

Assessment of Dust Holding Capacity of Nanofiber Media and Its Ability to Capture Synthetic Dust

Farideh Golbabaei¹, Somayeh Farhang Dehghan^{2*}, Aysa Ghasemi Koozekonan³,
Majid Habibi Mohraz⁴

¹ Department of Occupational Health, School of Public Health, Tehran University of Medical Sciences, Tehran, Iran

² Environmental and Occupational Hazards Control Research Center, School of Public Health and Safety, Shahid Beheshti University of Medical Sciences, Tehran, Iran

³ School of Public Health and Safety, Shahid Beheshti University of Medical Sciences, Tehran, Iran

⁴ Center of Excellence for Occupational Health Engineering, Occupational Health and Safety Research Center, School of Public Health, Hamadan University of Medical Sciences, Hamadan, Iran

Received: 11 November 2021 Accepted: 13 April 2022

Abstract

Background and Aim: Evaluation of the performance of these products is mainly based on their efficiency in numerical removal of particles in the range of different sizes. While the most important features of filters are the dust holding capacity, and the ability to remove the mass of particles with different densities, fewer studies have addressed this issue. Therefore, the present study evaluates the dust holding capacity of nanofiber media and its ability to capture synthetic dust to determine its ability to remove the mass of particles with different densities. At the same time, the initial efficiency of the fabricated media in the numerical removal of particles is also examined.

Methods: For producing nanofibers, a 16% w/w electrospinning solution of polyacrylonitrile polymer was prepared. The initial efficiency test in numerical removal of particles was performed according to ISO 29463 standard and the BS EN 779 standard was used for synthetic dust capture or arrestance test. Morphological characteristics, diameter, and surface porosity of the produced nanofibers were investigated using scanning electron microscopy.

Results: The investigation of the numerical removal of particles by the produced media showed that the average initial efficiency for collecting particles from 10 to 1000 nm was $72.06 \pm 19.62\%$. The results of the arrestance test showed that with increasing the mass of injected particles in different loading stages, the media pressure drop also increases. The dust holding capacity and the arrestance of the media for the final pressure drop of 265 Pascal were calculated to be about 180 mg and 99.86%, respectively. The total mean of arrestance was calculated to be about 99.86% after 6 loading steps. The morphological characterization of the produced nanofibers showed that the average diameter of the fibers was 380 nm with a coefficient of variation of 1.20, the morphology of nanofibers was non-uniform, and the surface porosity was determined to be 51%.

Conclusion: Proper collection efficiency and dust holding capacity, along with the low thickness of nanofiber media, make their applicability more specific in air filtration properties.

Keywords: Nanofibers, Filtration, Dust holding capacity, Quality factor.

*Corresponding author: Somayeh Farhang Dehghan, Email: somayeh.farhang@gmail.com

ارزیابی ظرفیت غبارگیری مدیای نانولیفی و توانایی آن در ربایش گرد و غبار مصنوعی

فریده گل‌بابایی^۱، سمیه فرهنگ دهقان^{۲*}، آیسا قاسمی کوزه‌کنان^۳، مجید حبیبی‌محرز^۴

^۱ گروه بهداشت حرفه‌ای، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی تهران، تهران، ایران

^۲ مرکز تحقیقات کنترل عوامل زیان آور محیط و کار، دانشکده بهداشت و ایمنی، دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی، تهران، ایران

^۳ گروه بهداشت حرفه‌ای و ایمنی کار، دانشکده بهداشت و ایمنی، دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی، تهران، ایران

^۴ گروه مهندسی بهداشت حرفه‌ای، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی همدان، همدان، ایران

چکیده

زمینه و هدف: ارزیابی عملکرد فیلتراسیون نانوالیاف عمدتاً بر پایه تعیین کارایی آن در حذف عددی ذرات در گستره اندازه‌های مختلف است. علی‌رغم اهمیت ظرفیت غبارگیری در عملکرد فیلتراسیون بسترهای نانو لیفی، کمتر مطالعه‌ای به این مهم پرداخته است. در مطالعه حاضر به ارزیابی ظرفیت غبارگیری مدیای نانولیفی و توانایی آن در ربایش گردوغبار مصنوعی، به‌منظور تعیین قابلیت آن در حذف جرمی ذرات با تراکم‌های مختلف پرداخته شده است. درعین حال کارایی اولیه مدیای تولیدی در حذف عددی ذرات نیز مورد بررسی قرار می‌گیرد. **روش‌ها:** برای تهیه نانوالیاف محلول الکتروریسی ۱۶ درصد وزنی از پلیمر پلی‌آکریلونیتریل آماده گردید. آزمون کارایی اولیه در حذف عددی ذرات مطابق استاندارد ISO ۲۹۴۶۳ و آزمون ربایش گردوغبار مصنوعی و یا ارستنس (Arrestance) مطابق استاندارد BS EN۷۷۹ انجام شد. ویژگی‌های ریخت‌شناسی (مورفولوژی)، قطر و تخلخل سطحی نانوالیاف تولیدی با استفاده از تهیه تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد بررسی قرار گرفت.

یافته‌ها: نتایج ارزیابی عملکرد مدیای تولیدی در حذف عددی ذرات نشان داد که میانگین کلی کارایی اولیه برای جمع‌آوری ذرات ۱۰ تا ۱۰۰۰ نانومتری برابر $۱۹/۶۲ \pm ۷۲/۰۶$ درصد است. نتایج آزمون ارستنس حاکی از آن بود که با افزایش جرم ذرات تزریقی در مراحل مختلف بارگذاری، افت فشار مدیا و کارایی جمع‌آوری ذرات افزایش می‌یابد. ظرفیت غبارگیری و میزان ارستنس مدیا برای افت فشار نهایی ۲۶۵ پاسکال، به ترتیب حدود ۱۸۰ میلی‌گرم و ۹۹/۸۶ درصد محاسبه گردید. میانگین کلی ارستنس نیز بعد از ۶ مرحله بارگذاری حدود ۹۹/۸۶ درصد محاسبه گردید. نتایج مشخصات ریخت‌شناسی نانو الیاف تولیدی نشان داد که میانگین قطر الیاف ۳۸۰ نانومتر و با ضریب تغییرت ۱/۲۰، از نظر مورفولوژی الیاف غیریکنواخت و تخلخل سطحی آن ۵۱ درصد تعیین گردید.

نتیجه‌گیری: کارایی جمع‌آوری و ظرفیت غبارگیری مناسب در کنار ضخامت کم مدیاهای نانو لیفی، قابلیت به‌کارگیری آن‌ها را در مباحث فیلتراسیون هوا مشخص تر می‌نماید.

کلیدواژه‌ها: نانو الیاف، فیلتراسیون، ظرفیت غبارگیری، فاکتور کیفیت.

مقدمه

امروزه کاربرد نانو الیاف در فیلتراسیون هوا توجه زیادی را به خود جلب کرده است (۱). کاربرد بالقوه بستر نانو الیاف به عنوان مدیای فیلتر برای حذف ذرات ریز با مطالعه راماکریشنا (Ramakrishna) آغاز شد (۲). پس از آن چندین مطالعه تجربی در زمینه تولید محصولات تجاری انجام گرفت. این نانو الیاف به‌خصوص از نوع بی‌بافت به دلیل خواص ویژه‌ای از جمله سادگی، ارزان‌قیمت بودن، ساختار متخلخل با نفوذپذیری بالا، پور سائز (اندازه حفرات) کوچک و سطح مقطع بالا در فرایندهای فیلتراسیون هوا مورد استقبال قرار گرفته‌اند (۳،۴).

میان روش‌های مختلف تولید نانوالیاف، الکتروریسی به دلیل سادگی و بازدهی آن در تولید الیاف بلند و نازک کاربرد فراوانی دارد (۵،۶). الیاف حاصل از این روش دارای سطح مقطع بالا، تخلخل زیاد، و عملکرد فیلتراسیون بالایی هستند (۷،۸). در فرایند الکتروریسی در نتیجه اعمال میدان الکتریکی، یک جت پلیمری تشکیل شده و محلول پلیمری پس از خروج از سرسوزن به سمت صفحه جمع‌آوری کننده کشیده می‌شود. این فرایند نتیجه تعادل بین کشش سطحی محلول و نیروی الکتریکی است که در نهایت محلول پلیمری کشیده شده و به شکل یک مخروط درمی‌آید (۹). پارامترهای مختلفی همچون غلظت محلول پلیمری، ولتاژ، فاصله منبع تغذیه تا صفحه جمع‌آوری کننده، و نرخ تغذیه در مشخصات مورفولوژی الیاف تولیدی اثرگذار است. مطالعات بسیاری از پلیمرهای مختلف برای تهیه الیاف استفاده نموده‌اند. یکی از این پلیمرهای آلی، پلی‌آکریلونیتریل (PAN) است که به دلیل خصوصیات منحصر به فرد آن از جمله آب‌گریز بودن، عدم انحلال در اغلب حلال‌ها، مقرون به صرفه بودن و سادگی در الکتروریسی به‌طور گسترده به کار گرفته شده‌اند (۱۰، ۱۱).

استفاده از نانوالیاف منجر به افزایش عملکرد فیلتر در ربایش گردوغبار به خصوص در گستره اندازه کوچک می‌شود، از این رو، کاربرد نانوالیاف در فیلتراسیون هوا به دلیل سطح جمع‌آوری زیاد و مقاومت پایین در مقابل عبور هوا اهمیت فراوانی یافته است و محصولات تجاری زیادی در این راستا وارد بازار شده است (۱). ارزیابی عملکرد این محصولات عمدتاً بر پایه کارایی آن در حذف عددی ذرات در گستره اندازه‌های مختلف است، در حالی که یکی از ویژگی‌های مهم در مورد فیلترها، ظرفیت غبارگیری و نگهداشت گردوغبار و قابلیت آن در حذف جرمی ذرات با تراکم‌های مختلف است در کمتر مطالعه‌ای به این بحث پرداخته شده است (۱۲). ظرفیت غبارگیری به‌صورت مقدار گردوغبار جمع‌آوری شده تا رسیدن به یک افت فشار بیشینه تعیین شده در یک دبی مشخص تعریف می‌شود. ظرفیت غبارگیری بالا نشان‌دهنده رسیدن به افت فشار بحرانی پس از گیراندازی حجم بالایی از گردوغبار است که ویژگی مثبتی در فیلترها محسوب می‌شود (۱۳). تعیین ظرفیت غبارگیری فیلترها در تعیین طول عمر مفید و فرکانس تعویض آن‌ها

مهم است (۱۲). علی‌رغم اهمیت ظرفیت غبارگیری در عملکرد فیلتراسیون بسترهای نانو لیفی، کمتر مطالعه‌ای به این مهم پرداخته است.

مطالعه حاضر به ارزیابی ظرفیت غبارگیری مدیای نانو لیفی و توانایی آن در ربایش گردوغبار مصنوعی، به‌منظور تعیین قابلیت آن در حذف جرمی ذرات با تراکم‌های مختلف پرداخته است. در عین حال کارایی اولیه مدیای تولیدی در حذف عددی ذرات نیز مورد بررسی قرار گرفته است. از این رو ساخت نانوالیاف PAN از طریق فرایند الکتروریسی و بررسی مشخصات ساختاری آن از جمله خصوصیات مورفولوژی، قطر و تخلخل مدنظر قرار گرفت. در نهایت به‌منظور بررسی عملکرد فیلتر مدیا در حذف ذرات از آزمون افت فشار و آزمون کارایی اولیه و نیز آزمون ربایش گردوغبار مصنوعی یا ارستنس بهره گرفته شد.

روش‌ها

مواد و تجهیزات

در این پژوهش از پلیمر پلی‌آکریلونیتریل (g/mol) ۸۰۰۰۰-۹۰۰۰۰ MW) ساخت شرکت پلی‌آکریل اصفهان، دی متیل فرمامید (۹۹/۵٪، g/mol) ۷۳/۱ (DMF-MW) ساخت شرکت مرک آلمان، بستر اسپان باند پلی‌پروپیلن ساخت شرکت بافتینه-ایران استفاده گردید. دستگاه الکتروریسی (Nano-Fanavaran Meghyas-ESDP30-Iran) جهت بافت نانو الیاف مورد استفاده قرار گرفت. همزن مغناطیسی (Chiltern-MM32-USA) نیز از دیگر تجهیزات مورد استفاده در این مطالعه بود.

آماده‌سازی محلول پلیمری و انجام فرایند الکتروریسی

محلول الکتروریسی PAN/DMF با غلظت ۱۶ درصد وزنی تهیه شد و محلول توسط هیتر همزن به‌منظور به‌دست آوردن محلول همگن، در دمای اتاق به مدت ۵ ساعت هم زده شد. نانو الیاف از طریق فرایند الکتروریسی در شرایط ذیل بر روی بستر اسپان باند پلی‌پروپیلن تولید شدند: غلظت محلول: ۱۶ درصد وزنی، ولتاژ کاربردی: ۲۰ کیلوولت، فاصله سوزن تا صفحه جمع‌آوری کننده: ۱۰ سانتیمتر، دما: ۲۵-۲۰ درجه سانتی‌گراد، مدت زمان: ۶۰ دقیقه، بستر جمع‌آوری: پارچه اسپان باند پلی‌پروپیلن، نرخ تزریق: ۱ میلی‌لیتر بر ساعت، سرنگ: ۵ میلی‌لیتر، قطر سوزن: گیج ۱۸ (قطر داخلی: ۰/۸۴ میلی‌متر). قبل از تصویربرداری نمونه‌های جمع‌آوری شده در دسیکاتور با کمک پمپ خلاء در دمای اتاق خشک می‌شدند.

تعیین مشخصات ساختاری فیلتر مدیا

به‌منظور بررسی ویژگی‌های ریخت‌شناسی (مورفولوژی)، قطر و تخلخل سطحی نانو الیاف تولیدی از میکروسکوپ الکترونی روبشی (Scanning Electron Microscope (SEM)-USA, Philips- XL 30) استفاده گردید. تصاویر SEM از نانوالیاف تولیدی بعد از طلائشانی تهیه شد. وجود دانه (Bead) از طریق

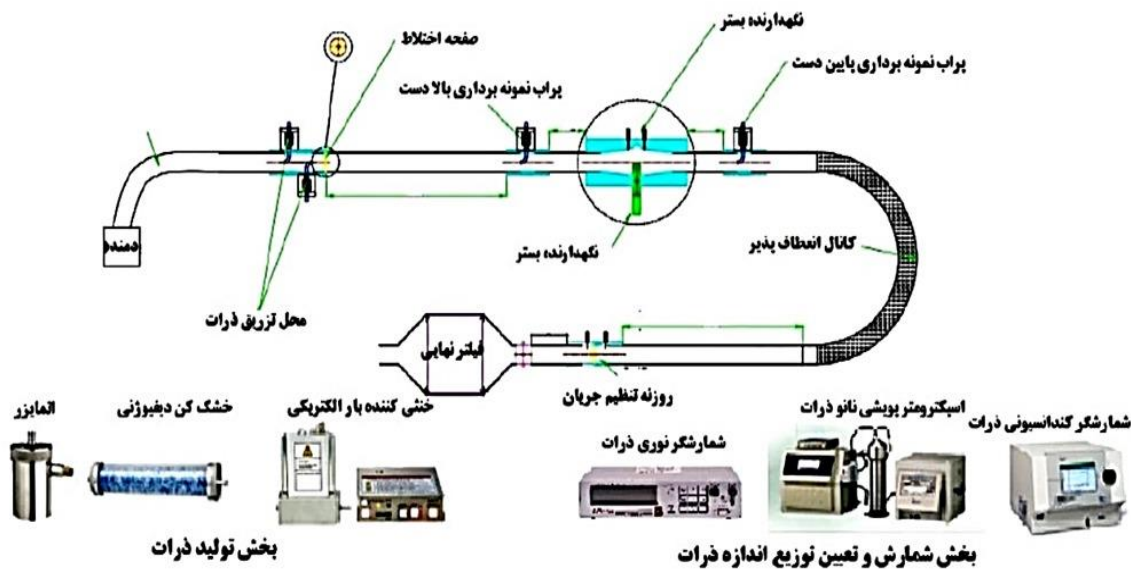
(China) با دقت بیش از 0.85 cm^{-1} در بازه $400-7800 \text{ cm}^{-1}$ انجام شد. الگوی حاصل از آنالیز FTIR هر ماده، حاوی پیک‌هایی است که به دلیل وجود گروه‌های عاملی و پیوندهای شیمیایی خاص آن ماده، منحصر به فرد است.

آزمون کارایی اولیه

به منظور تعیین افت فشار و کارایی اولیه حذف عددی ذرات کوچکتر از 1000 نانومتر (1 میکرون) مطابق استاندارد ISO ۲۹۴۶۳ (۱۴) از تونل آزمون ارائه شده در شکل ۱ در آزمایشگاه وابسته به انستیتو ایمنی محصولات نانو کشور کره جنوبی در گروه مهندسی مکانیک دانشگاه هانیانگ استفاده شد. ابعاد و شرایط تونل آزمون مطابق استاندارد ASTM F۲۲۹۹ و ASHREA ۵۲/۲ طراحی شده بود (۱۵،۱۶).

بررسی تصاویر SEM بررسی گردید. با کمک نرم‌افزار Image J (National Institutes of Health, USA) مطالعات ریخت‌شناسی فیلترها شامل قطر الیاف تولیدی صورت گرفت. تعیین قطر الیاف در تصاویر SEM با بزرگنمایی $1250 \times$ صورت گرفت. برای هر آزمایش، متوسط قطر الیاف با حدود 100 اندازه‌گیری از الیاف تصادفی تعیین شد. الگوریتم‌های تجزیه و تحلیل تصاویر از طریق نرم‌افزار MATLAB (MathWorks, Version 7) برای محاسبه درصد تخلخل فیلترها مورد استفاده قرار گرفت (۴).

به منظور شناسایی ترکیبات آلی و گروه‌های عاملی در نانو الیاف، آزمون طیف‌سنجی تبدیل فوریه مادون قرمز FTIR (Rayleigh- Fourier Transform Infrared Assay-WQF-510-



شکل-۱. طرح شماتیک ست آزمون فیلتر مورد استفاده برای ذرات زیر 1 میکرون (۱۷)

در سیستم نرم‌افزاری SNPS و OPC ثبت گردید. در صورت مشاهده ناپایداری در غلظت آئروسول تولیدی در بالادست فیلتر، سیستم مجدد مورد بررسی قرار گرفت. برای محاسبه کارایی جمع‌آوری از نتایج شمارش در بالادست و پایین دست فیلتر میانگین‌گیری شد. تمامی محاسبات و رسم نمودارها با کمک نرم‌افزار Microsoft Excel (2010) انجام گرفت.

کارایی جمع‌آوری فیلتر در یک گستره اندازه مشخص ذره (E_i) برحسب فرمول ۱ محاسبه می‌شود.

$$E_i = \left[1 - \frac{n_i}{N_i} \right] \times 100 \quad \text{فرمول ۱}$$

میزان نفوذ فیلتر مدیا برابر با ۱ منهای کارایی است و از حاصل تقسیم تعداد ذرات بالادست به تعداد ذرات پایین دست به دست می‌آید. فیلتر مدیاهای نانو لیفی دارای کارایی فیلتراسیون (E) بالا در افت فشار (ΔP) کم هستند. این دو جنبه معمولاً در پارامتری

نمونه فیلتر پس از آماده‌سازی در هولدری با سطح مقطع دایره‌ای $28/26 \text{ cm}^2$ قرار داده شده و سپس جریانی از هوا با سرعت سطحی 10 cm/s از روی فیلتر عبور داده شد. برای تعیین افت فشار از طریق مانومتر تفاضلی استفاده گردید. برای انجام آزمون مدیای فیلتر از ذرات کلرید پتاسیم (KCL) در گستره اندازه $10-1000 \text{ nm}$ بهره گرفته شد. به منظور تعیین اثر افت فشار ایجاد شده توسط فیلتر در دبی هوای ورودی به سیستم شمارش، میزان جریان هوای ورودی به سیستم شمارش (دستگاه‌های طیف‌سنج روبشی نانو ذرات SNPS و شمارشگر نوری ذرات OPC) پایش گردید. در طول فرایند درجه حرارت، رطوبت نسبی جریان هوا و افت فشار اولیه فیلتر ثبت گردید. در مرحله بعدی دبی هوای اتمایزر با توجه به غلظت مورد نظر تنظیم شده و سیستم شمارش (SNPS و OPC) راه‌اندازی شد. هفت نمونه از بالادست (قبل از نصب فیلتر) و شش نمونه از پایین دست فیلتر (بعد از نصب فیلتر) با زمان نمونه‌برداری 2 دقیقه و 15 ثانیه گرفته شده و نتایج

بارگذاری شده محاسبه می‌گردید. میزان ارستنس از طریق فرمول ۴ قابل محاسبه است:

$$A = \left(1 - \frac{\Delta m_{ff} + m_d}{\Delta m}\right) \times 100 \quad \text{فرمول ۴}$$

که در آن Δm_{ff} اختلاف جرم فیلتر نهایی (میلی‌گرم)، m_d جرم گردوغبار در کانال بعد از فیلتر (میلی‌گرم) و Δm میزان افزایش تزریق ذرات (میلی‌گرم) است. میانگین ارستنس (A_m) بعد از حداقل ۵ مرتبه بارگذاری طبق فرمول ۵ محاسبه می‌شد.

فرمول ۵

$$A_m = \left(\frac{1}{M}\right) \times [M_1 \times A_1 + M_2 \times A_2 + \dots + M_n \times A_n]$$

که در آن M جرم کلی ذرات تزریقی است و M_1, M_2, \dots جرم ذراتی که به ترتیب تا زمان رسیدن به افت فشارهای $\Delta P_1, \Delta P_2, \dots$ و ΔP_N تزریق شده است. ظرفیت غبارگیری یک فیلتر (DHC) (میلی‌گرم) برای افت فشار نهایی از حاصل ضرب جرم کلی ذرات تزریق شده در میانگین ارستنس به صورت زیر به دست می‌آید:

$$DHC = m_{tot} - \sum (\Delta m_{ff} + m_d) \quad \text{فرمول ۶}$$

که در آن m_{tot} جرم تجمعی ذرات تزریق شده (میلی‌گرم) است. کارایی جمع‌آوری نیز در آزمون ارستنس بایستی بعد از هر مرتبه بارگذاری مشخص گردد. برای این کار در پایان بارگذاری، فیلتر آزمون برای ۵ دقیقه با جریان هوای پاک غبارروبی می‌شد تا میزان انتشار ذرات رها شده از فیلتری که نسبت از غبار پر شده و از داخل خود کانال کاهش یابد. رهاش (Releasing)، بازگشت مجدد ذرات جدا شده از جریان هوا (Re-entrainment) یا ریزش (Shedding) ذرات بعد از ۵ دقیقه در اندازه‌گیری‌ها وارد شده و نتایج میزان کارایی فیلتر را تحت تأثیر قرار می‌دهد. روش اندازه کارایی در این آزمون مشابه ارزیابی کارایی اولیه است. متوسط کارایی بعد از هر مرتبه بارگذاری ذرات برای گستره اندازه " i " ($E_{i,j}$) به ترتیب فرمول ۷ محاسبه می‌شود.

$$E_{ij} = \frac{(E_{1i} + \dots + E_{6i})}{6} \quad \text{فرمول ۷}$$

$E_{1i} \dots E_{6i}$ کارایی منفرد برای گستره اندازه " i " بعد از هر مرحله بارگذاری است.

متوسط کارایی نیز بعد از اتمام همه مراحل بارگذاری برای گستره اندازه " i " ($E_{m,i}$) به ترتیب فرمول ۸ محاسبه می‌شود. که در آن $E_{i,j}$ متوسط کارایی بعد از بارگذاری فاز " j " برای

تحت عنوان فاکتور کیفیت (QF) ادغام می‌شوند که معیار شایستگی فیلتر را نشان می‌دهد و برای ارزیابی عملکرد فیلتراسیون مورد استفاده قرار می‌گیرد. فاکتور کیفیت از طریق فرمول ۲ محاسبه می‌گردد (۱۸).

$$QF = -\frac{\ln(1-E)}{\Delta P} \quad \text{فرمول ۲}$$

آزمون ربایش گردوغبار مصنوعی (Arrestance)

گردوغبار مورد استفاده برای اندازه‌گیری میزان حذف جرمی ذرات مطابق استاندارد ۵۲/۲ ASHREA (۱۵) شامل ۷۲٪ ذرات ISO 12103-1 A2، ۲۳٪ وزنی کربن سیاه، ۵٪ الیاف کوتاه چسبیده به تخم پنبه است. برای این آزمون، یک فیلتر هپا (کارایی اولیه بیش از ۷۵٪ برای ذرات دی اتیل هگزایل سباتکات (DEHS) ۰/۴ میکرونی در انتهای تونل آزمون (پایین دست فیلتر آزمون) به اسم فیلتر نهایی (فاینال) قرار داده شد. ذراتی که طی بارگذاری ذرات (Dust loading) از فیلتر آزمون عبور کردند در این فیلتر به دام افتادند. برای آزمون ارستنس غلظت‌های مشخص از گردوغبار یاد شده به تونل آزمون تزریق و افت فشار فیلتر آزمون تا رسیدن به حد مشخصی مورد بررسی قرار گرفت. قبل و بعد از هر بار تزریق وزن فیلتر نهایی سنجش شد. این آزمون نیز در آزمایشگاه وابسته انستیتو ایمنی محصولات نانو کشور کره جنوبی در اتاق تمیز دپارتمان مهندسی مکانیک دانشگاه Hanyang انجام گردید. برای انجام این آزمون، ابتدا ۳۰ میلی‌گرم گردوغبار با میزان افزایش ± 0.1 گرم در داست فیدر قرار داده و گردوغبار با غلظت ۷ میلی‌گرم بر مترمکعب تا رسیدن به افت فشار (به‌طور مثال ۴۵ پاسکال) برای آزمون فیلتر تزریق شد. میزان ارستنس و کارایی بعد از هر بار تزریق گردوغبار محاسبه شدند. بعد از تزریق ۳۰ میلی‌گرم حداقل ۴ بار افزایش گرم تزریق وجود داشت تا افت فشار نهایی فیلتر آزمون به‌طور مثال به ۲۶۵ پاسکال برسد. بعد از هر بار رسیدن به افت فشار مطلوب فیلتر نهایی از تونل خارج و وزن می‌شد. ارستنس (A_j) برای بارگذاری مرحله " j " به ترتیب فرمول ۳ محاسبه می‌شد.

$$A_j = \left(1 - \frac{m_j}{M_j}\right) \times 100 \quad \text{فرمول ۳}$$

که در آن m_j جرم ذرات عبوری از فیلتر [شامل جرم به دست آمده از فیلتر نهایی (اختلاف وزن) و گردوغبار موجود در کانال بعد از فیلتر (m_d)] و M_j جرم تزریق شده Δm افزایش تزریق (اختلاف جرم تزریقی) طی فاز " j " بارگذاری گردوغبار است. وقتی آزمون متوقف می‌شد که میزان ارستنس به کمتر از ۷۵٪ حداکثر مقدار ارستنس برسد و یا دو مقدار آن کمتر از ۸۵٪ میزان حداکثر باشد. میزان ارستنس اولیه بعد از اولین ۳۰ میلی‌گرم

۳ نمودار هیستوگرام توزیع اندازه قطر الیاف را نشان می‌دهد. ویژگی‌های ساختاری فیلتر مدیا شامل نوع ریخت‌شناسی، ضخامت، وزن مبنا، و فشردگی نانو الیاف در جدول ۱ ذکر شده است. در صورتی که نسبت انحراف معیار قطر لیف به میانگین قطر کمتر از ۰/۳ باشد، نوع مورفولوژی یکنواخت و در غیر این صورت غیریکنواخت در نظر گرفته می‌شود (۱۸).

طیف FTIR از مدیای PAN در شکل ۴ ارائه شده است. مطابق با شکل ۴ مشخصات ارتعاشی گروه $C\equiv N$ (گروه نیتریل کششی مربوط به پلیمر پلی‌آکریلونیتریل) در 2241 cm^{-1} ظاهر شده است و پیک‌های ظاهر شده در طول موج‌های 1363 ، 1221 و 1451 cm^{-1} نیز مربوط به ارتعاش گروه‌های آلیفاتیک (خمشی) C-H است (۱۹). وجود این گروه‌های عاملی نشان از حضور نانو الیاف PAN در بستر مدیا دارد.

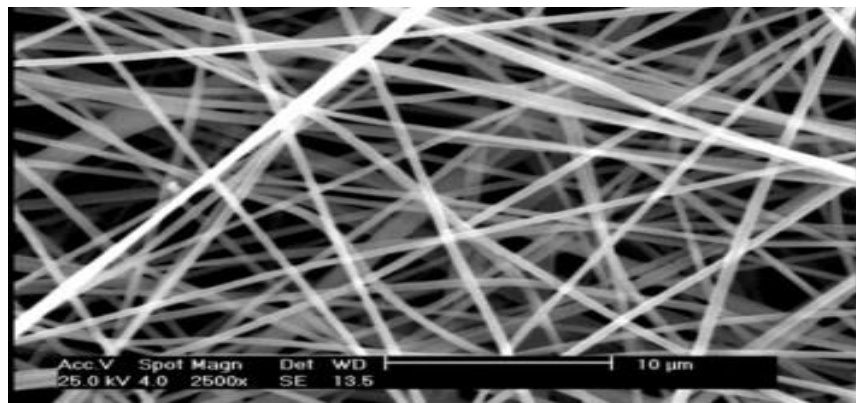
گستره اندازه "i" مقدار ذرات تزریق شده در فاز "j" بارگذاری، M_{ji} و n تعداد فازهای بارگذاری است. $M = \sum_{j=1}^n (M_j)$

$$E_{mi} = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^n \left(\frac{E_{ij} + E_{i(j-1)}}{2} \times M_j \right) \quad \text{فرمول ۸}$$

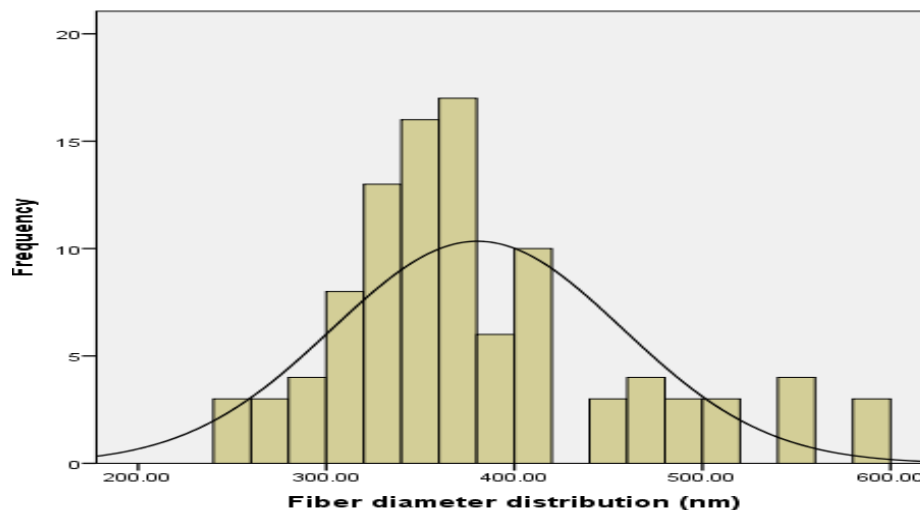
نتایج

ویژگی‌های ریخت‌شناسی

شکل ۲ تصویر SEM الیاف PAN را نشان می‌دهد. نتایج اندازه‌گیری قطر الیاف PAN در تصاویر SEM با استفاده از نرم‌افزار image z نشان داد که میانگین قطر این الیاف $380/38 \pm 77/15\text{ nm}$ با ضریب تغییرات ۱/۲۰ است. میانگین درصد تخلخل لایه نانولیفی ۵۱/۲۸٪ با انحراف معیار ۳/۰۶ است. شکل



شکل-۲. تصویر SEM نانو الیاف الکتروپرسی شده PAN



شکل-۳. نمودار هیستوگرام از توزیع سائزی قطر الیاف

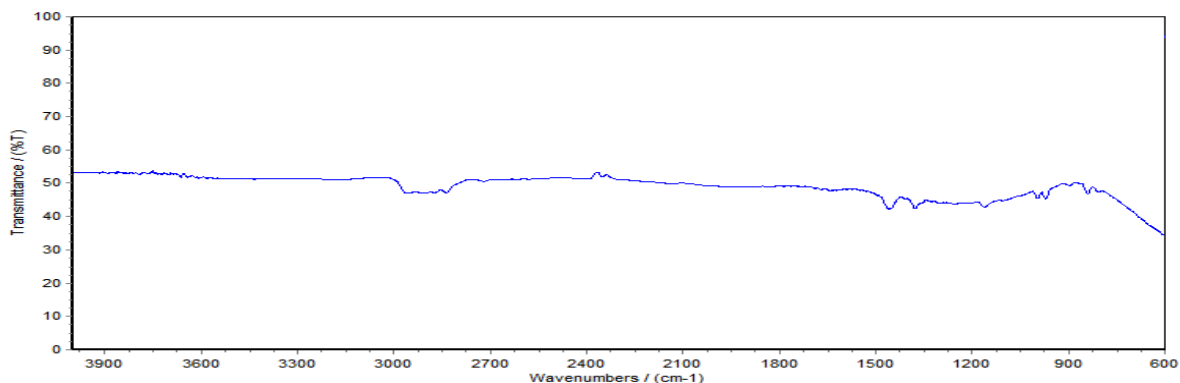
جدول-۱. مشخصات ساختاری فیلتر مدیا

فیلتر مدیا	ریخت‌شناسی نانو الیاف	ضخامت فیلتر مدیا (میلی‌متر)	وزن مبنا فیلتر مدیا (گرم بر مترمربع)	فشردگی نانو الیاف
PAN	غیریکنواخت	۰/۱۱۶	۱۷/۴۹	۰/۴۹

آزمون کارایی اولیه

فیلترمدیای نهایی از طریق الکتروریسی لایه نانو الیاف و نشانیدن آن بر بستر پلی پروپیلن تولید گردید. سپس این الیاف مورد آزمون عملکرد قرار گرفتند که نتایج آن به شرح ذیل است. کلیه آزمون‌ها در رنج دمایی هوا ۲۰ تا ۲۵ درجه سانتی‌گراد، رطوبت نسبی

۲۵ تا ۵۰ درصد و فشار اتمسفر ۱۰۲۶/۵ تا ۱۰۴۰ هکتوپاسکال صورت گرفت. آزمون کارایی فیلتر مدیا برای حذف ذرات از جریان هوا از طریق شمارش تعداد ذرات بالادست و پایین دست مطابق با روش کار صورت گرفت. میانگین افت فشار اولیه فیلتر مدیا و نتایج عملکرد مدیا برای حذف ذرات زیر ۱ میکرون در جدول ۲ آورده شده است.



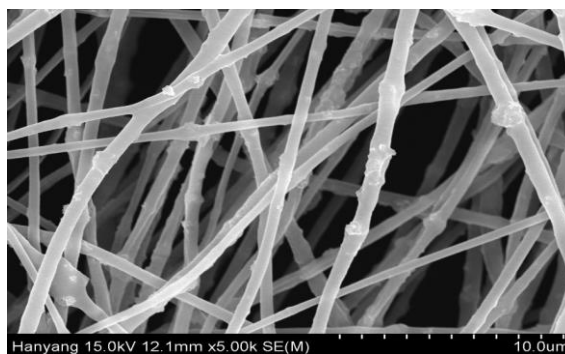
شکل-۴. طیف FTIR مدیای PAN

جدول-۲. نتایج عملکرد مدیا برای حذف ذرات زیر ۱ میکرون

پارامتر	مقدار
میانگین کارایی اولیه برای ذرات ۸۰ nm تا ۲۵۰ (%)	۵۰/۴۳ ± ۹/۴۶
میانگین افت فشار اولیه (Pa)	۲۷/۷۰ ± ۱/۴۵
میانگین فاکتور کیفیت برای ذرات ۸۰ nm تا ۲۵۰ (Pa ⁻¹)	۰/۰۲۵۳
میانگین کارایی اولیه برای ذرات ۱۰۰ nm	۵۱/۳۴ ± ۲/۴۶
میانگین کارایی اولیه برای ذرات ۳۰۰ nm	۵۲/۴۵ ± ۸۹/۱
میانگین فاکتور کیفیت در (Pa ⁻¹) ۳۰۰ nm	۰/۰۲۶۸
میانگین فاکتور کیفیت در (Pa ⁻¹) ۱۰۰ nm	۰/۰۲۶۰
میانگین کارایی اولیه برای ذرات زیر ۱۰۰۰ nm	۷۲/۰۶ ± ۱۹/۶۲
اندازه ذره (nm) با بیشترین نفوذ (MPPS)	۲۶۵

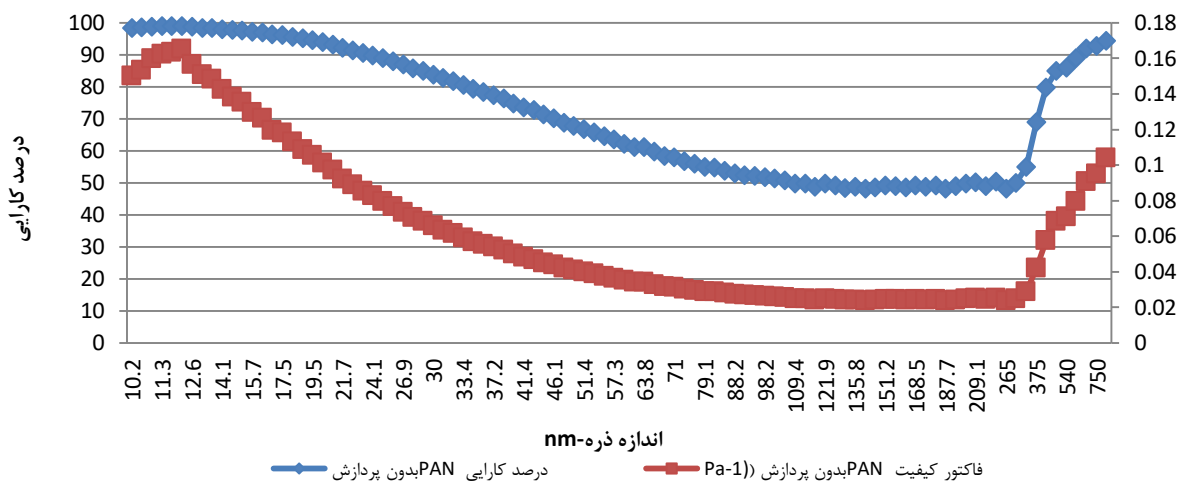
PAN برای ذرات ۱۰ تا ۱۰۰ نانومتر به تدریج روند نزولی داشته و از ۱۰۰ تا ۳۰۰ تقریباً سیر ثابت را طی نموده و بعد از ۳۲۵ نانومتر، درصد کارایی افزایش چشم‌گیر دارد. حداقل میانگین کارایی (۴۸/۱۷) و حداکثر میانگین کارایی (۹۸/۹۷) این مدیا به ترتیب مربوط به سایز ذره ۲۶۵ نانومتر و ۱۲/۲ نانومتر بود. به‌طور کلی فیلترمدیای PAN برای ذرات با گستره اندازه ۱۰ تا ۲۰ نانومتر کارایی بهتری از ذرات با سایز بزرگتر به‌طور مثال ۳۰۰ تا ۹۰۰ نانومتر از خود نشان داد. شکل ۷ عملکرد فیلتراسیون بستر پلی پروپیلن را نشان می‌دهد. این بستر بالاترین درصد کارایی (۴۰/۱۱) و کمترین درصد کارایی (۰/۲۳) را به ترتیب برای ذرات ۱۰/۶ نانومتر و ۱۸۷/۷ نانومتر داشت. میانگین کلی کارایی آن برای ذرات زیر ۱ میکرون، ذرات ۱۰۰ نانومتری و ذرات ۳۰۰ نانومتری به ترتیب برابر ۷/۱۸۹، ۱/۷۲ و ۱/۸۵ درصد بود. به‌طور کلی با افزایش سایز ذرات، درصد کارایی روند کاهشی داشت و درصد کارایی آن برای ذرات بزرگتر از ۳۳ نانومتر، کمتر از ۶٪ بود.

تصویر SEM از ذرات آزمون گیر افتاده در فیلترمدیای PAN در شکل ۵ قابل دسترسی است.

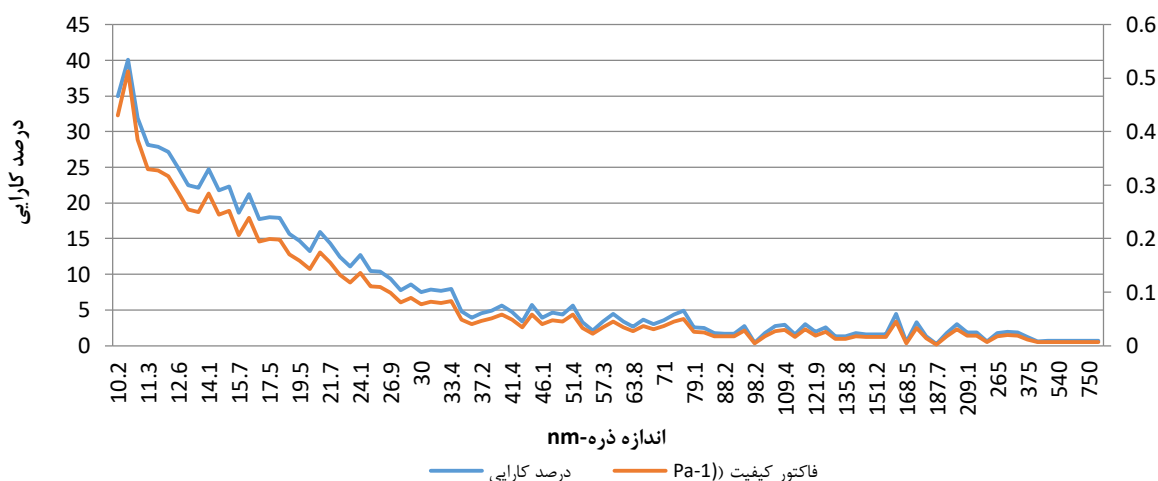


شکل-۵. تصویر SEM ذرات گیر افتاده در فیلترمدیای PAN در آزمون کارایی اولیه

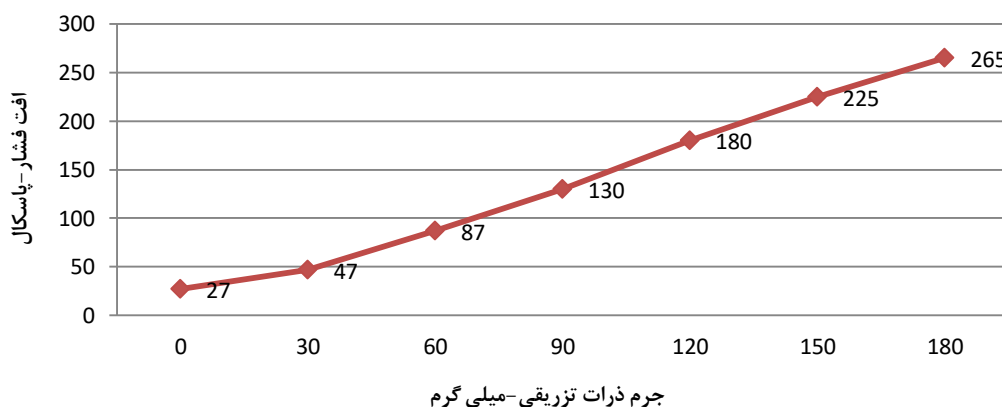
شکل ۶ میانگین کارایی و فاکتور کیفیت فیلتر مدیای PAN را در اندازه ذرات مختلف نشان می‌دهند. میانگین کارایی فیلتر مدیای



شکل-۶. مقایسه میانگین کارایی و فاکتور کیفیت فیلتر مدیای PAN



شکل-۷. منحنی عملکرد فیلتراسیون بستر پلی پروپیلن (افت فشار = ۱ پاسکال)



شکل-۸. میانگین افت فشار در مراحل مختلف تزریق ذرات

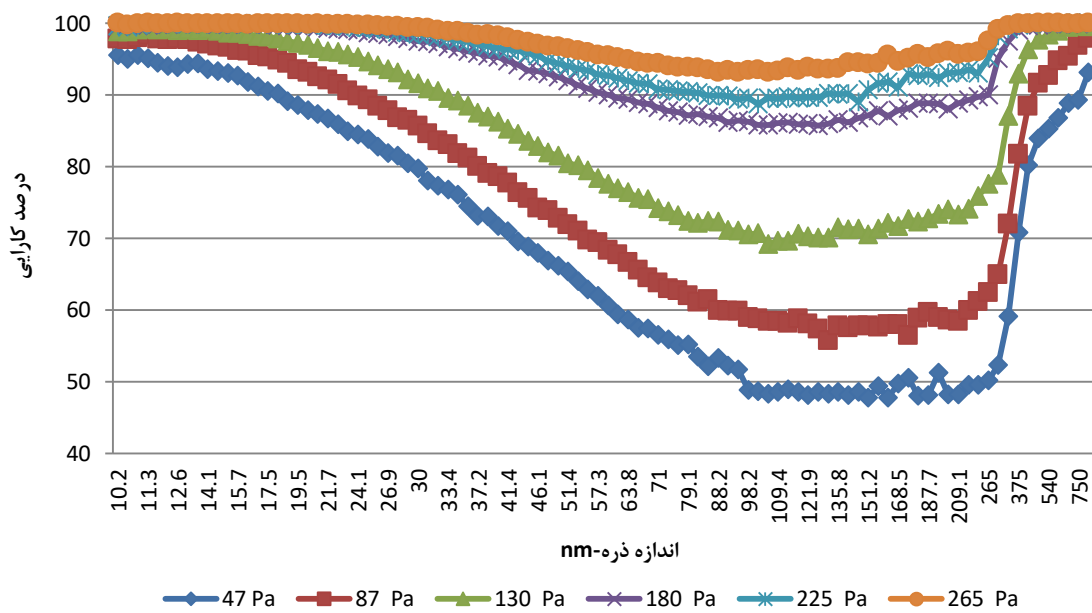
آزمون تا رسیدن به حد مشخصی مورد بررسی قرار گرفت. کارایی جمع آوری نیز بعد از هر مرتبه بارگذاری تعیین گردید. میانگین افت فشار برحسب جرم ذرات بارگذاری شده در شکل ۸ نشان داده شده است. با توجه به شکل مشخص است که با افزایش جرم ذرات تزریقی در مراحل مختلف بارگذاری، افت فشار مدیا نیز افزایش می‌یابد.

آزمون ربایش گردوغبار مصنوعی

آزمون ربایش گردوغبار مصنوعی یا ارستنس برای فیلترمدیای شامل نانو الیاف PAN با بستر اسپان باند انجام گرفت. برای این آزمون، یک فیلتر هپا در انتهای تونل آزمون (پایین دست فیلتر آزمون) به اسم فیلتر نهایی قرار داده شد و غلظت‌های مشخص از گردوغبار ASHREA به تونل آزمون تزریق و افت فشار فیلتر

جدول-۳. نتایج میانگین کارایی (%) بعد از مراحل مختلف تزریق ذرات

افت فشار (پاسکال)						میانگین اندازه	گستره اندازه
۲۶۵	۲۲۵	۱۸۰	۱۳۰	۸۷	۴۷	(میکرون)	(میکرون)
۹۵/۸۸	۹۳/۱۶	۸۷/۴۰	۷۴/۳۱	۵۹/۴۹	۴۸/۸۸	۰/۲۲	۰/۲۰-۰/۲۵
۹۸/۷۶	۹۷/۵۴	۹۴/۲۱	۸۱/۱۴	۶۶/۴۱	۵۳/۸۵	۰/۳	۰/۲۵-۰/۳۵
۹۹/۹۲	۹۹/۸۳	۹۹/۳۳	۹۴/۶۴	۸۵/۰۱	۷۵/۵۱	۰/۴	۰/۳۵-۰/۴۵
۹۹/۹۷	۹۹/۹۸	۹۹/۸۰	۹۸/۰۳	۹۲/۱۵	۸۴/۶۰	۰/۵۲	۰/۴۵-۰/۶۰
۹۹/۹۴	۱۰۰	۹۹/۹۴	۹۹/۲۲	۹۵/۰۷	۸۷/۷۸	۰/۶۷	۰/۶۰-۰/۷۵
۹۹/۹۶	۱۰۰	۹۹/۹۶	۹۹/۵۶	۹۷/۳۷	۹۱/۲۲	۰/۸۷	۰/۷۵-۱/۰۰



شکل-۹. میانگین کارایی برحسب اندازه ذرات درافت فشارهای مختلف

جدول-۴. میزان ارستنس و ظرفیت غبارگیری بعد از مراحل مختلف تزریق ذرات

DHC-mg	A-%	m _a -mg	Δm _a -mg	m ₂ -mg	m ₁ -mg	ΔP ₂ -Pa	m _{tot} -mg	Δm-mg	ΔP ₁ -Pa
۲۹/۹۶	۹۹/۸۶	۰	۰/۰۴	۵۲/۵۷	۵۲/۵۳	۴۷	۳۰	۳۰	۲۷
۵۹/۹۵	۹۹/۸۳	۰/۰۰۱	۰/۰۵	۵۲/۶۲	۵۲/۵۷	۸۷	۶۰	۳۰	۴۷
۸۹/۹۸	۹۹/۹۳	۰/۰۰۲	۰/۰۲	۵۲/۶۴	۵۲/۶۲	۱۳۰	۹۰	۳۰	۸۷
۱۱۹/۹۷	۹۹/۹۰	۰/۰۰۲	۰/۰۳	۵۲/۶۷	۵۲/۶۴	۱۸۰	۱۲۰	۳۰	۱۳۰
۱۴۹/۹۴	۹۹/۸۰	۰/۰۰۲	۰/۰۶	۵۲/۷۳	۵۲/۶۷	۲۲۵	۱۵۰	۳۰	۱۸۰
۱۷۹/۹۶	۹۹/۸۶	۰/۰۰۲	۰/۰۴	۵۲/۷۷	۵۲/۷۳	۲۶۵	۱۸۰	۳۰	۲۲۵

نماد و واحدها

$$A = (1 - \frac{\Delta m_{ff+md}}{\Delta m}) \times 100, (\%)$$

A ارستنس (%), DHC ظرفیت غبارگیری (میلی گرم), Δm_{ff+md}

DHC = m_{tot} - ∑(Δm_{ff} + m_d)

m_d جرم گردوغبار در کانال بعد از فیلتر (میلی گرم)

m_{tot} جرم جمعی ذرات تزریق شده (میلی گرم)

m₁ جرم فیلتر نهایی قبل از افزایش تزریق ذرات (میلی گرم)

m₂ جرم فیلتر نهایی بعد از افزایش تزریق ذرات (میلی گرم)

Δm میزان افزایش تزریق ذرات (میلی گرم)

Δm_{ff} اختلاف جرم فیلتر نهایی (میلی گرم)

ΔP₁ افت فشار قبل از افزایش تزریق ذرات (پاسکال)

ΔP₂ افت فشار بعد از افزایش تزریق ذرات (پاسکال)

بالایی برای ذرات ۸۰ تا ۲۵۰ نانومتری دارند. فاکتور کیفیت بالای فیلتر منجر به افزایش کارایی جمع‌آوری و کاهش افت فشار می‌شود. باین‌حال نتایج آزمون ربایش گردوغبار مصنوعی نشان داد که با افزایش جرم ذرات تزریقی، افت فشار مدیا نیز افزایش می‌یابد.

مطابق شکل ۲ در شرایط الکتروروسی مطالعه بهترین ویژگی‌های ریخت‌شناسی شامل توزیع یکنواخت لیف، عدم وجود دانه و شاخه‌های اضافه به‌دست آمد. از نظر ریخت‌شناسی، نانو الیاف PAN قطر نسبتاً بزرگ داشته و از نوع غیر دانه‌دار و یکنواخت و متخلخل بود که همین موضوع باعث کاهش مقاومت مدیا در برابر عبور هوا و کاهش افت فشار و راندمان پایین شده است. تعداد دانه با متغیر قطر الیاف و درصد تخلخل همبستگی منفی دارد، به‌طوری که با افزایش قطر الیاف مدیا و درصد تخلخل آن که هر دو در کاهش افت فشار و از طرفی کاهش راندمان جمع‌آوری مؤثر هستند (۲۱)، بهبود کیفیت ساختاری فیلتر از نقطه نظر کاهش تعداد برجستگی‌های دانه مانند در الیاف حاصل خواهد شد. Kaur و همکاران مشاهده نمودند که حضور تعداد زیاد دانه در الیاف می‌تواند با تأثیر بر دانسته فشردگی فیلتر، باعث کاهش اندازه حفرات (پور سایز) و میزان تخلخل و در نتیجه کاهش نفوذپذیری سیال عبوری گردد (۲۲). باین‌وجود، Yun و همکاران دریافتند نانوالیاف PAN حاوی گره در مقایسه با الیاف بدون گره، افت فشار کمتر و فاکتور کیفیت بالاتری دارند (۲۳). با توجه به مطالعات می‌توان اذعان داشت که حضور دانه در ساختار نانوالیاف منجر به ایجاد جداسازی فیزیکی بین لایه‌های نانوالیاف می‌شود که می‌تواند باعث بهبود نفوذپذیری هوا و عملکرد فیلتراسیون شود که هم‌راستا با این مطالعات، کاهش راندمان در مطالعه حاضر را می‌توان به عدم وجود دانه نسبت داد.

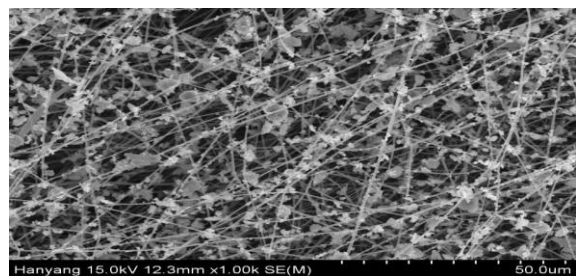
با توجه به جدول ۲ مدیای PAN دارای فاکتور کیفیت بالایی برای ذرات ۸۰ تا ۲۵۰ نانومتری به علت افت فشار ناچیز است. به‌طور معمول یک فیلتر با فاکتور کیفیت بالا از کارایی جمع‌آوری زیاد و افت فشار کم برخوردار است. طبق تئوری کلاسیک فیلتراسیون، میزان کارایی رابطه مستقیم با ضخامت فیلتر، فشردگی الیاف و رابطه عکس با قطر لیف و میزان تخلخل دارد (۲۴). الیاف با قطر کوچکتر دارای مساحت سطحی بیشتر، تراکم و چگالی بالاتر و سایز حفره کوچکتر بوده در نتیجه قابلیت فیلتراسیون مدیا را افزایش می‌دهند. در حالی که الیاف با قطر بزرگتر معمول حجیم‌تر، متخلخل‌تر و با نفوذپذیری هوای بالاتر و افت فشار کمتر هستند (۲۵). کارایی جمع‌آوری بالا از طریق قطر الیاف کوچکتر و دانسته فشردگی بالاتر الیاف، و افت فشار پایین از طریق دانسته فشردگی پایین (تخلخل بالاتر)، 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 (۲۱). Wang و همکاران با بررسی فاکتور کیفیت فیلترهایی متشکل از یک لایه نانولیف بر روی یک بستر میکرولیفی بی‌باقت، به این نتیجه رسیدند که با افزایش فشردگی نانوالیاف درصد کارایی و

جدول ۳ بیانگر میانگین کارایی مدیا بعد از مراحل مختلف تزریق و رسیدن به افت فشارهای مدنظر است. همان‌طور که مشخص است، با افزایش جرم تزریقی، کارایی جمع‌آوری ذرات در گستره اندازه‌های مختلف نیز افزایش می‌یابد و به‌طور کلی، کارایی مدیا در حذف ذرات درشت‌تر، بیشتر است.

میانگین کارایی مدیا برحسب اندازه ذرات آزمون در افت فشارهای مختلف در شکل ۹ به نمایش گذاشته شده است. در بیشتر سایز ذرات، درصد کارایی مربوط به مرحله آخر بارگذاری (افت فشار ۲۶۵ پاسکال) از سایرین بالاتر بود. در مراحل ابتدایی تر بارگذاری ذرات، افت قابل توجهی در کارایی برای ذرات ۳۰-۳۳۰ نانومتر وجود داشت که با افزایش جرم تزریقی ذرات در مراحل بالاتر بارگذاری، این موضوع کم‌رنگ‌تر شد.

نتایج میزان ارستنس و ظرفیت غبارگیری مدیای PAN بعد از مراحل مختلف تزریق ذرات در جدول ۴ آورده شده است. ظرفیت غبارگیری و میزان گیراندازی (ارستنس) مدیا برای افت فشار نهایی ۲۶۵ پاسکال، به ترتیب حدود ۱۸۰ میلی‌گرم و ۹۹/۸۶ درصد محاسبه گردید.

تصویر SEM از فیلترمدیای PAN لود شده با ذرات آزمون در شکل ۱۰ به تصویر کشیده شده است.



شکل-۱۰. تصویر SEM از فیلترمدیای PAN لود شده با ذرات آزمون ارستنس

میانگین کارایی (Em) که یک میانگین وزنی کارایی برای ذرات ۰/۴ میکرونی در آزمون ارستنس و رسیدن به افت فشار نهایی است و مطابق فرمول ۸ محاسبه می‌شود، مطابق استاندارد ۷۷۹ EN برای کلاس‌بندی فیلترهای M و F مورد استفاده قرار می‌گیرد (۲۰). مطابق این محاسبات کارایی متوسط فیلترمدیای PAN برای گیراندازی ذرات ۰/۴ میکرونی برابر ۷۹/۳۲ درصد است که طبق کلاس‌بندی ۷۷۹ EN معادل کلاس M ۶ است. میانگین کلی ارستنس نیز بعد از ۶ مرحله بارگذاری حدود ۹۹/۸۶ درصد محاسبه گردید.

بحث

به لحاظ ریخت‌شناسی، نانو الیاف PAN، غیر دانه‌دار، نسبتاً بزرگ، متخلخل و یکنواخت هستند. این خصوصیات باعث کاهش مقاومت مدیا در برابر عبور هوا و کاهش افت فشار و راندمان پایین شده است. به‌دلیل افت فشار کم، نانو الیاف PAN فاکتور کیفیت

از آنجایی که برای نانوذرات، جمع‌آوری ذرات عمدتاً توسط مکانیسم انتشار صورت می‌گیرد، بنابراین با افزایش سایز ذرات میزان نفوذ افزایش خواهد یافت (۹). مبتنی بر تئوری فیلتراسیون، با کوچکتر شدن سایز ذرات مکانیسم انتشار و برای ذرات بزرگتر مکانیسم برخورد مستقیم رخ می‌دهد. با این حال ذرات با قطر ۰/۱-۰/۱۵ میکرون به سختی توسط این دو مکانیسم حذف می‌شوند و این ذرات به احتمال زیاد از مدیا عبور می‌کنند (۳۴). یک تجزیه و تحلیل جامع از نحوه اثرگذاری نانو الیاف بر ساختار فیلتر و انتقال MPPS به سمت قطر کوچکتر در مطالعه پودگورسکی و همکاران نشان داده شده است (۳۱). کاهش قطر لیف که منجر به کاهش سایز ذره با کمترین میزان کارایی می‌گردد به علت اثرات برخورد مستقیم است که در جمع‌آوری ذرات بر اثرات انتشاری غالب می‌شود (۳۴). کاهش افت فشار در مدیا می‌تواند ناشی از پور سایز و فضای بین لیفی بزرگتر باشد. این خواص احتمالاً روی هم افتادن الیاف بر یکدیگر را کاهش می‌دهد.

ظرفیت غبارگیری و میزان ارستنس مدیا برای افت فشار نهایی ۲۶۵ پاسکال، به ترتیب حدود ۱۸۰ میلی‌گرم و ۹۹/۸۶ درصد محاسبه گردید. ظرفیت غبارگیری مدیای حاضر نسبت به مدیاهای تجاری (به‌طور مثال ۴۶۱ گرم برای افت فشار نهایی ۴۵۰ پاسکال) بسیار ناچیز است، ولی شایان ذکر است که فیلترمدیای مورد آزمون دارای ضخامت ۰/۱ میلی‌متر و سطح مقطع ۲۸/۲۶ سانتی‌متر مربع و فیلتر مدیاهای تجاری که با متد EN ۷۷۹ مورد آزمون ارستنس قرار می‌گیرند دارای سطح مقطع ۰/۳۵ مترمربع با حداقل ضخامت ۱۰ سانتی‌متر می‌باشند (۲۰). نتایج آزمون ریبایش گردوغبار مصنوعی یا ارستنس برای فیلترمدیای PAN نشان داد که با افزایش جرم ذرات تزریقی در مراحل مختلف بارگذاری، افت فشار مدیا نیز افزایش می‌یابد. این موضوع می‌تواند ناشی از تشکیل یک گردوغبار و گرفتگی منافذ مدیا توسط ذرات و در نتیجه افزایش مقاومت مدیا نسبت به عبور هوا باشد (۳۵). با افزایش جرم تزریقی، کارایی جمع‌آوری ذرات در گستره اندازه‌های مختلف نیز افزایش می‌یابد و به‌طور کلی، کارایی مدیا در حذف ذرات درشت‌تر، بیشتر می‌گردد. این عامل نیز ناشی از افزایش سطح فیلتراسیون به علت تشکیل یک گردوغبار است (۳۵). دکتر Seeberger تایید کرد که ادغام نانو الیاف در فیلترهای مصنوعی در محصول تجاری IREMA FILTER توانسته است ظرفیت غبارگیری فیلترهای مصنوعی (سنتتیک یا پشم شیشه) را درافت فشار یکسان تا دو برابر افزایش دهد، ضمن آن که باعث حفظ افت فشار پایین در طی بارگذاری ذرات شده که این موضوع به شدت در مبحث صرفه‌جویی در مصرف انرژی حائز اهمیت است (۳۶). Bao و همکاران نشان دادند که ویژگی‌های چون پورسایز و فضای بین لیفی بزرگتر و ضخامت بیشتر در کنار سایز نانویی الیاف که کارایی فیلتراسیون را افزایش می‌دهد، می‌توانند ظرفیت غبارگیری مدیا را افزایش دهند و مانع از افزایش بی‌حد افت فشار گردند (۳۴).

میزان افت فشار هر دو افزایش می‌یابد، که این امر ناشی از افزایش جزء جامد لایه نانو لیفی و کاهش تخلخل و حجم حفرات و در نتیجه افزایش سطح فیلتراسیون است. آن‌ها نشان دادند درصد کارایی فیلتراسیون نانوالیاف با فشردگی ۰/۱۳۴ نسبت به نمونه با فشردگی ۰/۰۵۹ برای ذرات ۰/۳ میکرونی حدود دو برابر بیشتر است (۰/۸۰/۰۱٪ در مقابل ۰/۳۸/۴۰٪) و میزان افت فشار آن حدود ۳/۸ برابر بالاتر است (۲۹/۴ Pa در مقابل ۷/۷ Pa)، در نهایت فاکتور کیفیت آن به‌رغم کارایی فیلتراسیون دو برابری کمتر می‌شود (Pa^{-1} ۰/۰۵۴۷ در مقابل 0.0629Pa^{-1} (۲۴). واضح است که کارایی حذف با کاهش قطر لیف، افزایش می‌یابد و این در توافق با نظریه رخداد جریان لغزشی است. در جریان لغزشی ذرات معلق در هوا نزدیک‌تر نسبت به سطح لیف حرکت می‌کنند و این چنین شانس ریبایش آن‌ها از طریق برخورد مستقیم افزایش می‌یابد. فاکتور کیفیت نسبتی بین کارایی و افت فشار است و به‌طور کلی مطلوب است که یک فیلتر کارایی بالا و افت فشار پایین داشته باشد، بنابراین فاکتور کیفیت بالاتر نشان‌دهنده عملکرد بهتر فیلتر است. الیاف PAN با دو ویژگی محکم و سخت مشخص می‌شوند (۲۶)، که به این دلیل می‌توانند گزینه خوبی برای کاربرد در فیلتراسیون هوا باشند و مطالعات مختلف نیز عملکرد فیلتراسیون خوبی از آن نشان داده است (۱). عملکرد خوب الیاف PAN می‌تواند از طریق تخلخل مناسب آن (۲۷، ۲۸)، الیاف تراز و یکنواخت و جهت‌دار با توزیع قطری باریک توجیه شود (۲۹، ۳۰). فیلترهای میکرولیفی معمول دارای حداقل کارایی جمع‌آوری ذرات در گستره اندازه ۱۰۰ تا ۵۰۰ نانومتر هستند که MPPS نامیده می‌شود. این کارایی می‌تواند با استفاده از نانوالیاف افزایش می‌یابد. با توجه به جدول ۲ اندازه ذره با بیشترین نفوذ در این مطالعه ۲۶۵ نانومتر بود. این مشاهده با مطالعات مشابه گذشته همخوانی دارد. Podgórski و همکاران نیز از دو طریق آزمایشگاهی و تئوریک تأکید کردند که در فیلترهای نانو لیفی به علت قطر کوچک الیافشان پارامتر "بانفوذترین سایز ذره" (MPPS) به‌طور قابل توجهی کاهش می‌یابد (۳۱). همچنین مطالعات مختلف نشان داده‌اند که کاهش قطر لیف و افزایش وزن مبنا باعث انتقال MPPS به گستره اندازه کوچکتر می‌شود (۳۲، ۳۳).

مطابق شکل ۶ کاهش کارایی فیلتراسیون مدیای موردبررسی در گستره اندازه خاصی از ذرات نشانگر همان اندازه ذرات با بیشترین میزان نفوذ و یا همان کمترین کارایی جمع‌آوری است. به‌طور متوسط برای فیلتر نانو لیفی مورد استفاده در این مطالعه، در دامنه سایزی ۲۰ تا ۴۰۰ نانومتر منحنی با روند نزولی و بعد صعودی دیده می‌شود و در خارج از این رنج کارایی تقریباً روند ثابتی را طی می‌نماید.

Yun و همکاران نشان دادند در فیلتراسیون نانوذرات (ذرات کوچکتر از ۱۰۰ نانومتر) توسط فیلتر مدیاهای نانولیفی PAN، درصد نفوذ ذرات (کارایی-۱) با افزایش سایز ذرات افزایش می‌یابد.

نتیجه گیری

و برنامه ریزی کردند. سمیه فرهنگ دهقان داده ها را تجزیه و تحلیل کردند. آیسا قاسمی کوزه کنان در تهیه مدیای فیلتر مشارکت کردند. مجید حبیبی محرز تست فیلتراسیون را انجام دادند. سمیه فرهنگ دهقان و آیسا قاسمی کوزه کنان نقش عمده‌ای در تفسیر داده ها، نتیجه گیری و نگارش متن داشتند. نسخه نهایی مقاله مورد تایید تمامی نویسندگان قرار گرفت.

تضاد منافع: نویسندگان تصریح می کنند که هیچ گونه تضاد منافی در مطالعه حاضر وجود ندارد.

نکات بالینی کاربردی برای جوامع نظامی

- در صنایع نظامی، احتمال مواجهه با انواع مختلفی از آلاینده های ذره ای و گازها و بخارات وجود دارد که می توانند عملکرد تجهیزات نظامی را دچار اختلال کنند و همچنین سطح سلامت و ایمنی کارکنان را نیز به مخاطره بیندازند. با توجه به جایگاه و اهمیت صنایع نظامی در کشور و نیز ضرورت حفظ سلامت کارکنان آن ها، توجه ویژه به کنترل آلاینده های هوا حیاتی به نظر می رسد. علاوه بر آن، کاهش آلاینده های هوا و حفظ کیفیت هوا در محیط های کاری، میزان بهره وری کارکنان را افزایش داده که می تواند منجر به افزایش بازدهی این صنایع گردد.

نانو الیاف تولیدی، تخلخل بالایی داشته که همین موضوع باعث کاهش مقاومت مدیا در برابر عبور هوا، افزایش نفوذپذیری آن و کاهش افت فشار شده است. از این رو با وجود کارایی متوسط آن، به علت افت فشار ناچیز، نمره فاکتور کیفیت قابل قبولی را کسب نموده است. ظرفیت غبارگیری مدیای حاضر نسبت به مدیاهای تجاری (به طور مثال ۴۶۱ گرم برای افت فشار نهایی ۴۵۰ پاسکال) بسیار ناچیز است، ولی شایان ذکر است که مدیای مورد آزمون دارای ضخامت ۰/۱ میلی متر و سطح مقطع ۲۸/۲۶ سانتی گراد و فیلتر مدیاهای تجاری که با روش EN ۷۷۹ مورد آزمون ارستنس قرار می گیرند دارای سطح مقطع ۰/۳۵ مترمربع با حداقل ضخامت ۱۰ سانتی متر می باشند. کارایی جمع آوری و ظرفیت غبارگیری مناسب در کنار ضخامت کم مدیاهای نانو لیفی، قابلیت به کارگیری آن ها را در مباحث فیلتراسیون هوا مشخص تر می نماید.

تشکر و قدردانی: این مقاله حاصل بخشی از طرح تحقیقاتی مصوب دانشگاه علوم پزشکی و خدمات بهداشتی درمانی تهران (کد: ۲۱۸۰۹-۲۷-۰۱-۹۲) است که با حمایت دانشگاه علوم پزشکی و خدمات بهداشتی درمانی تهران اجرا شده است.

نقش نویسندگان: فریده گلبابایی و سمیه فرهنگ دهقان در طراحی مطالعه مشارکت کردند. فریده گلبابایی پروژه را مدیریت

منابع

1. Zhang Q, Welch J, Park H, Wu CY, Sigmund W, Marijnissen JC. Improvement in nanofiber filtration by multiple thin layers of nanofiber mats. *Journal of Aerosol Science*. 2010;41(2):230-6. doi:10.1016/j.jaerosci.2009.10.001
2. Barhate RS, Ramakrishna S. Nanofibrous filtering media: filtration problems and solutions from tiny materials. *Journal of Membrane Science*. 2007; 296(1-2):1-8. doi:10.1016/j.memsci.2007.03.038
3. Dehghan SF, Golbabaei F, Maddah B, Yarahmadi R, Zadeh AS. Fabrication and optimization of electrospun polyacrylonitrile nanofiber for application in air filtration. *Iran Occupational Health*. 2016; 13(5):11-23. [In Persian]
4. Dehghan SF, Golbabaei F, Maddah B, Latifi M, Pezeshk H, Hasanzadeh M, Akbar-Khanzadeh F. Optimization of electrospinning parameters for polyacrylonitrile-MgO nanofibers applied in air filtration. *Journal of the Air & Waste Management Association*. 2016;66(9):912-21. doi:10.1080/10962247.2016.1162228
5. Kalantary S, Golbabaei F, Latifi M, Shokrgozar MA, Yaseri M. Feasibility of using vitamin E-loaded poly (ϵ -caprolactone)/gelatin nanofibrous mat to prevent oxidative stress in skin. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*. 2020;20(6): 3554-62. doi:10.1166/jnn.2020.17486
6. Golbabaei F, Mohraz MH, Yarahmadi R,

- Sadighzadeh A, Mohammadi H, Dehghan SF. Comparison of filtration performance between neat and plasma-treated PAN/MgO nanofibers in the removal of 10 to 1000 nm particles. *Iran Occupational Health*. 2021;18(4):45-62. [In Persian]
7. Koozekonan AG, Esmaeilpour MR, Kalantary S, Karimi A, Azam K, Moshiran VA, Golbabaei F. Fabrication and characterization of PAN/CNT, PAN/TiO₂, and PAN/CNT/TiO₂ nanofibers for UV protection properties. *Journal of the Textile Institute*. 2021;112(6):946-54. doi:10.1080/00405000.2020.1813408
8. Dehghan SF, Golbabaei F, Mousavi T, Mohammadi H, Kohneshahri MH, Bakhtiari R. Production of nanofibers containing magnesium oxide nanoparticles for the purpose of bioaerosol removal. *Pollution*. 2020;6(1):185-96. doi:10.22059/poll.2019.278394.604
9. Yun KM, Hogan Jr CJ, Matsubayashi Y, Kawabe M, Iskandar F, Okuyama K. Nanoparticle filtration by electrospun polymer fibers. *Chemical Engineering Science*. 2007;62(17):4751-9. doi:10.1016/j.ces.2007.06.007
10. Koozekonan AG, Esmaeilpour MR, Kalantary S, Karimi A, Azam K, Golbabaei F. Feasibility of fabricating PAN/TiO₂ electrospinning nanofibers with UV protection property. *Journal of Health and Safety at Work*. 2021;11(1):164-76. [In Persian]
11. Koozekonan AG, Esmaeilpour MR, Kalantary S,

- Karimi A, Azam K, Golbabaei F. Fabrication and characterization of TiO₂ and MWCNT coated electrospinning nanofibers for UV protection properties. *MethodsX*. 2021;8:101354. doi:10.1016/j.mex.2021.101354
12. Anandjiwala RD, Boguslavsky L. Development of needle-punched nonwoven fabrics from flax fibers for air filtration applications. *Textile Research Journal*. 2008;78(7):614-24. doi:10.1177/155892501400900117
13. Müller TK, Meyer J, Thébault E, Kasper G. Impact of an oil coating on particle deposition and dust holding capacity of fibrous filters. *Powder Technology*. 2014;253:247-55. doi:10.1016/j.powtec.2013.11.036
14. ISO: ISO 29463: High- efficiency filters and filter media for removing particles in air- part3: Testing flat sheet filter media. In. Geneva: International Organization for standardization; 2011. Available from: <https://www.iso.org/standard/51837.html>
15. ASTM. F2299 /F2299M - 03: Standard Test Method for Determining the Initial Efficiency of Materials Used in Medical Face Masks to Penetration by Particulates Using Latex Spheres. American Society for Testing and Materials. 2010. Available from: <https://standards.globalspec.com/std/3840413/astm-f2299-f2299m-03-2010>
16. ASHREA. ASHREA 52.2: Method of Testing General Ventilation Air-Cleaning Devices for Removal Efficiency by Particle Size. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc; ASHRAE; 2006. Available from: https://www.techstreet.com/ashrae/standards/ashrae-52-2-2007?product_id=1509385
17. Habibi Mohraz M, Golbabaei F, Je Yu I, Sedigh Zadeh A, Mansournia MA, Farhang Dehghan S. Investigating effective parameters on the nanoparticles air filtration using Polyurethane nanofiber mats. *Health and Safety at Work*. 2018;8(1):29-42. [In Persian]
18. 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. doi:10.1155/2014/859656
19. Yu H, Jiao Z, Hu H, Lu G, Ye J, Bi Y. Fabrication of Ag₃PO₄-PAN composite nanofibers for photocatalytic applications. *CrystEngComm*. 2013;15(24):4802-5. doi:10.1039/C3CE00073G
20. CEN E. 779: Particulate Air Filters for General Ventilation-Determination of the Filtration Performance. European Committee for Standardization: Brussels, Belgium. 2012. Available from: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/9b963cd8-8f04-4e79-9872-2bfe2a4fad62/en-779-2012>
21. Huang SH, Chen CW, Kuo YM, Lai CY, McKay R, Chen CC. Factors affecting filter penetration and quality factor of particulate respirators. *Aerosol and Air Quality Research*. 2013;13(1):162-71. doi:10.4209/aaqr.2012.07.0179
22. Kaur S, Gopal R, Ng WJ, Ramakrishna S, Matsuura T. Next-generation fibrous media for water treatment. *Mrs Bulletin*. 2008;33(1):21-6. doi:10.1557/mrs2008.10
23. 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. doi:10.1016/j.seppur.2010.09.002
24. 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. doi:10.1016/j.jaerosci.2007.12.003
25. Hutten IM. Handbook of nonwoven filter media. Elsevier; 2007.
26. Papkov D, Zou Y, Andalib MN, Goponenko A, Cheng SZ, Dzenis YA. Simultaneously strong and tough ultrafine continuous nanofibers. *ACS nano*. 2013;7(4):3324-31. doi:10.1021/nn400028p
27. Yu X, Xiang H, Long Y, Zhao N, Zhang X, Xu J. Preparation of porous polyacrylonitrile fibers by electrospinning a ternary system of PAN/DMF/H₂O. *Materials Letters*. 2010;64(22):2407-9. doi:10.1016/j.matlet.2010.08.006
28. Nataraj SK, Yang KS, Aminabhavi TM. Polyacrylonitrile-based nanofibers—A state-of-the-art review. *Progress in Polymer Science*. 2012;37(3):487-513. doi:10.1016/j.progpolymsci.2011.07.001
29. Chen HM, Yu DG. An elevated temperature electrospinning process for preparing acyclovir-loaded PAN ultrafine fibers. *Journal of Materials Processing Technology*. 2010;210(12):1551-5. doi:10.1016/j.jmatprotec.2010.05.001
30. Ji L, Zhang X. Ultrafine polyacrylonitrile/silica composite fibers via electrospinning. *Materials Letters*. 2008;62(14):2161-4. doi:10.1016/j.matlet.2007.11.051
31. Podgorski 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. doi:10.1016/j.ces.2006.07.022
32. Hinds WC. *Aerosol technology: properties, behavior, and measurement of airborne particles*. John Wiley & Sons; 1999.
33. Leung WW, 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. doi:10.1016/j.seppur.2009.10.017
34. 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. doi:10.1016/j.seppur.2015.12.045
35. Cheng YH, Tsai CJ. Factors influencing pressure drop through a dust cake during filtration. *Aerosol Science and Technology*. 1998;29(4):315-28. doi:10.1080/02786829808965572
36. Seeberger A. Synthetic filter media: Balancing energy efficiency and electrostatics in new synthetic filter media. *Filtration & Separation*. 2011;48(1):22-5. doi:10.1016/S0015-1882(11)70042-8