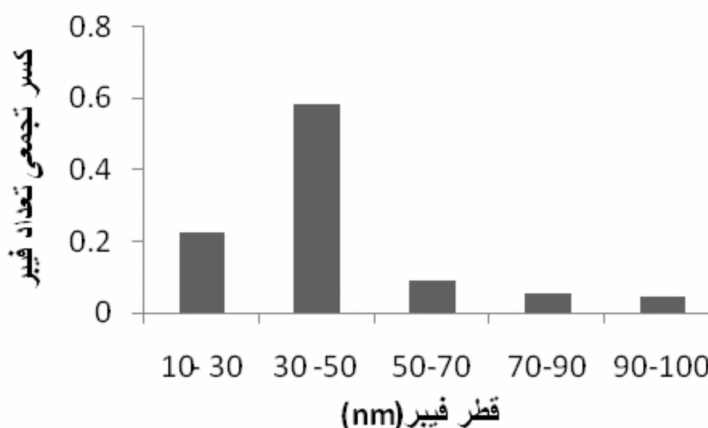
<sup>13</sup>. Software Image Pro plus

<sup>10</sup>. Classical experimental design

<sup>11</sup>. Test- retest



شکل ۳- تصاویر SEM از بستر الکتروسی سنتزی به همراه آنالیز و اندازه گیری قطر فیبر توسط نرم افزار Image pro plus



نمودار ۱- توزیع اندازه قطر الیاف در بستر الکتروسی سنتزی

نانو الیافی، در میان سایر اندازه‌ها برای ذرات به بزرگی ۱۰۰ نانومتر بدست آمد.

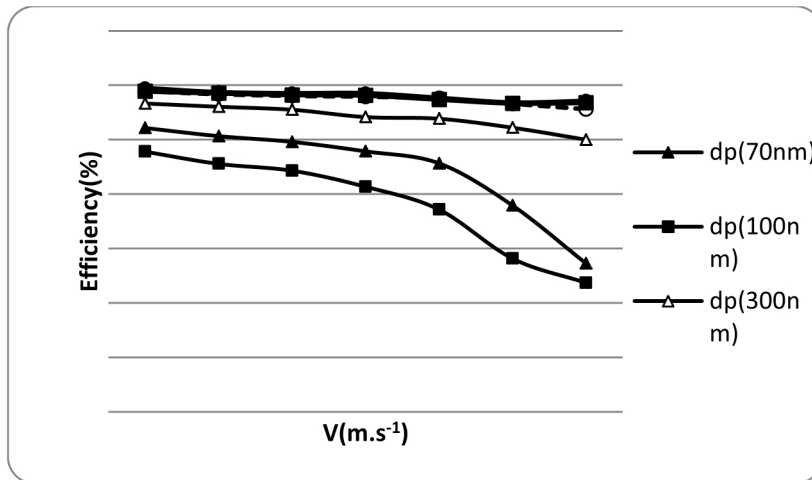
نتایج افت فشار حاصل از بستر نانو الیاف سنتزی در شکل ۵ مورد بررسی قرار گرفت. همان گونه که مشاهده می‌شود، بیشترین افت فشار در ماکزیمم سرعت جریان بدست آمد. بطوری که در سرعت جریان  $1/58 \text{ m/s}$ ، افت فشار در حدود  $11 \text{ Pa}$  بوده در حالی که برای سرعت جریان  $4/9 \text{ m/s}$  مقدار افت فشار  $49 \text{ Pa}$  بدست آمد.

در شکل ۶ فاکتور کیفیت بستر نانو الیاف را برای ذرات در گستره سایزی  $70$  تا  $700$  نانومتر نشان داده شده است. همان گونه که مشاهده میشود، ارتباط معکوسی بین سرعت جریان و فاکتور کیفیت وجود دارد. همچنین در گستره سرعت جریان مورد مطالعه، کمترین فاکتور کیفیت برای ذرات  $100$  نانومتری

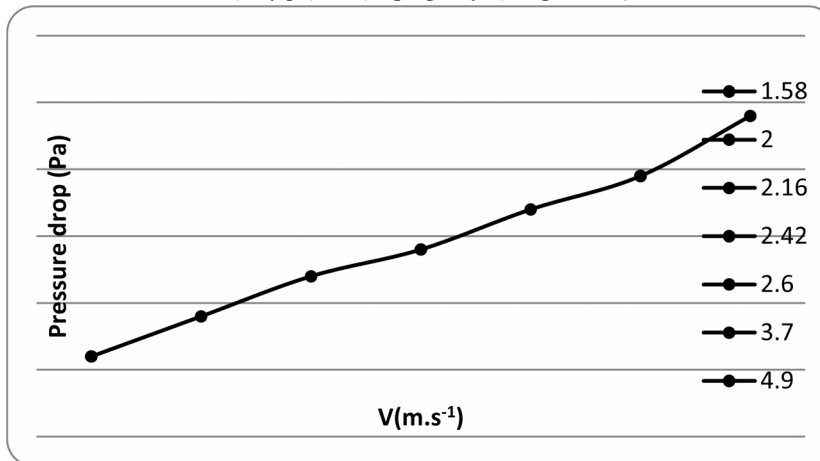
### بحث و نتیجه گیری

#### بررسی مورفولوژی بسترهای مورد مطالعه:

استفاده از دستگاه SEM جهت بررسی مورفولوژی بسترهای نانو الیافی در مطالعات مختلف گزارش شده است [۱۴، ۱۵]. نتایج SEM از بسترهای نانو الیافی سنتزی نشان می‌دهد که قطر الیاف در آن دارای یکنواختی بسیار بالایی است و قطر الیاف سنتزی برابر  $20$  الی  $70$  نانومتر می‌باشد (شکل ۳). همانگونه که اشاره شد الیاف الکتروسی با تغییر پارامترهای محلول، دستگاهی و محیطی با قطر و یکنواختی مختلفی تولید خواهند شد. در واقع با تغییر بهینه این پارامترها، می‌توان الیافی با مورفولوژی یکنواخت ایجاد کرد. مشاهدات تجربی در الکتروسی تأیید می‌کنند که



شکل ۴- کارایی بستر نانو الیافی تابع سرعت جریان و قطر ذرات

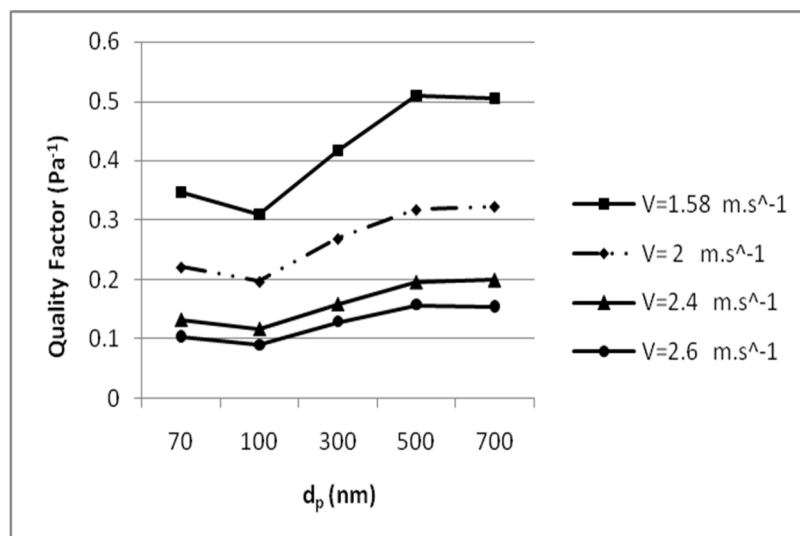


شکل ۵- تغییرات افت فشار بستر نانو الیافی تابع سرعت جریان

منجر تولید الیاف با قطر بزرگتر می شود. همانطور که غلظت افزایش می یابد، مخلوط دانه و زنجیره نیز تولید خواهد شد. افزایش بیشتر غلظت منجر به تشکیل الیاف پیوسته می شود. قابل ذکر است که در غلظت خیلی زیاد، الیاف یکنواخت طولانی تر به علت افزایش ویسکوزیته محلول، تولید نخواهد شد [۱۶، ۱۷] در این مطالعه با انتخاب بهینه پارامترهای مربوط به محلول پلیمری، دستگاهی و محیطی، تقریباً الیافی با قطر یکسان در مقیاس نانو ایجاد شد و بیشترین اندازه قطر الیاف در بستر الکتروریسی سنتزی در محدوده ۳۰ تا ۵۰ نانومتر بدست آمد.

**بررسی کارایی بسترهای انتخابی:** هر چند که کارایی صافی‌ها بر اساس استاندارد ASHRAE و

برای تشکیل الیاف یک مقدار مینیمم از غلظت پلیمر مورد نیاز است. جت مایع از محلول پلیمری به قطراتی می شکند و پس از آن، تبخیر حلال منجر به تشکیل ذرات پلیمری کروی شکل می شود. تغییر شکل ذرات به فیبر تابعی از غلظت پلیمر است [۱۴]. در غلظت‌های خیلی پایین، اعمال ولتاژ به علت ناپایداری منجر به تشکیل دانه می شود. در واقع در غلظت‌های کم، گره خوردگی زنجیره پلیمری کافی نیست. از سایر اثرات افزایش غلظت می توان به مساحت کوچکتر رسوب دهی اشاره کرد. در واقع در غلظت‌های زیاد، ویسکوزیته محلول در حرکت جت به فاصله‌های دور از سوزن محدودیت ایجاد می کند. این کاهش مسیر جت به معنی کشش کمتر محلول می باشد که در نهایت



شکل ۶- فاکتور کیفیت (QF) بستر نانو الیاف در برابر قطر ذرات تحت سرعت جریان ۱،۵۸، ۲، ۲،۴ و ۲،۶ متر بر ثانیه

بین سرعت جریان عبوری با میزان نفوذپذیری در بسترهای انتخابی ارتباط مستقیم و معنی داری بدست آمد. نتایج این بررسی نشان داد که با افزایش سرعت جریان، میزان نفوذپذیری بستر انتخابی بر اساس قطر ذرات افزایش می‌یابد همچنین در محدوده سرعت مورد ارزیابی (۱/۵۸ تا ۵ m/s)، حداکثر میزان نفوذپذیری بستر نانو الیافی، برای ذرات به بزرگی ۱۰۰ نانومتر بدست آمد. در فرایند فیلتراسیون، هنگامی که قطر ذره کوچک‌تر از ۱۰۰ نانومتر و سرعت جریان هوای عبوری از فیلتر کم باشد می‌توان از تأثیر مکانیسم‌های اینرسی و برخورد مستقیم چشم پوشی کرد [۸] لذا با افزایش قطر و سرعت جریان تأثیر مکانیسم انتشاری برای ذرات نانو کاهش می‌یابد، در نتیجه کارایی بسترهای انتخابی با افزایش سرعت جریان کاهش می‌یابد. چنین یافته‌ای مطابق با نتایج مطالعه کوری (Coury) و همکارانش در سال ۲۰۰۷ است که در آن کارایی بسترهای نانو الیافی با افزایش سرعت جریان کاهش می‌یافت.

**بررسی ارتباط میان افت فشار و سرعت جریان:** یکی از عوامل مهم و تعیین کننده در انتخاب و به کارگیری دستگاه پالایش هوا، میزان مصرف انرژی و هزینه راهبری سامانه سیستم تصفیه کننده

استانداردهای معادل با آن بر مبنای تعیین توانایی گرفتن غبار اتمسفری<sup>۱۴</sup> و توانایی گرفتن ذرات مصنوعی به روش وزنی<sup>۱۵</sup> استوار است [۱۸]. لیکن همان‌گونه که قبلاً ذکر گردید به دلیل اهمیت ویژه اندازه ذره به لحاظ بهداشتی و فنی، در پژوهش حاضر توانایی صافی‌ها در گرفتن ذرات بر حسب اندازه آن‌ها تعیین گردید سرعت جریان عبوری از بستر، تأثیر مستقیم بر کارایی بستر دارد. مکانیسم‌های ربایش ذرات تابع تغییر سرعت عبوری از بستر می‌باشد. مکانیسم‌های اینرسی و انتشار با ازدیاد سرعت به ترتیب کاهش و افزایش می‌یابد. به لحاظ تئوری نیز، احتمال برخورد یک ذره و گیر افتادن آن تابع معکوسی از عدد بدون بعد پکلت<sup>۱۶</sup> می‌باشد، با توجه به اینکه عدد پکلت رابطه مستقیمی با سرعت جریان داشته و افزایش سرعت جریان منجر به افزایش نفوذپذیری می‌شود در نتیجه کارایی کاهش می‌یابد، بنابراین کارایی جمع‌آوری توسط مکانیسم انتشاری با افزایش عدد پکلت (افزایش سرعت جریان) کاهش می‌یابد [۱۹، ۲۰] نتایج حاصل از این تحقیق تأییدی بر نتایج تئوری است. در مطالعه حاضر

<sup>14</sup>. Atmospheric Dust Spot Efficiency

<sup>15</sup>. Arrestance

<sup>16</sup>. Peclet Number





جریان، فاکتور کیفیت صافی الیافی کاهش می‌یابد. همچنین نتایج تحقیق فوق نشان داد که با افزایش میزان جریان، درصد نفوذپذیری و افت فشار عبوری از بستر افزایش یافت [۲۰، ۲۲].

نتایج این تحقیق، تاثیر اندازه ذرات و دبی گاز ورودی به بستر نانو الیاف را ضمن بررسی بشرح زیر تایید می‌نمایند:

• در بستر تهیه شده ناحیه ربایش ناشی از مکانیسم انتشار (جریان پایین و ذرات ریز)، از حداکثر کارایی برخوردار می‌باشد.

• حداقل کارایی بستر نانو الیافی مورد آزمون، با ذرات در گستره اندازه ۱۰۰ نانومتر است؛ بنابراین شناخت توزیع اندازه ذرات خروجی از یک فرآیند صنعتی می‌تواند کمک شایانی به انتخاب نوع فیلترها برای طراحی سیستم پالایش باشد.

• بستر نانو الیافی در ناحیه اندازه ذرات ۱۰۰ نانومتر (MPPS) دارای حداقل کارایی است.

• شیب فاکتور کیفیت در بستر نانو الیافی در ناحیه پایین‌تر از MPPS منفی و در ناحیه بالاتر از MPPS مثبت ارزیابی شده است.

### منابع

1. Steffens J, Coury J. Collection efficiency of fiber filters operating on the removal of nano-sized aerosol particles: I—Homogeneous fibers. Separation and purification technology. 2007;58(1):99-105.
2. Hayes A, Bakand S. Inhalation toxicology. Molecular, Clinical and Environmental Toxicology. 2010;461-88.
3. Huang Z-M, Zhang Y-Z, Kotaki M, Ramakrishna S. A review on polymer nanofibers by electrospinning and their applications in nanocomposites. Composites science and technology. 2003;63(15):2223-53.
4. Chakraborty S, Liao I, Adler A, Leong KW. Electrohydrodynamics: A facile technique to fabricate drug delivery systems. Advanced drug delivery reviews. 2009;61(12):1043-54.
5. Ramakrishna S. An introduction to electrospinning and nanofibers: World Scientific; 2005.

است. در فرایند پالایش میزان مصرف انرژی با افت فشار رابطه مستقیم دارد از طرفی با افزایش سرعت جریان عبور جریان گاز از صافی افت فشار نیز افزایش می‌یابد [۹] همان طور که در شکل ۵ نشان داده شده است با افزایش سرعت در بستر نانو الیاف، میزان افت فشار افزایش می‌یابد. نتایج بدست آمده از مطالعه حاضر، با نتایج بدست آمده از مطالعات فونگ لوونگ همخوانی دارد [۲۱].

### بررسی فاکتور کیفیت بسترهای انتخابی:

هنگامی که راندمان صافی‌ها مطرح می‌شود دو عامل نفوذ ذرات از فیلتر و همچنین مقاومت فیلتر در مقابل عبور جریان هوا به دلیل اهمیتشان نیاز به توجه خاصی دارند. در این پژوهش نظر به اهمیت هر دو عامل فوق، نه تنها هر دو پارامتر به تفکیک مورد تحقیق قرار گرفته است بلکه با هم ادغام و کیفیت فیلتر با استفاده از رابطه (۴) تعیین گردید. به بیان دیگر می‌توان گفت فاکتور کیفیت تابع میزان جریان بوده و با افزایش میزان جریان، فاکتور کیفیت فیلتر کاهش می‌یابد [۱۸]. نتایج گویای این مطلب است که با افزایش قطر از ۷۰-۱۰۰ nm، فاکتور کیفیت کاهش و با افزایش قطر ذرات تا ۷۰۰ nm، فاکتور کیفیت افزایش می‌یابد. بنابراین شیب فاکتور کیفیت در بسترهای الیافی مورد مطالعه در ناحیه پایین‌تر از ۱۰۰ نانومتر که به MPPS<sup>۱۷</sup> معروف است منفی و در ناحیه بالاتر از MPPS مثبت ارزیابی شده است. با توجه به اینکه مکانیسم غالب در جمع‌آوری ذرات کوچکتر از ۱۰۰ نانومتر مکانیسم انتشاری است بنابراین با افزایش قطر ذرات از ۷۰ تا ۱۰۰ نانومتر، تأثیر مکانیسم انتشاری به حداقل می‌رسد بنابراین فاکتور کیفیت برای ذرات ۱۰۰ نانومتری حداقل مقدار را دارا می‌باشد. نتایج مطالعه حاضر نشان می‌دهد که ارتباط معکوسی بین سرعت جریان و فاکتور کیفیت وجود دارد به طوری که با افزایش سرعت جریان، فاکتور کیفیت برای ذراتی با اندازه‌های مختلف کاهش می‌یابد. نتایج مطالعه دون هال<sup>۱۸</sup> نشان داد که با افزایش میزان

<sup>17</sup>. Most Penetration Particles size

<sup>18</sup>. Don -Hee Hah



18. Golbabaie F, Design and evaluation of test equipment for air filters, PhD Theses, 1992-1993 [Persian]
19. Baron PA, Willeke K. Aerosol measurement: principles, techniques, and applications. 2001.
20. Otani Y, Eryu K, Furuuchi M, Tajima N, Tekasakul P. Inertial classification of nanoparticles with fibrous filters. *Aerosol and Air Quality Research*. 2007;7(3):- 52-343.
21. Otani Y, Eryu K, Furuuchi M, Tajima N, Tekasakul P. Inertial classification of nanoparticles with fibrous filters. *Aerosol Air Qual Res*. 2007;7:343-52.
22. Don-Hee H. Performance of respirator filters using quality factor in Korea. *Industrial health*. 2000;38:380-4.
6. Beachley V, Wen X. Polymer nanofibrous structures: Fabrication, biofunctionalization, and cell interactions. *Progress in polymer science*. 2010; 35(7):868-92.
7. Bhardwaj N, Kundu SC. Electrospinning: a fascinating fiber fabrication technique. *Biotechnology advances*. 2010;28(3):325-47.
8. Hung CH, Leung WWF. Filtration of nano-aerosol using nanofiber filter under low Peclet number and transitional flow regime. *Separation and purification technology*. 2011;79(1):34-42.
9. Moradi gh-R SA, Yarahmadi R, Bakand Sh, Farshad A, Rzaipour B, et al. Investigating the collection efficiency of ULPA filters for the removal of nano-sized aerosols, *Iran Occupational Health*. Jun-July 2013;10].Persian]
10. Steffens J, Coury J. Collection efficiency of fiber filters operating on the removal of nano-sized aerosol particles: II. Heterogeneous fibers. *Separation and purification technology*. 2007;58(1):106-12.
11. 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.
12. Sadighzadeh A, Aliebrahimi M, Sarkari S. Appropriate mask selection study for nuclear industries activities, *J. of Nuclear Sci and Tech*, 2008; 41: 26-304(42):30-26.[Persian]
13. 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.
14. 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.
15. Tijing LD, Choi WL, Jiang Z, Amarjargal A, Park C-H, Pant HR, et al. Two-nozzle electrospinning of (MWNT/PU)/PU nanofibrous composite mat with improved mechanical and thermal properties. *Current Applied Physics*. 2013.
16. Shenoy SL, Bates WD, Frisch HL, Wnek GE. Role of chain entanglements on fiber formation during electrospinning of polymer solutions: good solvent, non-specific polymer-polymer interaction limit. *Polymer*. 2005;46(10):3372-84.
17. Ramakrishna S, Fujihara K, Teo W-E, Lim T-C, Ma Z. An introduction to electrospinning and nanofibers: World Scientific; 2005.

## Synthesis of nano-fibrous mats using electrospinning method and determining their efficiency for nanoaerosols removal

Gh. Moradi<sup>1</sup>, A. Sedighzadeh<sup>2</sup>, R. Yarahmadi<sup>3</sup>, Sh. Bakand<sup>4</sup>, A.A. Farshad<sup>5</sup>, B. Rezayifard<sup>6</sup>  
M. Alamdar Khosraghi<sup>7</sup>

Received: 2013/02/25

Revised: 2013/10/27

Accepted: 2013/12/25

### Abstract

**Background and aims:** Nano-fibrous mats are one of the unique nonwoven materials that have been recently carried out in nanofiltration industry. The aim of this study was to synthesize nano-fibrous path mats using electrospinning method following by determination of their efficiency for nanoaerosols removal.

**Methods:** The efficiency and pressure drop of nano-fibrous mats was measured using nano-scale sucrose aerosols with the particle size range of 70 -700 nm at different flow rates of 1.58 - 5 m.s<sup>-1</sup>. Cylindrical test system in a form of stainless steel with a filtration surface of 130 cm<sup>2</sup> was built. Desired particles were generated using Electro spray 3480 model particle generator. Condensation particle counter PMS Models Micro LPS DAS of Boulder Company was used to measure the particle number concentration both before and after the filtration and then to determine the performance.

**Results:** Obtained results showed that the fibers diameter and pore size of synthesized nanofibers provide uniformity with the fiber diameter ranging from 20 to 70 nm. Our results revealed that the maximum permeability of nano-fibrous pads was related to 100 nm particles that were selected as MPPS in this medium. Considering the test particles size distribution it was found that with increasing the velocity the permeability and the pressure drops were increased and the quality factor was decreased.

**Conclusion:** this study shows that electrospinning is a promising technology for the synthesis of high performance nanoparticle filters.

**Keywords:** Nanoparticles, Filtration, Electrospinning, Nanofiber media, Quality factor.

1. PhD Student of Occupational Health, School of Public Health, Tehran University of medical sciences, Tehran, Iran.

2. Associate Professor, Chemistry Research Group, Nuclear Science Research School, Nuclear Science and Technology Institute, Tehran, Iran.

3. (**Corresponding author**) Occupational Health Research Center, Department of Occupational Health, School of public Health, Iran University of medical sciences, Tehran, Iran. rasoulpch@yahoo.com

4. Occupational Health Research Center, Department of Occupational Health, School of public Health, Iran University of medical sciences, Tehran, Iran.

5. Occupational Health Research Center, Department of Occupational Health, School of public Health, Iran University of medical sciences, Tehran, Iran.

6. Msc Student of Environmental Engineering, Nuclear Science and Technology Institute, Tehran, Iran

7. Occupational Health Research Center, Department of Occupational Health, School of public Health, Iran University of Medical Sciences, Tehran, Iran.