

ORIGINAL RESEARCH PAPER

## Fabrication of PET Nanofibers Media by Electrospinning Method and Determining its Efficiency in Removing Submicron and Micron Particle Contaminants from Air

Meghdad Kazemi<sup>1</sup>, Saba Kalantari<sup>2</sup>, Alireza Abbasi<sup>2</sup>, Abbas Rahimi Foroushani<sup>3</sup>, Hossein Mowlavi<sup>4</sup>, Amir Hossein Montazemi<sup>5</sup>, Farideh Golbabaei<sup>1\*</sup>

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

<sup>2</sup> School of Chemistry, College of Science, University of Tehran, Tehran, Iran

<sup>3</sup> Department of Statistics and Epidemiology, School of Public Health, Tehran University of Medical Sciences, Tehran, Iran

<sup>4</sup> Department of Textile Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

<sup>5</sup> SanatYaran Manufacturing and Industrial Company, Alborz Industrial City, Qazvin, Iran

Received: 2022-07-02

Accepted: 2022-10-24

### ABSTRACT

**Introduction:** In recent years, the manufacture of air purification media, especially nanofiber filters using polymeric materials and the electrospinning method, has received much attention in air pollution control. The production of high-performance media and low-pressure drops is an important issue in air filtration. This study aimed to investigate the feasibility of fabricating electrospinning polyethylene terephthalate (PET) media to abduct submicron and micron particles from the air stream.

**Material and Methods:** To determine the optimal device conditions in the manufacture of PET media, different weight percentages of a PET polymer solution in a mixture of trifluoroacetic acid and dichloromethane solvents (70:30) were first prepared in a pilot study, and various parameters of the electrospinning device were examined and analyzed along with performing the electrospinning process. The surface and morphological characteristics of the media were evaluated using SEM. The pressure drop and efficiency of particle trapping were assessed using a mask and media pressure by a pressure drop test device.

**Results:** The optimal electrospinning conditions of the PET polymer solution were obtained at a concentration of 20%. The average diameter of nanofibers PET was  $163 \pm 600$  nm with a pressure drop of  $26.33 \pm 5.5$  pa, and average efficiencies of  $97.42 \pm 1.67\%$  and  $99.85 \pm 0.21$  were obtained for submicron and micron particles, respectively, with a quality factor (QF) value of 0.1740.

**Conclusion:** The produced media can abduct and remove particles from the air stream for submicron and micron particles in ranges of 96-99% and 99-100%, respectively, with an average pressure drop of  $26.33 \pm 5.5$  pa.

**Keywords:** Electrospinning, Polyethylene terephthalate, Nanofibers, Filtration

### HOW TO CITE THIS ARTICLE

Kazemi M, Kalantari S, Abbasi A, Rahimi Foroushani A, Mowlavi H, Montazemi AM, Golbabaei F. Fabrication of PET Nanofibers Media by Electrospinning Method and Determining its Efficiency in Removing Submicron and Micron Particle Contaminants from Air. *J Health Saf Work.* 2023; 13(1): 44-59.

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

1. INTRODUCTION

In recent years, the manufacture of air purification media, especially nanofiber filters using polymeric materials and the electrospinning method, has received much attention in air pollution control. The production of high-performance media and low-pressure drops is an important issue in air filtration for which good findings in nanofiber substrates are reported in recent studies. Electrospun nanofibers have high particle holding capacity, small pore structures, high permeability, large surface area, and low base weight, which improves the high filtration efficiency of filters and nanofiber media. This study aimed to investigate the feasibility of fabricating electrospinning PET media to abduct submicron and micron particles from the air stream.

2. MATERIAL AND METHODS

In this experimental study, to determine the optimal device conditions in the manufacture of PET media, different weight percentages of a PET polymer solution (17.5, 20, and 22.5%) in a mixture of trifluoroacetic acid (TFA) and dichloromethane (DCM) solvents (70:30) were first prepared in a pilot study. Moreover, analyses were performed on various electrospinning device parameters, including voltage and electrospinning

temperature, the head of needle distance to the collector plate, needle diameter, injection rate, and rotation speed of the collector, and then the electrospinning process was performed under the above optimal conditions. To make PET nanofiber substrates, polymer solutions were transferred into a plastic syringe with a needle diameter of 21 to investigate the various parameters required for the electrospinning process. Based on the results of the pilot study, suitable conditions for the test were then obtained according to Table 1. The surface and morphological characteristics of nanofiber media produced under optimal conditions were examined by Field Emission Scanning Electron Microscopy (SEM). The pressure drop and efficiency of particle trapping in electrospun PET nanofiber media were evaluated using the performance test by the pressure drop mask and media.

3. RESULTS AND DISCUSSION

Based on microscopic findings, pressure drop, and efficiency measurements, the optimal electrospinning conditions of the PET polymer solution were obtained at a concentration of 20% concentration, 13 kV voltage, an injection rate of 0.7 ml / h, a rotation speed of 180 rpm, and the head of the needle to collector equal to 10 cm during an electrospinning time of 90 min.

Table 1: Parameters used for electrospinning of PET polymer solutions

| Electrospinning process parameters |                                  |              |                       |                                       |                       |                                   |
|------------------------------------|----------------------------------|--------------|-----------------------|---------------------------------------|-----------------------|-----------------------------------|
| Concentration of PET (%)           | Electrospinning temperature (°C) | Voltage (kV) | Injection rate (ml/h) | Needle tip to collector distance (cm) | Collector speed (rpm) | Duration of electrospinning (min) |
| 17.5-20-22.5                       | 23-25                            | 13           | 0.7                   | 10                                    | 180                   | 90                                |

All tests were performed under the optimal conditions listed in Table 1.

Table 2: Performance values, pressure drop, and quality factor for PET media with different weight percentages

| PET polymer concentration (%) | Particle size (μ) | Particle trapping efficiency (Mean±SD) | Pressure drop (Pa) | Quality factor (Pa <sup>-1</sup> ) |
|-------------------------------|-------------------|--|--------------------|------------------------------------|
| 17.5                          | 0.3               | 99.99±0.11                             | 225.16±0.8         | 0.0205                             |
|                               | 0.5               | 99.99±0.11                             |                    | 0.0205                             |
|                               | 1                 | 100                                    |                    | 0.0205                             |
|                               | 3                 | 100                                    |                    | 0.0205                             |
| 20                            | 0.3               | 96.23±0.98                             | 26.33±5.5          | 0.1730                             |
|                               | 0.5               | 98.60±0.02                             |                    | 0.1740                             |
|                               | 1                 | 99.70±0.15                             |                    | 0.1744                             |
|                               | 3                 | 100                                    |                    | 0.1745                             |
| 22.5                          | 0.3               | 94.78±1.17                             | 59.66±0.57         | 0.0763                             |
|                               | 0.5               | 96.33±0.9                              |                    | 0.0767                             |
|                               | 1                 | 99.34±0.26                             |                    | 0.0769                             |
|                               | 3                 | 100                                    |                    | 0.0770                             |

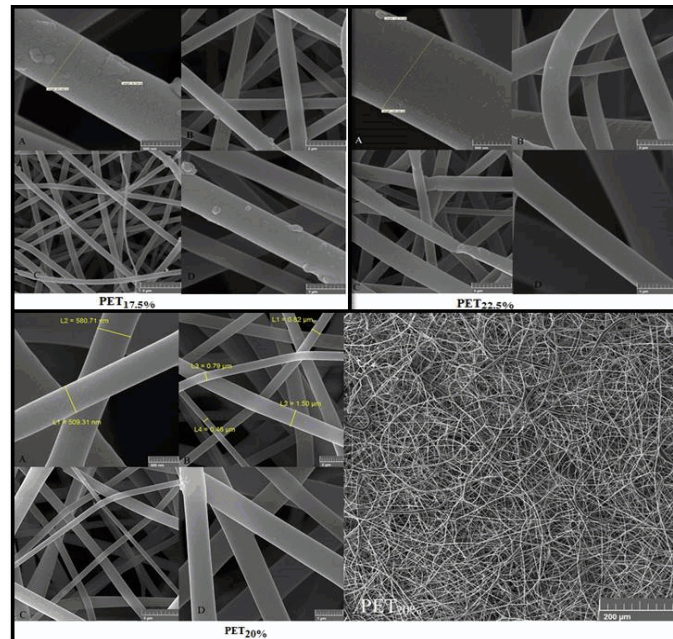


Fig. 1: SEM images from electrospun PET media (PET<sub>22.5%</sub>-PET<sub>20%</sub>-PET<sub>17.5%</sub>)

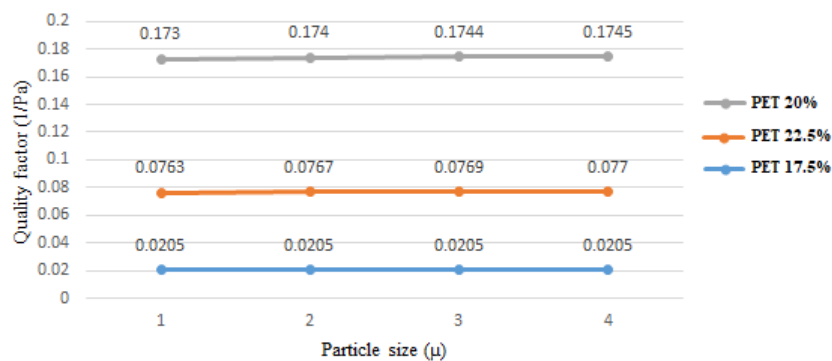


Fig. 2: Comparison chart of quality factor values of electrospun PET media in terms of different particle sizes

Table 2 shows the results of measuring the trapping efficiency, pressure drop, and quality factor of electrified PET media. Figure 1 shows the SEM images of electrospun PET media.

The quality factor (QF) is used as an important parameter that indicates the relationship between particle trapping efficiency and pressure drop in the filter and media. According to the values of the QF calculated for electrospun PET media with different percentages (Table 2), it can be argued that electrospun PET media with a concentration of 20% (with the highest QF compared to the other production media) has a better performance in terms of both trapping efficiency and pressure drop than the other PET media produced (Figure 2).

#### 4. CONCLUSION

The produced media can abduct and remove particles from the air stream for submicron and micron particles in the ranges of 96-99% and 99-100%, respectively, with an average pressure drop of  $26.33 \pm 5.5$  pa. The results of the study show that using this parameter to compare the performance of filters is more logical and appropriate since the QF shows the relationship between filtration efficiency and pressure drop, therefore, it considers the role of these two parameters simultaneously in the performance of filters and media.

#### 5. ACKNOWLEDGMENT

The study was funded by the Tehran University of Medical Sciences (TUMS).

## ساخت مدیای نانوالیاف PET به روش الکتروریسی و تعیین کارایی آن در حذف آلاینده‌های ذره‌ای زیر میکرونی و میکرونی هوا

مقداد کاظمی<sup>۱</sup>، صبا کلانتری<sup>۱</sup>، علیرضا عباسی<sup>۲</sup>، عباس رحیمی فروشانی<sup>۲</sup>، حسین مولوی<sup>۴</sup>، امیرحسین منتظمی<sup>۵</sup>،  
فریده گلبابایی<sup>۱\*</sup>

<sup>۱</sup> گروه مهندسی بهداشت حرفه‌ای، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی تهران، تهران، ایران

<sup>۲</sup> دانشکده شیمی، پردیس علوم، دانشگاه تهران، تهران، ایران

<sup>۳</sup> گروه آمار و اپیدمیولوژی، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی تهران، تهران، ایران

<sup>۴</sup> گروه مهندسی نساجی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

<sup>۵</sup> شرکت تولیدی و صنعتی صنعت یاران، شهرک صنعتی البرز، قزوین، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۴/۱۱، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۸/۰۲

### چکیده

**مقدمه:** در سال‌های اخیر ساخت مدیاهای تصفیه‌کننده هوا و به‌ویژه فیلترهای نانوالیافی با استفاده از مواد پلیمری و روش الکتروریسی در بحث کنترل آلودگی هوا بسیار مورد توجه قرار گرفته است. تولید مدیایی با کارایی بالا و افت فشار پایین موضوعی مهم در بحث فیلتراسیون هوا می‌باشد که مطالعات اخیر یافته‌های خوبی را در این خصوص در بسترهای نانوالیافی ارائه کرده است. مطالعه حاضر با هدف امکان‌سنجی ساخت مدیایی از جنس پلی‌اتیلن ترفتالات (PET) الکتروریسی شده جهت ربایش ذرات زیر میکرونی و میکرونی از جریان هوا انجام گرفته است.

**روش کار:** به منظور تعیین شرایط بهینه دستگاهی در ساخت مدیای PET، ابتدا طی یک مطالعه پایلوت درصدهای مختلف وزنی از محلول پلیمری PET در مخلوطی از تری فلورو استیک اسید (TFA) و دی کلرومتان (DCM) (۷۰:۳۰) تهیه و نیز پارامترهای مختلف دستگاهی الکتروریسی محلول (دو پمپ مدل ESDP۳۰) مورد بررسی و آنالیز قرار گرفت و تحت شرایط بهینه مذکور، فرآیند الکتروریسی انجام شد. به منظور بررسی خصوصیات سطحی و مورفولوژیک مدیاهای نانوالیافی تولیدشده در شرایط بهینه، از SEM و برای ارزیابی میزان افت فشار و کارایی به دام اندازی ذرات، از دستگاه تست کارایی و افت فشار ماسک و مدیا استفاده شد.

**یافته‌ها:** بر اساس یافته‌های مطالعه، شرایط بهینه الکتروریسی محلول پلیمری PET در غلظت ۲۰٪ وزنی به دست آمد. بر اساس نتایج، میانگین قطر نانوالیاف در مدیاهای تولیدی در شرایط بهینه،  $60 \pm 163$  نانومتر به دست آمد که دارای افت فشار  $26/33 \pm 5/5$  پاسکال، کارایی  $97/42 \pm 1/67$  درصد برای ذرات زیر میکرون و  $99/85 \pm 0/21$  درصد برای ذرات میکرونی و مقدار فاکتور کیفیت برابر با ۰/۱۷۴۰ بود.

**نتیجه گیری:** مدیاهای تولیدشده، توانایی ربایش و حذف ذرات از جریان هوا را برای ذرات زیر میکرونی در گستره ۹۹-۹۶ درصد و برای ذرات میکرونی در گستره ۱۰۰-۹۹ درصد و میانگین افت فشار  $26/33 \pm 5/5$  پاسکال دارا هستند.

**کلمات کلیدی:** الکتروریسی، پلی‌اتیلن ترفتالات، نانوالیاف، فیلتراسیون

### مقدمه

در سال‌های اخیر موضوع آلودگی هوا و به‌ویژه کیفیت هوای محیط‌های شغلی به یک مشکل و تهدید بزرگ برای سلامتی انسان و محیط‌زیست تبدیل شده است (۱). تماس افراد با آلاینده‌ها در محیط‌های مسکونی و شغلی و همچنین وضعیت نامناسب کیفیت هوا در داخل ساختمان‌ها و محیط بیرون، منجر به ایجاد خسارات فراوان جانی و مالی می‌شود (۲). بر اساس آمار سازمان بهداشت جهانی (WHO)، آلودگی هوا سالانه باعث مرگ بیش از ۳۳۰۰۰۰۰ نفر در محیط‌های بسته و فضاهای باز شهری می‌شود که نکته قابل توجه این موضوع این است که بخش عمده این مرگ‌ومیرها، در کشورهای درحال توسعه اتفاق می‌افتد (۳). آلودگی هوا می‌تواند شامل مواد شیمیایی (ذره‌ای و گازی) یا بیولوژیکی باشد که باعث ایجاد ناراحتی برای انسان و سایر موجودات زنده و یا خسارت به اشیاء و یا حتی آسیب به محیط‌زیست می‌گردد (۴، ۵). منابع زیادی باعث تولید آلودگی هوا می‌شوند و جالب‌تر اینکه فعالیت‌ها و دخالت‌های انسانی نظیر تراکم زیاد جمعیت، تعداد فزاینده وسایل نقلیه، کارخانجات، صنایع، ساخت‌وساز، نیروگاه‌ها و غیره نقش اصلی را در پیدایش آلودگی هوا دارند (۱، ۶). در سال ۲۰۱۳ موسسه بین‌المللی سرطان (IARC)، آلودگی هوا و ذرات معلق در آن را به‌عنوان ترکیبات صد در صد سرطان‌زای انسانی طبقه‌بندی کرده است (۷). بر اساس گزارش بار بیماری‌های جهانی که توسط سازمان بهداشت جهانی (WHO<sup>۳</sup>) در سال ۲۰۱۳ منتشر گردید آلودگی هوا به‌عنوان چهارمین عامل خطر برای مرگ در جهان و هفتمین عامل خطر در ایران شناخته شده است (۷، ۸). تمامی این آمارها و پژوهش‌ها دلالت بر این امر دارند که مشکل آلودگی هوا بایستی به نحوی حذف یا کنترل شود.

روش‌های مختلفی برای حذف و کنترل آلودگی هوا و به‌ویژه ذرات از جریان هوا وجود دارد (۹)؛ اما انتخاب

یک روش یا مکانیسم مناسب برای کنترل آلودگی هوا، مستلزم در نظر گرفتن معیارهای مختلفی نظیر عوامل اقتصادی، فنی یا مهندسی و محیطی می‌باشد به عبارتی در انتخاب یک روش مناسب، چندین معیار به‌طور هم‌زمان می‌تواند نقش داشته باشد (۱۱، ۳-۱۰). در بین روش‌های مختلف کنترل آلودگی هوا، فیلتراسیون به دلیل سهولت به‌کارگیری، دسترسی آسان، هزینه کم و کارایی بالای آن در جمع‌آوری مؤثر ذرات ریز، به‌عنوان ساده‌ترین و رایج‌ترین روش برای تصفیه هوا شناخته می‌شود (۳، ۱۳-۹، ۱۲). به‌منظور حذف ذرات به‌ویژه ذرات ریز، می‌توان به فیلترهای با راندمان بالا همچون هپا و اولپا که کارایی زیادی در حذف آلاینده‌های هوا دارند اشاره کرد. این فیلترها به‌طور گسترده‌ای در سیستم‌های پاک‌کننده هوا به‌منظور بهبود کیفیت هوا در محل‌های مسکونی و کار مورد استفاده قرار می‌گیرند (۹، ۱۴)؛ اما این فیلترها دارای معایبی نظیر هزینه بالا و عمر محدود می‌باشند که علاوه بر این می‌تواند باعث آلودگی زیست‌محیطی در مرحله دفع این فیلترها شود (۱۵). علاوه بر این عملکرد فیلترهای هپا می‌تواند تحت تأثیر پارامترهای مربوط به شرایط نصب، بهره‌برداری و نگهداری مانند شرایط تاریک، مرطوب و دما نسبتاً قابل توجه، کاهش یابد چراکه این شرایط امکان رشد باکتری‌ها، کپک‌ها و قارچ‌ها را فراهم می‌نماید (۹، ۱۶). از طرفی عملکرد فیلترها و مدیاها معمولاً از طریق کارایی فیلتراسیون، افت فشار و طول عمرشان مشخص می‌گردد که همگی به‌شدت به ساختار فیلتر مرتبط می‌باشند (۱۷، ۱۸). لذا در سال‌های اخیر فیلترهایی با ساختار نانوالیافی به دلیل داشتن عملکرد بهتر مورد توجه قرار گرفته است. یکی از روش‌های ساخت مدیاها نانوالیافی، الکتروریسی می‌باشد. الکتروریسی بهترین و پذیرفته‌ترین روش برای تولید الیاف نانومتریکی بوده که قرارگیری سائز الیاف در رنج نانو می‌تواند منجر به افزایش عملکرد و اثربخشی بهتر فیلترهای لیفی شود (۱۷ و ۲۴-۱۹). نانوالیاف الکتروریسی شده دارای ظرفیت بالای نگهداشت ذرات، ساختارهای حفره‌ای با اندازه

1. World Health Organization
2. International Agency for Research on Cancer
3. World Health Organization

سایر مطالعات نیز استفاده شود. سپس با آزمون و خطا و طی یک مطالعه پایلوت، اقدام به ساخت محلول الکتروریسی مناسب با درصدهای وزنی مختلف از PET و حتی نسبت‌های مختلف از حلال‌های مورد استفاده جهت محلول سازی PET گردید. شرایط مناسب دستگاهی الکتروریسی نیز با استفاده از انجام آزمون و خطاهای متعدد و بررسی ویژگی‌ها و شرایط فیزیکی و ظاهری نانوالیاف تولیدی (میزان کیفیت تشکیل الیاف PET) در حین الکتروریسی مشخص گردید.

### – آماده‌سازی محلول پلیمری و انجام فرآیند الکتروریسی

به منظور تهیه محلول الکتروریسی PET، درصدهای وزنی مختلفی (۱۷/۵، ۲۰ و ۲۲/۵ درصد) از پلیمر پلی‌اتیلن ترفتالات (گرید گرانول پلی‌استر ۶۶۹۴ MOD) خریداری شده از شرکت پتروشیمی شهید تندگویان ایران به مخلوطی از حلال‌های تری‌فلورو استیک اسید<sup>۲</sup> (TFA) ( $MW = 114.02 \text{ g/mol}$ ) و دی‌کلرومتان<sup>۳</sup> (DCM) ( $MW = 84.93 \text{ g/mol}$ ) خریداری شده از شرکت مرک آلمان با نسبت اختلاط ۷۰ به ۳۰ اضافه گردید. سپس این مخلوط با همزن مغناطیسی و در دمای محیط، به مدت ۳ ساعت هم زده شد (۳۰) تا محلول یکنواختی از پلی‌اتیلن ترفتالات آماده گردید. فرآیند الکتروریسی بستری نانوالیافی با استفاده از دستگاه الکتروریسی دو پمپ/دو طرفه مدل ESDP30 (ساخت شرکت فناوران نانومقیاس، ایران) انجام گرفت. به منظور ساخت بستری نانوالیافی PET، پس از انتقال محلول‌های پلیمری به داخل سرنگ پلاستیکی با قطر نیدل شماره ۲۱، پارامترهای مختلف مورد نیاز برای فرآیند الکتروریسی، بررسی و بر اساس نتایج کسب شده از مطالعه پایلوت، شرایط بهینه مطابق جدول ۱ به دست آمد.

کلید آزمون‌ها در شرایط بهینه مندرج در جدول ۱ انجام شد.

2. Trifluoroacetic acid (TFA)  
3. Dichloromethane (DCM)

کوچک، نفوذپذیری بالا، مساحت سطح زیاد و وزن مبنای پایین هستند (۱۷،۲۵) که این امر باعث ارتقای کارایی فیلتراسیون بالای فیلترها و مدیاهای نانوالیافی در مقایسه با فیلترهای هپا می‌شوند (۱۷،۲۵). در روش الکتروریسی معمولاً از محلول‌های پلیمری در ساخت نانوالیاف استفاده می‌گردد. به عنوان مثال مطالعه Choudhary و همکاران (۲۷) نشان می‌دهد که پلیمر پلی‌اتیلن ترفتالات (PET) می‌تواند امکان کاربرد در مدیاهای لیفی را به دلایلی همچون مقاومت شیمیایی و کششی بالا، پایداری حرارتی مطلوب و ارزان قیمت بودن داشته باشد. همان‌طور که گفته شد مدیای نفاخته PET دارای ساختار متخلخل و هزینه پایینی برای ساخت می‌باشد و می‌تواند در ترکیب با خواص مکانیکی آن مانند مقاومت مکانیکی بالا، نقش مهمی را در فیلتراسیون گردوغبار ایفا کند (۲۸). از غشاهای الکتروریسی تولیدی از PET می‌توان به عنوان فیلتر هوای داخل منزل و یا در مواردی که هوای کاملاً تمیز مورد نیاز است مانند بیمارستان‌ها، مناطق پاک صنعت دارویی و غذایی، هواپیماها و غیره استفاده کرد (۲۹). PET در کشور ایران به فراوانی توسط صنایع پتروشیمی تولید شده و در دسترس می‌باشد و همچنین استفاده از آن به دلیل قابل بازیافت بودن و هزینه پایین، مقرون به صرفه است (۲۸)؛ بنابراین مطالعه حاضر با هدف ساخت مدیایی با ساختار نانوالیافی (از نوع بی بافت آن) از جنس پلی‌اتیلن ترفتالات (PET) الکتروریسی شده جهت ربایش و حذف ذرات زیرمیکرونی و میکرونی از جریان هوا انجام گرفته است.

### روش کار

پژوهش حاضر یک مطالعه تجربی بوده که در شرایط آزمایشگاهی انجام شده و روش جمع‌آوری داده‌ها از طریق انجام فرآیندها و آزمون‌های آزمایشگاهی و دستگاهی بوده است. ابتدا با جستجو در مقالات و مطالعات مشابه، سعی شد تا به منظور کاهش خطاهای احتمالی و بهبود روش کار و در نتیجه کسب نتایج بهتر در مطالعه حاضر، از تجربیات

1. Polyethylene terephthalate



جدول ۱: پارامترهای فرآیند الکتروریسی

| غلظت پلیمر (%) | دمای الکتروریسی (°C) | ولتاژ (kV) | نرخ تزریق (ml/h) | فاصله نوک سوزن تا کالکتور (cm) | سرعت چرخش کالکتور (rpm) | زمان الکتروریسی (min) |
|----------------|----------------------|------------|------------------|--------------------------------|-------------------------|-----------------------|
| ۱۷/۲۲-۲۰-۵/۵   | ۲۵-۲۳                | ۱۳         | ۰/۷              | ۱۰                             | ۱۸۰                     | ۹۰                    |

فیلترها و مדיاها با کارایی زیاد و افت فشار کم دارای فاکتور کیفیت ( $Q_f$ )<sup>۲</sup> بالایی می‌باشند. بنابراین؛ یافتن نقطه بهینه برای ایجاد تعادل مناسب بین افت کارایی فیلترها و مדיاها جهت کسب فاکتور کیفیت قابل قبول، ضروری می‌باشد (۳۴). به منظور یافتن فاکتور کیفیت بسترهای نانوالیافی ساخته شده در سرعت‌های سطحی مختلف مورد بررسی از فرمول زیر استفاده می‌شود (۳۵):

$$Q_f = \frac{\ln\left(\frac{1}{1-\eta_0 F}\right)}{\Delta p} \quad \text{رابطه ۲}$$

در این فرمول  $Q_f$  فاکتور کیفیت ( $\text{Pa}^{-1}$ )،  $\Delta p$  افت فشار ( $\text{Pa}$ ) و  $\eta_0 F$  مقدار راندمان فیلتراسیون برای اندازه ذره  $dp$  (nm) می‌باشد.

### ≡ یافته‌ها

نتایج مطالعه پایلوت انجام گرفته به منظور تعیین مدت‌زمان مناسب برای انجام الکتروریسی در جدول ۲ ارائه شده است.

با توجه به نتایج جدول بالا که از مطالعه پایلوت انجام گرفته به منظور تعیین مدت‌زمان مناسب برای انجام الکتروریسی به دست آمده است، مدت‌زمان ۹۰ دقیقه به‌عنوان زمان مناسب برای انجام الکتروریسی و تولید مدیای PET انتخاب شد.

### – بررسی مورفولوژی مדיاهای تولیدی

بر اساس نتایج مطالعه بهترین نمونه‌های مدیای PET هنگامی به دست آمد که ولتاژ الکتروریسی برابر با

– تعیین مشخصات مדיاهای الکتروریسی شده – به منظور مطالعه ریخت‌شناسی و تعیین قطر نانو الیاف موجود در ساختار مדיاهای الکتروریسی شده، ابتدا نمونه مورد نظر در لایه‌ای از پلاتین پوشانده شده و سپس در مرکز پژوهش متالورژی رازی با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی<sup>۱</sup> (DSM-) میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی<sup>۱</sup> (DSM-) در ولتاژ ۱۵ کیلوولت مورد آنالیز و بررسی قرار گرفتند و از آن‌ها تصاویر مورد نظر تهیه شد.

### – ارزیابی عملکرد مדיاهای ساخته شده

عملکرد فیلترها و مדיاها معمولاً از طریق پارامترهای همچون کارایی فیلتراسیون در ربایش اندازه‌های مختلف ذرات، فاکتور کیفیت و افت فشار مشخص می‌گردد (۱۹،۲۰). در مطالعه حاضر میزان افت فشار و همچنین کارایی مדיاهای نانوالیافی در ربایش اندازه‌های مختلف ذرات توسط دستگاه تست ماسک تنفسی و فیلتر (مدیا) (ساخت شرکت فناوران نانومقیاس، ایران) در سرعت ۱۰ سانتی‌متر بر ثانیه (معادل دبی حجمی ۳۰ لیتر بر دقیقه) مورد اندازه‌گیری قرار گرفت (۳۱). کارایی فیلتراسیون ذرات با اندازه مشخص با استفاده از رابطه (۱) محاسبه گردید (۳۳):

$$\eta_{0F}(d_p) = 1 - \frac{C_{downstream}(d_p)}{C_{upstream}(d_p)} \quad \text{رابطه ۱}$$

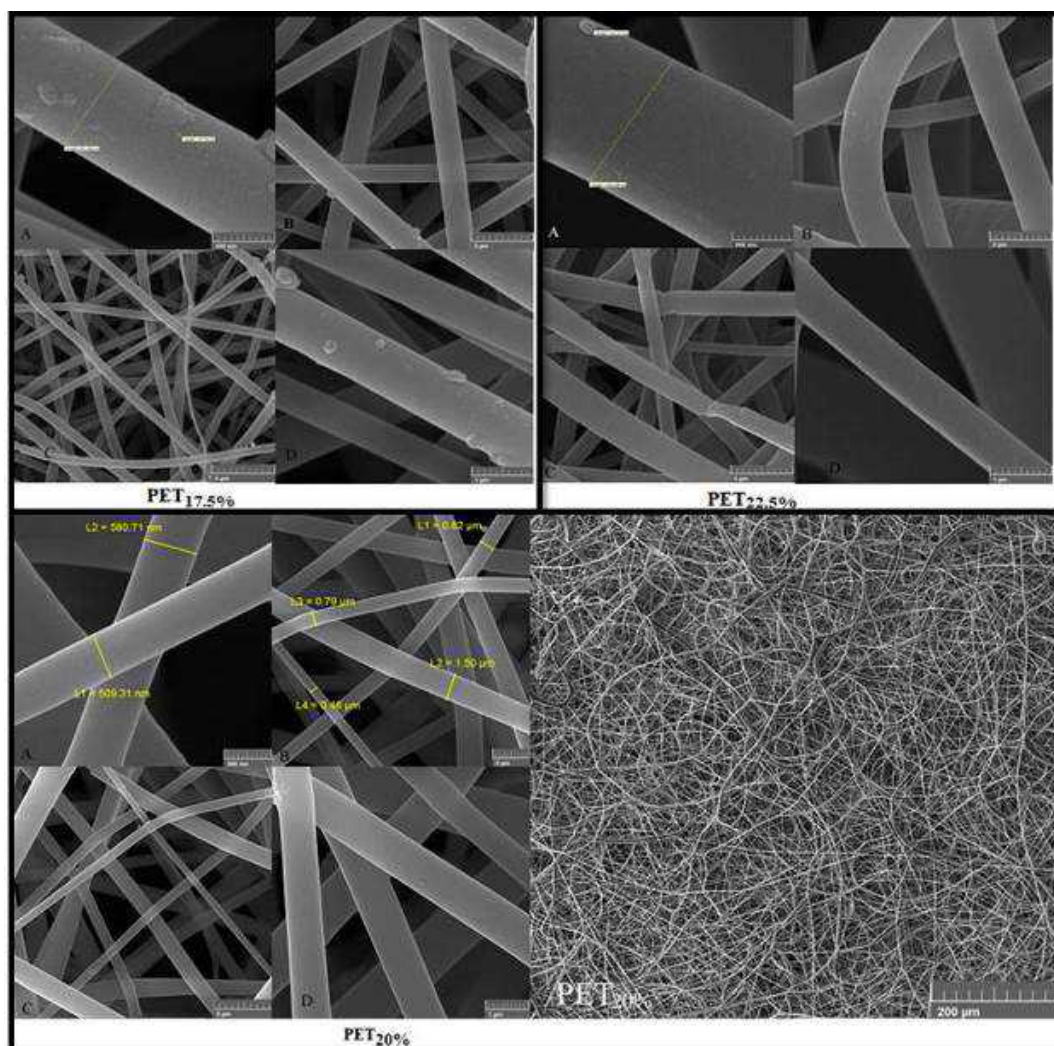
در این فرمول  $\eta_{0F}$  کارایی فیلتراسیون برای ذرات با اندازه  $d_p$  (نانومتر)،  $C$  ( $d_p$ ) غلظت شمارشی ذرات با اندازه  $d_p$  (تعداد ذره در هر سانتی‌متر مکعب) می‌باشد.

2. Quality Factor

1. Scanning Electron Microscope (SEM)

جدول ۲: نتایج تأثیر مدت زمان انجام الکتروریسی بر کارایی، افت فشار و فاکتور کیفیت در مطالعه حاضر

| فاکتور کیفیت<br>( $Pa^{-1}$ ) | افت فشار<br>(باسکال)            | کارایی کلی به دام اندازی ذرات (%) |            |           | مدت زمان (دقیقه) |
|-------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|------------|-----------|------------------|
|                               |                                 | انحراف معیار $\pm$ میانگین        | حداکثر     | حداقل     |                  |
| ۰/۱۷۷۱                        | ۲۴/۷۵ $\pm$ ۱/۷۱                | ۸۱/۱۲ $\pm$ ۱۰/۳۱                 | ۹۲/۶۷      | ۷۰/۲۶     | ۶۰               |
| ۰/۱۵۲۱                        | ۲۹/۷۵ $\pm$ ۳/۶۹                | ۹۳/۴۴ $\pm$ ۲/۰۳                  | ۹۵         | ۹۰/۵۳     | ۷۵               |
| <b>۰/۱۷۳۹</b>                 | <b>۲۶/۵<math>\pm</math>۲۳/۵</b> | <b>۹۸/۵۴<math>\pm</math>۱/۸۳</b>  | <b>۱۰۰</b> | <b>۹۶</b> | <b>۹۰</b>        |
| ۰/۰۲۳۲                        | ۱۹۷/۵ $\pm$ ۱۴/۰۶               | ۹۹/۴ $\pm$ ۰/۶۹                   | ۱۰۰        | ۹۸/۵۴     | ۱۰۵              |
| ۰/۰۱۵۵                        | ۲۹۶/۲۵ $\pm$ ۱۳/۳۷              | ۹۹/۶۸ $\pm$ ۰/۳۲                  | ۱۰۰        | ۹۹/۲۹     | ۱۲۰              |



شکل ۱: تصاویر SEM تهیه شده از مدهای PET الکتروریسی شده



همدیگر، نتایج اندازه‌گیری میزان کارایی مدیاهای تولیدی در به دام اندازی ذرات با ابعاد مختلف در قالب شکل ۲ آمده است.

افت فشار پارامتر دیگری بود که در ارزیابی عملکرد مدیاهای PET الکترورسی شده، مورد استفاده قرار گرفت و اندازه‌گیری آن با استفاده از دستگاه تست ماسک تنفسی و فیلتر و در سرعت سطحی ۱۰ سانتی‌متر بر ثانیه (دبی ۳۰ لیتر بر دقیقه) انجام شد. در جدول ۴ مقادیر افت فشار اندازه‌گیری شده برای هر یک از مدیاهای PET تولیدی با درصد وزنی، مختلف آمده است.

طبق نتایج جدول فوق، کمترین و بیشترین مقدار افت فشار به ترتیب مربوط به مدیاهای الکترورسی شده PET با غلظت ۲۰ درصد (۲۶/۳۳±۵/۵ پاسکال) و ۱۷/۵ درصد (۲۲۵/۱۶±۰/۸ پاسکال) بود.

در این مطالعه از فاکتور کیفیت به‌عنوان سومین فاکتور مورد استفاده جهت ارزیابی عملکرد مدیاهای تولیدی و انتخاب مدیای PET مناسب استفاده شد. فاکتور کیفیت نشان‌دهنده نسبت بین کارایی فیلتراسیون و افت فشار و در نتیجه نقش این دو پارامتر در عملکرد فیلترها و

۱۳ کیلوولت، نرخ تزریق ۰/۷ میلی‌لیتر بر ساعت، سرعت چرخش ۱۸۰ دور بر دقیقه و فاصله نیدل تا جمع‌کننده برابر با ۱۰ سانتی‌متر بود. در شکل ۱ تصاویر SEM تهیه‌شده از مدیاهای PET الکترورسی شده با دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی ارائه شده است. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، میانگین قطر الیاف PET تولیدی در مطالعه حاضر برابر با  $۱۶۳ \pm ۶۰$  نانومتر بود.

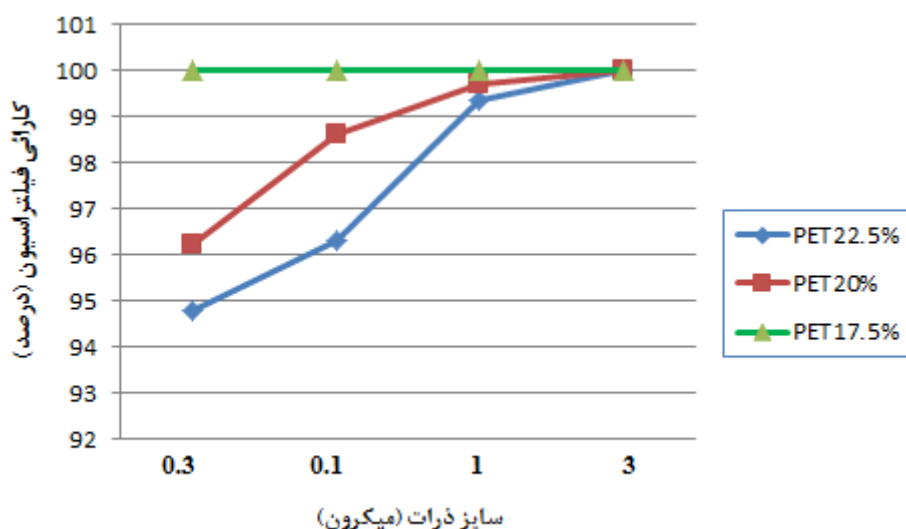
### - ارزیابی عملکرد مدیاهای ساخته‌شده

در این مطالعه به‌منظور ارزیابی عملکرد مدیاهای تولیدی، پارامترهای کارایی فیلتراسیون در ربایش اندازه‌های مختلف ذرات، فاکتور کیفیت و افت فشار اندازه‌گیری شد. در جدول ۳ نتایج اندازه‌گیری میزان کارایی به دام اندازی ذرات توسط دستگاه تست ماسک تنفسی و فیلتر، برای هر یک از مدیاهای الکترورسی شده آمده است. به‌منظور دستیابی به نتایج دقیق‌تر، کلیه اندازه‌گیری‌ها بر روی سه نمونه مختلف از مدیاهای PET تولیدی (نمونه‌های I، II و III)، انجام گرفت. به‌منظور ایجاد درک بهتری از عملکرد مدیاهای PET الکترورسی شده و مقایسه راحت‌تر کارایی مدیاهای

جدول ۳: میانگین میزان کارایی (راندمان فیلتراسیون) مدیاهای الکترورسی شده PET در به دام اندازی ذرات با ابعاد مختلف در دبی ۳۰ لیتر بر دقیقه

| غلظت پلیمر<br>PET (%) | سایز ذرات<br>(میکرون) | مدیای I*   | مدیای II*  | مدیای III* | میانگین    |
|-----------------------|-----------------------|------------|------------|------------|------------|
| ۱۷/۵                  | ۰/۳                   | ۹۹/۰±۹۸/۰۱ | ۱۰۰        | ۱۰۰        | ۹۹/۰±۹۹/۱۱ |
|                       | ۰/۵                   | ۹۹/۰±۹۸/۰۱ | ۱۰۰        | ۱۰۰        | ۹۹/۰±۹۹/۱۱ |
|                       | ۱                     | ۱۰۰        | ۱۰۰        | ۱۰۰        | ۱۰۰        |
|                       | ۳                     | ۱۰۰        | ۱۰۰        | ۱۰۰        | ۱۰۰        |
| ۲۰                    | ۰/۳                   | ۹۵/۰±۵۶/۱۸ | ۹۷/۰±۳۶/۱۲ | ۹۵/۰±۷۶/۱۵ | ۹۶/۰±۲۳/۹۸ |
|                       | ۰/۵                   | ۹۸/۰±۵۸/۰۸ | ۹۸/۰±۶۱/۰۵ | ۹۸/۰±۶۱/۲۵ | ۹۸/۰±۶۰/۰۲ |
|                       | ۱                     | ۹۹/۰±۶۵/۰۵ | ۹۹/۰±۸۸/۰۱ | ۹۹/۰±۵۹/۰۶ | ۹۹/۰±۷۰/۱۵ |
|                       | ۳                     | ۱۰۰        | ۱۰۰        | ۱۰۰        | ۱۰۰        |
| ۲۲/۵                  | ۰/۳                   | ۹۴/۰±۶/۴۳  | ۹۳/۰±۷۱/۱۸ | ۹۶/۰±۴/۰۷  | ۹۴/۱±۷۸/۱۷ |
|                       | ۰/۵                   | ۹۶/۰±۲۸/۱۳ | ۹۵/۰±۴۵/۲۸ | ۹۷/۰±۲۵/۶۳ | ۹۶/۰±۳۳/۹  |
|                       | ۱                     | ۹۹/۰±۲۶/۳۵ | ۹۹/۰±۱۳/۰۹ | ۹۹/۰±۶۳/۰۶ | ۹۹/۰±۳۴/۲۶ |
|                       | ۳                     | ۱۰۰        | ۱۰۰        | ۱۰۰        | ۱۰۰        |

\* منظور از مدیاهای I، II و III، سه نمونه مدیای ساخته‌شده از هر درصد وزنی از PET (۱۷/۵، ۲۰ و ۲۲/۵ درصد) با شرایط الکترورسی یکسان، جهت اطمینان از تکرارپذیری و صحت نتایج اندازه‌گیری‌ها می‌باشد.



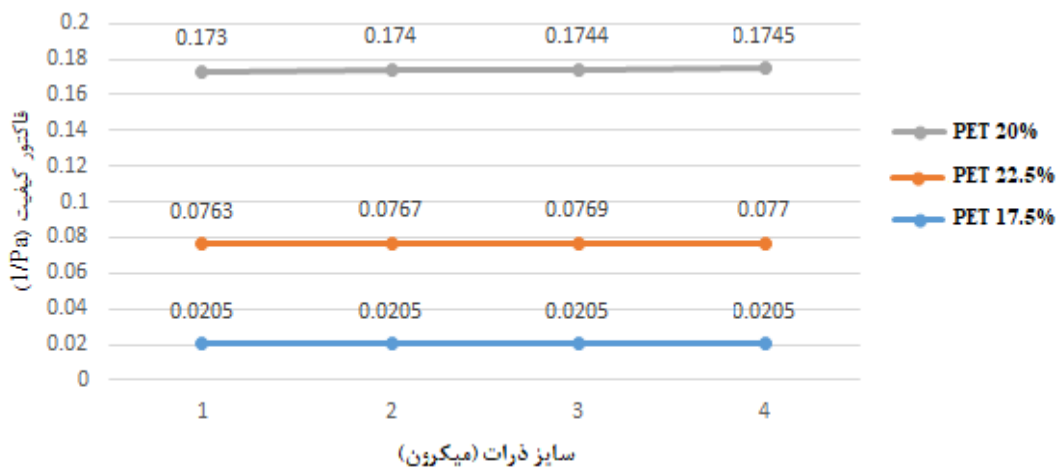
شکل ۲: نمودار مقایسه میزان کارایی فیلتراسیون مدیاهای PET الکتروریسی شده برحسب اندازه‌های مختلف ذرات

جدول ۴: میانگین افت فشار (برحسب پاسکال) برای مدیاهای PET الکتروریسی شده در دبی ۳۰ لیتر بر دقیقه

| مقادیر افت فشار (میانگین $\pm$ انحراف معیار) برحسب پاسکال برای مدیاهای PET تولیدشده |               |               |                | غلظت پلیمر PET (%) |
|---|---------------|---------------|----------------|--------------------|
| میانگین   | مدیای III     | مدیای II      | مدیای I        |                    |
| ۲۲۵/۰ $\pm$ ۱۶/۸  | ۰ $\pm$ ۲۲۶/۹ | ۱ $\pm$ ۲۲۴   | ۰ $\pm$ ۲۲۴/۵۳ | ۱۷/۵               |
| ۲۶/۵ $\pm$ ۳۳/۵   | ۰ $\pm$ ۲۹/۳۳ | ۰ $\pm$ ۳۰/۶۷ | ۲ $\pm$ ۲۰     | ۲۰                 |
| ۵۹/۰ $\pm$ ۶۶/۵۷  | ۰ $\pm$ ۶۰/۲۵ | ۰ $\pm$ ۵۹/۹۳ | ۳ $\pm$ ۶۰     | ۲۲/۵               |

جدول ۵: مقادیر فاکتور کیفیت ( $Pa^{-1}$ )، برای مدیاهای الکتروریسی شده PET در به دام اندازی ذرات با ابعاد مختلف در دبی ۳۰ لیتر بر دقیقه

| مقادیر فاکتور کیفیت برای مدیاهای PET تولیدشده |           |          |         | سایز ذرات (میکرون) | غلظت پلیمر PET (%) |
|---|-----------|----------|---------|--------------------|--------------------|
| میانگین                                       | مدیای III | مدیای II | مدیای I |                    |                    |
| ۰/۰۲۰۵  | ۰/۰۲۰۵    | ۰/۰۲۰۵   | ۰/۰۲۰۵  | ۰/۳                | ۱۷/۵               |
| ۰/۰۲۰۵  | ۰/۰۲۰۵    | ۰/۰۲۰۵   | ۰/۰۲۰۵  | ۰/۵                |                    |
| ۰/۰۲۰۵  | ۰/۰۲۰۵    | ۰/۰۲۰۵   | ۰/۰۲۰۵  | ۱                  |                    |
| ۰/۰۲۰۵  | ۰/۰۲۰۵    | ۰/۰۲۰۵   | ۰/۰۲۰۵  | ۳                  |                    |
| ۰/۱۷۳۰  | ۰/۱۵۶۹    | ۰/۱۱۴۲   | ۰/۲۲۷۴  | ۰/۳                | ۲۰                 |
| ۰/۱۷۴۰  | ۰/۱۵۷۹    | ۰/۱۱۴۵   | ۰/۲۲۹۰  | ۰/۵                |                    |
| ۰/۱۷۴۴  | ۰/۱۵۸۳    | ۰/۱۱۴۸   | ۰/۲۲۹۵  | ۱                  |                    |
| ۰/۱۷۴۵  | ۰/۱۵۸۴    | ۰/۱۱۴۹   | ۰/۲۲۹۷  | ۳                  |                    |
| ۰/۰۷۶۳  | ۰/۰۷۵۹    | ۰/۰۷۶۷   | ۰/۰۷۵۶  | ۰/۳                | ۲۲/۵               |
| ۰/۰۷۶۷  | ۰/۰۷۶۱    | ۰/۰۷۷۰   | ۰/۰۷۵۹  | ۰/۵                |                    |
| ۰/۰۷۶۹  | ۰/۰۷۶۵    | ۰/۰۷۷۷   | ۰/۰۷۶۴  | ۱                  |                    |
| ۰/۰۷۷۰  | ۰/۰۷۶۵    | ۰/۰۷۷۸   | ۰/۰۷۶۵  | ۳                  |                    |



شکل ۳: نمودار مقایسه فاکتور کیفیت (Pa<sup>-1</sup>) مدیاهای PET الکترورسی شده بر حسب اندازه‌های مختلف ذرات

ذرات زیرمیکرونی و میکرونی از جریان هوا انجام گرفته است. در مطالعه حاضر پس از انجام مطالعه پایلوت و تعیین شرایط مناسب و بهینه برای انجام الکترورسی، تمامی شرایط محلول سازی و دستگاهی الکترورسی (نظیر مدت زمان الکترورسی، نیدل مورد استفاده، فاصله نوک نیدل تا کالکتور، سرعت چرخش کالکتور، نرخ تزریق نمونه و دمای الکترورسی) برای تولید مدیاهای PET با غلظت مختلف، یکسان در نظر گرفته شد. نتایج مطالعه حاضر نشان داد که فرآیند انجام الکترورسی و تولید مدیاهای PET با خصوصیات مناسب و مدنظر، به نحوی که مدیاهای الکترورسی شده دارای کارایی فیلتراسیون بالا و افت فشار کم باشند، در مدت زمانی خیلی کمتر نسبت به مطالعات مشابه (۳۰) انجام گرفت. به نحوی که پس از انجام مطالعه پایلوت، مدت زمان الکترورسی برای تولید مدیاهای الکترورسی شده PET برابر با ۹۰ دقیقه در نظر گرفته شد در حالی که در مطالعه Bonfim و همکاران (۲۰۲۱)، مدت زمان انجام الکترورسی برای نمونه‌های PET، حداقل ۳ ساعت و حداکثر ۶ ساعت بود (۳۰). افزایش مدت زمان الکترورسی می‌تواند باعث بهبود کارایی فیلتراسیون به دلیل افزایش ضخامت مدیا و ریزتر شدن اندازه منافذ مدیا شود اما در عین حال می‌تواند

مدیاهای می‌باشد بنابراین استفاده از آن به عنوان مقیاسی برای مقایسه عملکرد فیلترها، منطقی‌تر و مناسب‌تر است. نتایج اندازه‌گیری فاکتور کیفیت برای هر یک از مدیاهای PET الکترورسی شده با درصدهای وزنی مختلف، در جدول ۵ آمده است.

طبق جدول فوق، بالاترین مقدار فاکتور کیفیت مربوط به مدیای PET الکترورسی شده با غلظت ۲۰٪ و کمترین مقدار مربوط به مدیای PET با غلظت ۱۷/۵٪ بود. همچنین به منظور مقایسه بهتر مدیاهای PET تولیدی، نتایج فاکتور کیفیت محاسبه شده برای هر یک از مدیاهای، در قالب شکل ۳ آمده است.

### بحث

در سال‌های اخیر استفاده از روش الکترورسی به عنوان بهترین و پذیرفته ترین روش تولید نانوالیاف، برای ساخت مدیاهای فیلترهای نانوالیافی تصفیه کننده هوا که دارای کارایی بالا و افت فشار پایینی در بحث کنترل آلاینده‌های هوا هستند بسیار مورد توجه قرار گرفته است (۱۷ و ۲۵)؛ بنابراین مطالعه حاضر با هدف ساخت مدیایی با ساختار نانوالیافی (از نوع بی بافت) از جنس پلی اتیلن ترفتالات (PET) الکترورسی شده جهت ربایش و حذف

ذکر شده است (۳۰ و ۳۲). میانگین قطر الیاف PET تولیدی در مطالعه Bonfim و همکاران برای غلظت ۲۰٪ و ۱۲٪، به ترتیب برابر با ۳/۲۵ میکرون و ۱/۲۹ میکرون و در مطالعه Strain و همکاران، برای غلظت‌های ۲۰٪ و ۱۵٪ به ترتیب برابر با ۴/۳ میکرون و ۱ میکرون بود (۳۰ و ۳۲). از این نظر نتایج مطالعه حاضر با نتایج مطالعه Guo و همکاران (۲۰۲۱) که در مطالعه خود از غلظت ۱۶ درصد PET استفاده کرده بودند و میانگین قطر الیاف PET تولیدی در مطالعه آن‌ها برابر با ۶۳۵ نانومتر بود همخوانی دارد (۴۱). با مقایسه نتایج مطالعه حاضر با مطالعات فوق، می‌توان دریافت که با تغییر شرایط و پارامترهای دستگاهی الکتروریسی، می‌توان مدیاهایی با میانگین قطر الیاف الکتروریسی شده کمتری تولید کرد. در مطالعه حاضر کارایی به دام اندازی تمامی مدیاهای الکتروریسی شده PET برای ذرات ۰/۳ میکرون، به مراتب بیشتر از کارایی مدیای PET ساخته شده در مطالعه Bonfim و همکاران بود (۳۰). در مطالعه Bonfim و همکاران، کارایی به دام اندازی ذرات ۰/۳ میکرون برای مدیای PET تولیدی با غلظت ۲۰ درصد برابر با ۴۱٪ بود در حالی که در مطالعه حاضر این کارایی برای مدیای PET تولیدی با غلظت ۲۰ درصد، برابر با ۹۶/۲۳±۰/۰۵٪ به دست آمد. با توجه به اینکه کارایی فیلتراسیون مدیاهای تحت تأثیر ابعاد قطر الیاف قرار دارد و با افزایش قطر الیاف، کارایی آن‌ها کاهش می‌یابد (۴۴-۴۲)؛ بنابراین کوچک‌تر بودن قطر الیاف تولیدی در مطالعه حاضر نسبت به مطالعه Bonfim و همکاران، ممکن است یکی از دلایل بالاتر بودن کارایی فیلتراسیون در مطالعه حاضر نسبت به مطالعه فوق و سایر مطالعات مشابه باشد (۳۰ و ۴۱).

بر اساس گزارش مطالعات مختلف، با کاهش قطر الیاف و افزایش راندمان، افت فشار در مدیاهای فیلترها بیشتر می‌شود (۴۴-۴۲). در مطالعه حاضر الیاف مدیاهای PET تولیدی نسبت به مطالعات مشابه (۳۰ و ۴۱) دارای میانگین قطر کم‌تر، راندمان بهتر و در عین حال افت فشار پایین‌تری بودند. نتایج تست افت فشار در مطالعه کنونی

باعث ایجاد افت فشار بیشتر به دلیل افزایش ضخامت در مدیاهای تولیدی نیز گردد (۳۱). همچنین با افزایش مدت‌زمان الکتروریسی، حجم محلول مصرفی و در نتیجه ماده مورد نظر جهت تولید مدیایی با کارایی مناسب نیز افزایش می‌یابد که این از نظر اقتصادی مقرون‌به‌صرفه نمی‌باشد (۳۶ و ۳۷). افت فشار نشان‌دهنده میزان مقاومت بستر در برابر عبور هوا می‌باشد. در واقع بستری که بتواند در افت فشار کم، راندمان فیلتراسیون بالایی داشته باشد از لحاظ میزان صرفه‌جویی در مصرف انرژی، بستر مناسب‌تری می‌باشد (۳۴ و ۳۹)؛ بنابراین یافتن یک نقطه تعادل در بحث مدت‌زمان انجام الکتروریسی به منظور تولید مدیایی با کارایی بالا و افت فشار پایین در فیلتراسیون ذرات، بسیار مهم می‌باشد. از این نظر نتایج مطالعه حاضر با نتایج مطالعه حبیبی محرز و همکاران (۳۱) و با نتایج مطالعه Wang و همکاران (۲۰۰۸) (۳۹) همخوانی دارد.

با توجه به تصاویر SEM تهیه شده از نمونه‌های مدیای PET الکتروریسی شده (شکل ۱)، می‌توان مشاهده کرد که نانوالیاف تهیه شده از نظر شکل و ویژگی‌های ظاهری، شکل مطلوبی دارند. کلیه نانوالیاف دارای سطح الیاف بدون بید و گره بوده و کاملاً استوانه‌ای شکل می‌باشند. بر اساس گزارش مطالعات مختلف، غلظت محلول پلیمری یکی از مهم‌ترین متغیرهای تأثیرگذار بر روی قطر نانوالیاف تولیدی در فرآیند الکتروریسی محلول می‌باشد. به نحوی که با کاهش غلظت پلیمر (PET)، میانگین قطر الیاف نیز کاهش خواهد یافت. به عبارت دیگر، در غلظت‌های بالاتر، الیاف تولیدی دارای میانگین قطر بزرگ‌تری نسبت به غلظت‌های پایین‌تر می‌باشند (۳۰ و ۴۰). در مطالعه حاضر میانگین قطر الیاف تولیدی حدوداً ۶۰۰ نانومتر می‌باشد که از این نظر الیاف تولیدی دارای قطر بسیار کوچک‌تری نسبت به قطر الیاف PET تولیدی در مطالعات مشابه نظیر مطالعه Bonfim و همکاران (۲۰۲۱) و مطالعه Strain و همکاران (۲۰۱۳) می‌باشد که این نشان‌دهنده عملکرد بهتر فرآیند الکتروریسی در تولید نانوالیاف PET در مطالعه حاضر نسبت به مطالعات

بود. به‌طور کلی با مقایسه فاکتور کیفیت برای ۳ نوع مدیای PET الکترورسی شده با غلظت‌های مختلف (شکل ۳)، می‌توان نتیجه گرفت که مدیای PET تولیدی با غلظت ۲۰ درصد نسبت به سایر مدیاهای تولیدی با غلظت‌های ۱۷/۵ و ۲۲/۵ درصد دارای بهترین عملکرد از نظر فیلتراسیون (با در نظر گرفتن توأم کارایی به دام اندازی و افت فشار) می‌باشد.

بر اساس نتایج مطالعات مختلف، غلظت محلول نقش بسزایی در تعیین قطر الیاف و به طبع آن بر روی اندازه حفرات مدیا دارد و این به‌طور مستقیم با کارایی و افت فشار فیلتر در ارتباط می‌باشد (۴۵-۴۷). در غلظت‌های پایین‌تر، افت فشار بیشتر می‌شود و این می‌تواند بر روی فاکتور کیفیت تأثیر معکوس داشته باشد (۴۵ و ۴۸)؛ بنابراین می‌توان دلیل این موضوع را که چرا مدیای PET تولیدی با غلظت ۱۷/۵ درصد دارای فاکتور کیفیت پایین‌تر و در نتیجه عملکرد ضعیف‌تری نسبت به مدیای PET با غلظت ۲۰ درصد می‌باشد را به تأثیر معکوس افت فشار بر روی فاکتور کیفیت آن نسبت داد. از این نظر مطالعه حاضر با نتایج مطالعه Yun و همکاران (۴۵) و مطالعه حبیبی محرز و همکاران (۳۱)، همخوانی دارد.

### نتیجه گیری

مطالعه حاضر با هدف ساخت مدیایی با ساختار نانوالیافی (از نوع بی بافت آن) از جنس پلی‌اتیلن ترفتالات (PET) الکترورسی شده جهت ربایش و حذف ذرات زیرمیکرونی و میکرونی از جریان هوا انجام گرفته است. بهینه‌ترین مدیای پلیمری PET در شرایط ۲۰٪ غلظتی، ولتاژ ۱۳ کیلوولت، نرخ تزریق ۰/۷ میلی‌لیتر بر ساعت، سرعت چرخش ۱۸۰ دور بر دقیقه و فاصله نیدل تا جمع کننده برابر با ۱۰ سانتی‌متر و در مدت‌زمان الکترورسی ۹۰ دقیقه به دست آمد. مدیاهای تولیدشده تحت شرایط بهینه، دارای توانایی بالای ربایش و حذف ذرات از جریان هوا برای ذرات زیر میکرونی در گستره ۹۹-۹۶ درصد و برای ذرات میکرونی در گستره ۱۰۰-۹۹ درصد و همچنین میانگین افت فشار ۲۶/۳۳±۵/۵ پاسکال هستند.

(جدول ۴) بیانگر افت فشار پایین‌تر مدیاهای PET الکترورسی شده نسبت به سایر مطالعات بود. طبق نتایج جدول ۴، مدیاهای PET الکترورسی شده با غلظت‌های ۲۰ و ۱۷/۵ درصد به ترتیب کمترین (۲۶/۳۳±۵/۵ پاسکال) و بیشتری مقدار افت فشار (۲۲۵/۱۶±۰/۸ پاسکال) را به خود اختصاص دادند. در این مطالعه، مدیای PET تولیدی با غلظت ۱۷/۵٪ دارای بالاترین میزان افت فشار و همچنین بالاترین میزان کارایی فیلتراسیون بود. این نتیجه، همسو با این مطلب می‌باشد که با کاهش قطر الیاف و افزایش افت فشار، کارایی فیلتراسیون نیز افزایش می‌یابد (۳۲). نتایج به‌دست‌آمده با نتایج مطالعه Bonfim و همکاران که کمترین و بیشتری مقدار افت فشار به ترتیب مربوط به مدیاهای PET تولیدی با غلظت‌های ۲۰٪ (۱۳/۵ پاسکال) و ۱۲٪ (۲۱۲/۵ پاسکال) بود همخوانی دارد (۳۰).

به‌طور کلی عملکرد فیلترها و مدیاهای معمولاً از طریق پارامترهای همچون کارایی فیلتراسیون، افت فشار و فاکتور کیفیت مشخص می‌شود (۱۹ و ۲۰)؛ بنابراین به‌منظور مشخص کردن یک فیلتر مناسب، بایستی پارامترهای کارایی و افت فشار به‌صورت هم‌زمان مدنظر قرار بگیرند و استفاده از آن‌ها به‌صورت جداگانه، نمی‌تواند بیانگر عملکرد مناسب یک فیلتر در بحث فیلتراسیون باشد (۱۷، ۳۱). با توجه به اینکه فاکتور کیفیت، نشان‌دهنده نسبت بین کارایی فیلتراسیون و افت فشار و در نتیجه نقش این دو پارامتر در عملکرد فیلترها و مدیاهای می‌باشد بنابراین استفاده از آن به‌عنوان مقیاسی برای مقایسه عملکرد فیلترها، منطقی‌تر و مناسب‌تر می‌باشد. به عبارتی فیلتری مناسب می‌باشد که دارای فاکتور کیفیت بالاتر، یعنی دارای کارایی بالا و افت فشار پایینی در به دام اندازی ذرات باشد (۳۱، ۳۵-۳۴). در مطالعه حاضر (جدول ۵) بالاترین مقدار فاکتور کیفیت مربوط به مدیای PET الکترورسی شده با غلظت ۲۰ درصد (با میانگین و انحراف معیار ۰/۱۷۴۰±۰/۰۰۰۵) و کمترین مقدار مربوط به مدیای PET با غلظت ۱۷/۵ درصد (با میانگین و انحراف معیار ۰/۰۲۰۵±۰/۰۰۰۰)



بازیافت و استفاده مجدد را به دفعات دارا است بنابراین می‌توان با این کار در هزینه‌های تولید صرفه‌جویی نمود که این کار گام بزرگی در بحث فیلتراسیون هوا با لحاظ نمودن مشکلات اقتصادی خواهد بود و نیز مانع از مشکلات زیست‌محیطی خواهد شد.

### تشکر و قدردانی

این مقاله حاصل بخشی از طرح تحقیقاتی مصوب دانشگاه علوم پزشکی و خدمات بهداشتی درمانی تهران با کد اخلاق IR.TUMS.SPH.REC.۱۴۰۰.۲۰۶ می‌باشد که با حمایت دانشگاه علوم پزشکی و خدمات بهداشتی درمانی تهران اجرا شده است.

### REFERENCES

- Salatin P, Eslambolchi S. Examining Effect of Air Pollution on Health Expenditure in Selected Countries. *Int J Environ Sci Technol*. 2016; 18(1):107-21.
- He RW, Li YZ, Xiang P, Li C, Cui XY, Ma LQ. Impact of particle size on distribution and human exposure of flame retardants in indoor dust. *Environ Res*. 2018; 162:166-72.
- Golbabaei F, Azar A, Ganji Kazemian M. Designing a model for selection of air pollution control equipment using fuzzy logic. *Journal of Health and Safety at Work*. 2014; 4 (2):37-50.
- Habil M, Massey DD, Taneja A. Personal and ambient PM2.5 exposure assessment in the city of Agra. *Data in brief*. 2016; 6(1):495-502.
- Mohammadyan M, Ashmore M, Shabankhani B. Indoor PM2.5 Concentrations in the Office, Café, and home. *International Journal of Occupational Hygiene*. 2010; 2(2):57-62.
- Eslamipour R, Sepehriar A. Firm relocation as a potential solution for environment improvement using a SWOT-AHP hybrid method. *Process Saf Environ Prot*. 2014; 92:269-76.
- Reyhaneh Shams S, Jahani A, Moeinaddini M, Khorasani N, Kalantary S. Forecasting Ozone Density in Tehran Air Using a Smart Data-Driven Approach. *Journal of Health and Safety at Work*. 2020; 10 (4):385-396.
- Naderi M, Roshani M, Abasian M, Torbatian S. Tehran annual air quality report (period of March 2016-March 2017). 2017, QM96/02/01.
- Pourhassan B, Golbabaei F, Pourmand M R, Farhang Dehghan S, Masoorian E. Examining performance of the conventional and photocatalytic HEPA filters on removal of the airborne microorganisms. *Journal of Health and Safety at Work*. 2018; 8 (3):251-264.
- Bottero M, Comino E, Riggio V. Application of the Analytic Hierarchy Process and the Analytic Network Process for the assessment of different wastewater treatment systems. *Environ Model Softw*. 2011; 26:1211-24.
- Kalbar PP, Karmakar S, Asolekar SR. The influence of expert opinions on the selection of wastewater treatment alternatives: a group decision-making approach. *J Environ Manage*. 2013; 128:844-51.
- Shokri A, Golbabaei F, Seddigh-Zadeh A, Baneshi MR, 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):10-16.
- Kim SC, Harrington MS, Pui DY. Experimental study of nanoparticles penetration through commercial filter media. *Nanotechnology and Occupational Health: Springer*; 2006. p. 117-25.

از فاکتور کیفیت به‌عنوان یک پارامتری که نشان‌دهنده رابطه و نسبت بین کارایی به دام اندازی ذرات و افت فشار در فیلتر و مدیا می‌باشد استفاده می‌شود؛ بنابراین با توجه به مقادیر فاکتور کیفیت محاسبه‌شده برای مدیاهای PET الکتروریسی شده با غلظت مختلف، می‌توان بیان داشت که مدیای PET الکتروریسی شده با غلظت ۲۰ درصد (که بالاترین میزان فاکتور کیفیت را نسبت به سایر مدیاهای تولیدی دارد)، دارای عملکرد بهتری هم از نظر کارایی به دام اندازی و هم افت فشار، نسبت به سایر مدیاهای PET تولیدی می‌باشد. با توجه به اینکه ماده PET مصرفی در این مطالعه، یک ماده ارزان می‌باشد که در داخل کشور نیز تولید می‌شود و اینکه PET قابلیت

14. Chotigawin R, Sribenjalux P, Supothina S, Johns J, Charerntanyarak L, Chuaybamroong P. Airborne microorganism disinfection by photocatalytic HEPA filter. *Environment Asia*. 2010;3(2):1-7.
15. Mousavi T, Golbabaee F, Pourmand M R, Rezaei S, Hosseini M, Helmi Kohneshahri M, 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):111-120.
16. Przekop R, Gradoń L. Deposition and filtration of nanoparticles in the composites of nano- and micro-sized fibers. *Aerosol Sci Technol*. 2008;42(6):483-93.
17. Farhang Dehghan S, Maddah B, Golbabaee F. The Development of Nanofibrous Media Filter Containing Nanoparticles for Removing Particles from Air Stream. *IJHE*. 2016; 8(2): 509-524.
18. Jackiewicz A, Podgorski A, Gradon L, Michalski J. Nanostructured media to improve the performance of fibrous filters. *Kona*. 2013; 30:244-55.
19. Rebai M, Prat M, Meireles M, Schmitz P, Baclet R. Clogging modeling in pleated filters for gas filtration. *Chem Eng Res Des*. 2010;88(4):476-86.
20. Chazelet S, Bemer D, Gripari F. Effect of the test aerosol charge on the penetration through electret filter. *Sep Purif Technol*. 2011; 79(3):352-56.
21. Wang J, Kim SC, Pui DY. Figure of merit of composite filters with micrometer and nanometer fibers. *Aerosol Sci Technol*. 2008;42(9):722-28.
22. Mirjalili M, Karimi L. Photocatalytic degradation of synthesized colorant stains on cotton fabric coated with nano TiO<sub>2</sub>. *Journal of Fiber Bioengineering and Informatics*. 2011; 3(4), 208-215.
23. Ashtari H, Jonooni M, Yousefzadeh M, Hamzeh Y. Preparation and characterization of electrospun nanofiber of poly (vinyl alcohol) and cellulose nanocrystals. *Iranian Journal of Wood and Paper Science Research*. 2018; 33(3): 438-452.
24. Zakaria M, Nakane K. Fabrication of Polypropylene Nanofibers from Polypropylene /Polyvinyl Butyral Blend Films Using Laser-Assisted Melt-Electrospinning. *Polym Eng Sci*. 2020;60(2): 362-70.
25. Shi L, Zhuang X, Tao X, Cheng B, Kang W. Solution blowing nylon 6 nanofiber mats for air filtration. *Fibers and Polymers*. 2013; 14(9):1485-90.
26. Ingle PV, Chatap VK, Bhatia N. Design Considerations for Parenteral Production Facility. *Int. J Pharm Sci Rev Res*. 2014;3:15-28.
27. Choudhary K, Sangwan K.S, Goyal D. Environment and economic impacts assessment of PET waste recycling with conventional and renewable sources of energy. *Procedia CIRP*. 2019;80: 422-427.
28. Khorram M, Mousavi A, Mehranbod N. Chromium removal using adsorptive membranes composed of electrospun plasma-treated functionalized polyethylene terephthalate (PET) with chitosan. *J Environ Chem Eng*. 2017;5(3):2366-77.
29. Bonfim DPE, Cruz FGS, Bretas RES, Guerra VG, Aguiar ML. A Sustainable Recycling Alternative: Electrospun PET-Membranes for Air Nanofiltration. *Polymers (Basel)*. 2021;13(7). 1166.
30. Bonfim DPF, Cruz FGS, Guerra VG, Aguiar ML. Development of Filter Media by Electrospinning for Air Filtration of Nanoparticles from PET Bottles. *Membranes (Basel)*. 2021;11(4):293.
31. Habibi Mohraz M, Golbabaee F, Je Yu I, Sedigh Zadeh A, Mansournia M A, Farhang Dehghan S. Investigating effective parameters on the nanoparticles air filtration using Polyurethane nanofiber mats. *Journal of Health and Safety at Work*. 2018; 8 (1):29-42.
32. Strain IN, Wu Q, Pourrahimi AM, Hedenqvist MS, Olsson RT, Andersson RL. Electrospinning of recycled PET to generate tough mesomorphic fibre membranes for smoke filtration. *J Mater Chem A Mater*. 2015;3(4):1632-40.
33. 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. *J Air Waste Manag Assoc*. 2016;66(9):912-21.
34. 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 Air Qual Res*. 2013; 13(1):162-71.
35. 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.
36. Guibo Y, Qing Z, Yahong Z, Yin Y, Yumin Y. The Electrospun Polyamide 6 Nanofiber Membranes Used

- as High Efficiency Filter Materials: Filtration Potential, Thermal Treatment, and Their Continuous Production. *J Appl Polym Sci*. 2013;128:1061–1069.
37. Bortolassi ACC, Nagarajan S, de Araújo Lima B, Guerra VG, Aguiar ML, Huon V, et al. Efficient nanoparticles removal and bactericidal action of electrospun nanofibers membranes for air filtration. *Mater Sci Eng C Mater Biol Appl*. 2019;102:718-29
  38. Mousavi T, Golbabaei 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.
  39. Wang J, Kim SC, Pui DY. Investigation of the figure of merit for filters with a single nanofiber layer on a substrate. *J Aerosol Sci*. 2008; 39(4):323-34.
  40. 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. *J Aerosol Sci*. 2016; 92: 27–37.
  41. Guo Y, Guo Y, He W, Zhao Y, Shen R, Liu J, et al. PET/TPU nanofiber composite filters with high interfacial adhesion strength based on one-step co-electrospinning. *Powder Technol*. 2021;387:136-45.
  42. Zhu M, Han J, Wang F, Shao W, Xiong R, Zhang Q, et al. Electrospun Nanofibers Membranes for Effective Air Filtration. *Macromol Mater Eng*. 2017;302(1):1600353
  43. Aruchamy, K.; Mahto, A.; Nataraj, S.K. Electrospun nanofibers, nanocomposites and characterization of art: Insight on establishing fibers as product. *Nano-Structures and Nano-Objects*. 2018;16: 45–58.
  44. Balgis R, Kartikowati CW, Ogi T, Gradon L, Bao L, Seki K, et al. Synthesis and evaluation of straight and bead-free nanofibers for improved aerosol filtration. *Chem Eng Sci*. 2015;137:947-54.
  45. Yun KM, Suryamas AB, Iskandar F, Bao L, Niinuma H, Okuyama K. Morphology optimization of polymer nanofiber for applications in aerosol particle filtration. *Sep Purif Technol*. 2010;75(3):340-45.
  46. Kaur S, Gopal R, Ng WJ, Ramakrishna S, Matsuura T. Next-generation fibrous media for water treatment. *MRS Bull*. 2008;33(01):21-26.
  47. Amiraliyan N, Nouri M, Kish MH. Electrospinning of silk nanofibers. I. An investigation of nanofiber morphology and process optimization using response surface methodology. *Fibers and Polymers*. 2009;10(2):167-76.
  48. Tan AW, Pinguan-Murphy B, Ahmad R, Akbar SA. Advances in fabrication of TiO<sub>2</sub> nanofiber/ nanowire arrays toward the cellular response in biomedical implantations: a review. *J Mater Sci*. 2013;48(24):8337-53.