

ORIGINAL RESEARCH PAPER

Evaluating Morphological Characteristics and Filtration Performance of Electrospun Poly(Vinyl Alcohol)-Based Nanofiber Membranes for Capturing Particulate Matter

Sepideh Keyvani¹, Farideh Golbabaie^{1*}, Rasoul Esmaeely Neisiany^{2,3}, Saba Kalantary¹, Oisik Das⁴, Abbas Rahimi Foroushani⁵

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

²Department of Polymer Engineering, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Iran

³Department of Biotechnology Centre, Silesian University of Technology, Gliwice, Poland

⁴Department of Civil, Environmental and Natural Resources Engineering, Luleå University of Technology, Luleå, Sweden

⁵Department of Epidemiology and Biostatistics, School of Public Health, Tehran University of Medical Sciences, Tehran, Iran

Received: 27-1-2025

Accepted: 22-11-2025

ABSTRACT

Introduction: Polymer nanofiber filters have great potential for controlling particulate pollution due to their high filtration efficiency and low pressure drop. This study aimed to fabricate nanofiber membranes from a biodegradable polymer through solution electrospinning to address both health and environmental concerns, along with analyzing their morphological characteristics. The filtration performance of the prepared membranes was evaluated against different particle sizes under two air face velocities.

Material and Methods: The nanofiber membranes were fabricated from aqueous poly(vinyl alcohol) (PVA) solutions at various concentrations from 5 to 6 w/v% under different process parameters. The morphological characteristics of the nanofibers were examined using field-emission scanning electron microscopy (FE-SEM), while structural properties such as basis weight and thickness were measured to estimate porosity. Filtration performance, including efficiency and pressure drop, was evaluated at two standard air face velocities (2.5 and 5.3 cm/s) using a media test system. In addition, the quality factor of the prepared membranes was calculated.

Results: The electrospun nanofibers were uniform and bead-free, with the mean fiber diameters ranging from 106 to 151 nm. The filtration efficiencies were 95.72–99.92 % for sub-micron particles (0.3 and 0.5 μm), and 99.43–100 % for larger particles (1 and 3 μm). The pressure drop ranged from 67 to 150 Pa at an air face velocity of 2.5 cm/s, and from 58 to 150 Pa at an air face velocity of 5.3 cm/s.

Conclusion: The 6 wt.% PVA nanofiber membrane electrospun at 15 kV, 0.5 mL/h, and 15 cm produced thinner fibers (approximately 106 nm) and exhibited higher efficiency for 0.3 μm particles (99.89 % and 99.92 % at 2.5 and 5.3 cm/s air face velocities, respectively). For this membrane with thinner fibers, the pressure drop increased from 67 to 150 Pa with rising the air face velocity.

Keywords: Particulate matter, Polyvinyl alcohol, Nanofibers, Filtration

HOW TO CITE THIS ARTICLE

Keyvani S., Golbabaie F., Esmaeely Neisiany R., Kalantary S., Das O., Rahimi Foroushani A. Evaluating Morphological Characteristics and Filtration Performance of Electrospun Poly(Vinyl Alcohol)-Based Nanofiber Membranes for Capturing Particulate Matter. *J Health Saf Work*. 2025; 15(4): 747-760.

* Corresponding Author Email: fgolbabaie@yahoo.com

Copyright © 2025 The Authors.

Published by Tehran University of Medical Sciences

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>). Non-commercial uses of the work are permitted, provided the original work is properly cited.

1. INTRODUCTION

Particulate pollution has emerged as a major global issue in recent years due to its detrimental effects on human health. Among the developed solutions for controlling particulate pollution, nanofiber filters offer high particle filtration efficiency and a low air pressure drop compared to conventional filters. Electrospinning is the most widely used technique for producing nanofibers. The structural properties and performance of electrospun membranes are influenced by common parameters such as the polymer solution concentration, applied voltage, and the distance between the needle and collector. Moreover, bead-free fibers are preferred to achieve acceptable filtration performance, particularly for fine particles.

Previous studies have investigated electrospun polymer-based filter membranes using various polymers and additives, but often with inconsistent reference to air face velocity standards in filtration tests. This inconsistency highlights the lack of a unified approach to performance evaluation. In the present study, smooth and bead-free polyvinyl alcohol nanofiber mats were fabricated via solution electrospinning, and their structural characteristics and filtration performance against particles of different sizes were evaluated under two standard air face velocities defined by ISO 29463¹ and ASME AG-1-2019². The findings provide insights and recommendations toward a more comprehensive framework for evaluating electrospun nanofiber filters.

2. MATERIAL AND METHODS

Aqueous PVA solutions with concentrations ranging from 5 to 6 w/v% were prepared at 80 °C. Each solution was separately loaded into a 3 mL plastic syringe fitted with an 18-gauge needle, and uniform, stable fibers were deposited onto a nonwoven spun bond substrate (approximately 17 g/m² basis weight) under the electrospinning parameters listed in Table 1. The efficiency and pressure drop of the nanofiber membranes were evaluated against uncharged sodium chloride particles of 0.3, 0.5, 1, and 3 µm at air face velocities of 2.5 cm/s (ASME AG-1-2009), and 5.3 cm/s (ISO 29463) using a media testing system. In addition, the quality factor was calculated. Statistical analysis using one-way analysis of variance (ANOVA), followed by Bonferroni post-hoc testing, revealed

significant mean differences ($P < 0.05$) among the studied variables.

3. RESULTS AND DISCUSSION

The FE-SEM images showed that the nanofiber membranes were bead-free. The mean nanofiber diameters ($\pm$ SD) for membranes 1, 2, and 3 were 151.44 ± 23.27 nm, 148.37 ± 27.43 nm, and 106.40 ± 30.41 nm, respectively. The prepared membranes exhibited a porosity of approximately 86 %. Filtration performance data are presented in Table 2.

A significant difference ($P < 0.05$) was observed in mean filtration efficiency and pressure drop for the most penetrating particle size (MPPS, 0.3 µm), at both air face velocities of 2.5 and 5.3 cm/s, as well as in structural properties such as mean nanofiber diameter and porosity. Membrane 3, with its finer fibers, outperformed membrane 1 in terms of both filtration efficiency ($P < 0.001$) and pressure drop ($P < 0.001$) at both tested air face velocities. Interestingly, only membrane 3 showed a slight increase in filtration efficiency for submicron particles (0.3 and 0.5 µm), which may be attributed to its finer and more porous fiber structure compared to the other membranes. Moreover, while an increase in airflow velocity improved the filtration efficiency of fine particles in membrane 3, the same change in membranes 1 and 2 resulted in greater particle penetration and thus, reduced efficiency. For larger particles (1 and 3 µm), filtration efficiency remained at the highest level (100%) in membranes 2 and 3, with a similar trend observed for 3 µm particles in membrane 1. This behavior is likely related to the filtration mechanisms, and structural characteristics of the membranes, with the finer and more porous structure of membrane 3 contributing to its enhanced efficiency at higher airflow velocities.

Overall, the filtration efficiency levels of the prepared nanofiber membranes for 0.3 µm particles were lower than the acceptable limit recommended by ASME AG-1-201 standard (99.97 %). However, the relatively low pressure drop observed in the prepared membranes may be attributed to their structural properties, such as finer fibers and high porosity. According to ISO 29463, the membranes were classified as Class E (filtration efficiency > 99.5%). While the ASME AG-1-201 standard specifies an acceptable pressure drop based on filtration efficiency for the MPPS (0.3 µm) and is primarily applied in nuclear facilities, ISO

¹ The International Organization for Standardization

² American Society of Mechanical Engineers

Table 1: The electrospinning parameters for preparing PVA-based membranes

Membrane No.	Concentration (w/v%)	Voltage (kV)	Feed rate (mL/h)	Distance (cm)
1	5	15	0.75	18
2	5.5	12	0.75	18
3	6	15	0.5	15

Table 2: Summary of filtration performance of the electrospun nanofiber membranes for varied particle sizes at two air face velocities

Membrane No.	Filtration efficiency (%) for different particle sizes (μm)				Pressure drop (Pa)	Quality factor (Pa^{-1})	Air face velocity (cm/s)
	0.3	0.5	1	3			
1	96.74	97.78	99.43	100	25	0.14	2.5
	95.72	96.10	99.74	100	58	0.05	5.3
2	99.41	99.69	100	100	58	0.09	2.5
	99.25	99.58	100	100	130	0.04	5.3
3	99.89	99.95	100	100	67	0.10	2.5
	99.92	99.98	100	100	150	0.05	5.3

29463 applies more broadly, including cleanroom environments. Therefore, a comprehensive evaluation of filter membranes can be achieved by considering both standards.

4. CONCLUSIONS

The nanofiber membrane prepared from 6 w/v% PVA under electrospinning conditions of 15 kV, 15 cm, and 0.5 mL/h produced finer fibers and achieved high filtration efficiency for 0.3 μm particles (99.92 %). The filtration efficiency of this membrane further improved when the air face velocity increased to 5.3 cm/s; however, the pressure drop also rose as the velocity increased from 2.5

to 5.3 cm/s. Overall, the prepared membranes demonstrated effective particulate air filtration in accordance with the ASME AG-1-201 standard. A more comprehensive evaluation of their filtration performance can be achieved by considering both the ASME AG-1-201 and ISO 29463 standards.

5. ETHICAL CODE

IR.TUMS.SPH.REC.1401.133.

6. FUNDING

The research was supported by Tehran University of Medical Sciences, Tehran, Iran (Project No. 98-11-13-8001).

ارزیابی ویژگی‌های ریخت‌شناختی و عملکرد فیلتراسیون مדיاهای نانولیفی بر پایه پلی وینیل الکل به منظور ربایش ذرات معلق در هوا

سپیده کیوانی^۱، فریده گل‌بابائی^{۱*}، رسول اسمعیلی نیسیانی^{۲،۳}، صبا کلانتری^۱، اویسیک داس^۴، عباس رحیمی فروشانی^۵

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

^۲گروه مهندسی پلیمر، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران.

^۳مرکز بیوتکنولوژی، دانشگاه صنعتی سیلین، گلیویتسه، لهستان.

^۴دانشکده مهندسی عمران، محیط زیست و منابع طبیعی، دانشگاه صنعتی لولئو، لولئو، سوئد.

^۵گروه آمار و اپیدمیولوژی، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی تهران، تهران، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۸، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۹/۱

چکیده

مقدمه: امروزه مדיاهای فیلتر نانولیفی پلیمری به دلیل کارایی فیلتراسیون بالا و افت فشار پایین مورد توجه بسیاری در حوزه کنترل آلاینده‌های ذره‌ای واقع شده‌اند. مطالعه حاضر، با هدف تولید مדיاهای نانولیفی به روش الکتروریسی محلول، با استفاده از یک پلیمر زیست‌تخریب‌پذیر به منظور کاهش نگرانی‌های آلودگی‌های بهداشتی و زیست‌محیطی، تعیین ویژگی‌های ریخت‌شناختی و ارزیابی عملکرد فیلتراسیون مדיاهای تولیدی برای ربایش ذرات با اندازه‌های مختلف در دو سرعت جریان هوا انجام گرفت.

روش کار: مדיاهای نانولیفی با استفاده از محلول پلیمری یکنواخت از پلی وینیل الکل در حلال آب در غلظت‌های ۵ تا ۶ درصد وزنی با استفاده از روش الکتروریسی محلول و تحت تأثیر پارامترهای فرآیندی مختلف تولید شدند. ویژگی‌های ریخت‌شناختی مדיاهای نانولیفی و درصد تخلخل آن‌ها بررسی گردید. سپس، عملکرد فیلتراسیون مדיاهای نانولیفی شامل کارایی و افت فشار در دو سرعت جریان هوای ۲/۵ و ۵/۳ cm/s با استفاده از دستگاه تست مدیا اندازه‌گیری و فاکتور کیفیت آن‌ها نیز محاسبه شد.

یافته‌ها: مדיاهای تولیدی از الیافی هموار و بدون گره با میانگین قطر در محدوده ۱۰۶ تا ۱۵۱ نانومتر برخوردار بودند. میزان کارایی فیلتراسیون مדיاها برای ذرات زیرمیکرونی ۰/۳ و ۰/۵ میکرون در محدوده ۹۵/۷۲ تا ۹۹/۹۲ درصد و برای ذرات ۱ و ۳ میکرون در محدوده ۹۹/۴۳ تا ۱۰۰ درصد قرار داشت. همچنین، میزان افت فشار مדיاها در سرعت هوای ۲/۵ cm/s در محدوده ۲۵ تا ۶۷ پاسکال و در سرعت ۵/۳ cm/s، در محدوده ۵۸ تا ۱۵۰ پاسکال بود.

نتیجه‌گیری: در بین مדיاهای تولیدی، مدیای حاصل از غلظت محلول ۶ درصد، تحت شرایط الکتروریسی ۱۵ kV، ۰/۵ mL/h و ۱۵ cm، الیاف نازک‌تری داشت و توانایی بالاتری در ربایش ذرات ریز ۰/۳ میکرون نشان داد (۹۹/۸۹ و ۹۹/۹۲ درصد به‌ترتیب در سرعت‌های هوای ۲/۵ و ۵/۳ cm/s). همچنین، میزان افت فشار این مدیای نانولیفی با افزایش سرعت هوا، از ۶۷ به ۱۵۰ پاسکال افزایش یافت.

کلمات کلیدی: ذرات معلق در هوا، پلی وینیل الکل، نانوالیاف، فیلتراسیون

* پست الکترونیکی نویسنده مسئول مکاتبه: fgolbabaei@yahoo.com

مقدمه

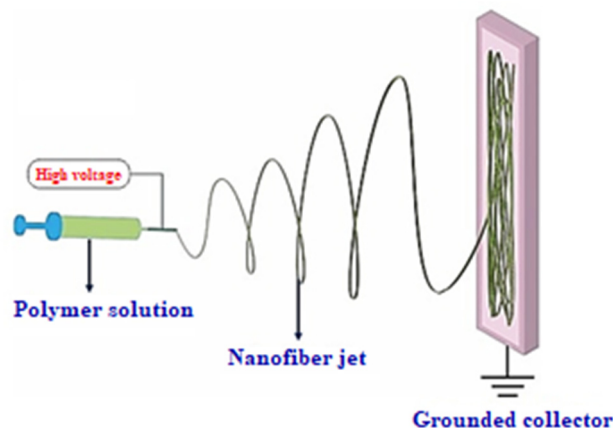
طی سال‌های اخیر آلاینده‌های ذره‌ای در نتیجه تأثیر بر سلامت افراد جامعه به یک معضل جهانی تبدیل شده است (۱). ذرات معلق در هوا که شامل ترکیبات شیمیایی با قطر آئرودینامیک کوچکتر از ۱۰ میکرون (PM_{10})، ۲/۵ میکرون ($PM_{2.5}$) و یک میکرون (PM_1) می‌باشند (۲)، می‌توانند از منابع طبیعی نظیر گردو خاک، گرده گیاهان، ذرات حاصل از آتش سوزی‌های جنگلی و انفجارهای آتشفشانی و نیز از منابع مصنوعی همچون حمل و نقل، صنایع، کشاورزی، استخراج مواد معدنی و فعالیت‌های خانگی تولید و منتشر گردند (۳). مواجهه با ذرات می‌تواند طیفی از مشکلات بهداشتی را ایجاد نماید، به‌طوری‌که در مطالعات به‌طور مداوم ارتباط مستقیم بین ذرات هوا برد و انواع پیامدهای نامطلوب از جمله بیماری‌های تنفسی، قلبی- عروقی، پیامدهای نامطلوب بارداری و کاهش عملکرد و بهره‌وری کاری گزارش شده است (۴-۶). علاوه بر اساس گزارشی از سازمان بهداشت جهانی (WHO) در سال ۲۰۱۹، بیش از ۴ میلیون نفر در سراسر جهان به‌دلیل مواجهه با آلودگی هوا جان خود را از دست داده‌اند (۷). همچنین، مسئله افزایش ریزگردها و افزایش منابع تولیدکننده آن‌ها بر اهمیت این موضوع می‌افزاید.

در این راستا، فیلتراسیون هوا به‌عنوان روشی مؤثر در حذف آلاینده‌ها، کاربرد گسترده‌ای یافته است و در محیط‌های صنعتی نیز نقش مهمی ایفا می‌کند (۸). مدیای فیلتر، که یکی از اجزای اصلی سیستم‌های فیلتراسیون است، به دو نوع بافته شده و بی‌بافت تقسیم می‌شود. مدیای بی‌بافت ضمن تأمین کارایی بالای فیلتراسیون ذرات، افت فشار کمتری نسبت به فیلترهای بافته شده دارند (۱۰). این امر ناشی از ویژگی‌های متمایز آن‌ها نظیر سطح ویژه بالای الیاف، ساختارهای حفره‌ای متعدد، قطر الیاف کنترل شده، عملکردهای سطحی و ویژگی‌های مکانیکی قابل قبول می‌باشد که این مسئله به

کاربرد گسترده آن‌ها از جمله در فیلترهای هوا منجر شده است (۱۱). در سال‌های اخیر، مدیاهای نانولیفی به‌دلیل سطح جمع آوری زیاد و بهبود کارایی فیلتراسیون ذرات و افت فشار هوا، توجه ویژه‌ای را به خود جلب کرده‌اند (۱۲). (۱۳). در میان روش‌های مختلف تولید نانوالیاف، تکنیک الکتروروسی محلول به‌دلیل توانایی تولید مستمر الیاف از محلول پلیمری، هزینه نسبتاً پایین و سهولت کاربری، نسبت به سایر روش‌ها نظیر ملت بلون، جداسازی فازی و خودآرایی، مورد توجه بیشتری قرار گرفته است (۱۱، ۱۴). در روش الکتروروسی محلول، معمولاً از محلول پلیمری استفاده می‌شود که تحت تأثیر یک منبع ولتاژ قوی قرار گرفته و در نتیجه اختلاف پتانسیل ناشی از محلول باردار در نوک نازل سرنگ و صفحه جمع آوری کننده، نانوالیاف شکل می‌گیرند (شکل ۱). پارامترهای فرآیندی الکتروروسی، ویژگی‌های محلول و شرایط محیطی می‌تواند بر خواص ریخت‌شناختی الیاف حاصله تأثیرگذار باشند. در این بین، غلظت محلول الکتروروسی، ولتاژ کاربردی دستگاه و فاصله سر نازل تا صفحه جمع آوری الیاف به‌عنوان پارامترهای تأثیرگذارتر بر ویژگی‌های ریخت‌شناختی الیاف، مطرح شده‌اند (۱۵). همچنین، در بیشتر مطالعات، اصلی‌ترین نقش را غلظت محلول داشته است (۱۶، ۱۷).

پلیمرها به لحاظ دارا بودن ویژگی‌های متنوع مکانیکی، الکتریکی، حرارتی و غیره کاربردهای گسترده‌ای در الکتروروسی دارند (۱۸). در مطالعه حاضر، پلی وینیل الکل (PVA) با فرمول مولکولی $(C_2H_4O)_n$ ، به‌عنوان یک پلیمر با ویژگی‌هایی نظیر زیست‌تخریب‌پذیری، ایمن بودن در مواجهات انسانی و غیرسرطان‌زایی، سهولت در الکتروروسی، پایداری شیمیایی، حرارتی و استحکام کششی بالا در ساخت نانوالیاف مورد توجه است (۱۹). (۲۰). بررسی مطالعات صورت گرفته در این خصوص نشان می‌دهد مدیاهای نانولیفی الکتروروسی شده با استفاده از PVA می‌تواند عملکرد فیلتراسیون مؤثری در فیلتراسیون ذرات ریز نشان دهند (۱۳، ۲۱). به‌عنوان مثال، در پژوهشی مشخص شد مدیای نانولیفی الکتروروسی شده

1. Particulate Matter less than 10 μm in diameter
2. Particulate Matter less than 2.5 μm in diameter
3. Particulate Matter less than 1 μm in diameter
4. World Health Organization



شکل ۱: طرح کلی از فرآیند الکترورسی

ASME AG-1-2019 مورد بررسی قرار گرفت. در نهایت، با تحلیل نتایج حاصل بر اساس هر یک از استانداردهای مذکور، پیشنهادهایی برای دستیابی به یک رویکرد جامع در ارزیابی فیلتراسیون مدیاهای الکترورسی شده ارائه گردید.

روش کار

مواد و تجهیزات

در این پژوهش از PVA با وزن مولکولی ۷۲۰۰۰ گرم بر مول شرکت مرک آلمان استفاده شد. همچنین، از یک لایه بی‌بافت اسپان باند از جنس پلی پروپیلن^۱ (شرکت بافتینه، ایران) با وزن پایه حدود ۱۷ گرم بر متر مربع و ضخامت ۱۰۰ میکرون به‌عنوان زیرلایه نانوالیاف استفاده گردید. آب دیونیزه نیز به‌عنوان حلال مورد استفاده قرار گرفت. دستگاه الکترورسی محلول (Fanavar Nano-Meghyas, ESDP30, Iran) جهت تولید نانوالیاف مورد استفاده قرار گرفت.

آماده سازی محلول پلیمری و انجام فرآیند الکترورسی به‌منظور تهیه نانوالیاف، در ابتدا محلول پلیمری یکنواخت PVA در غلظت‌های مورد بررسی ۵ تا ۶ درصد وزنی - حجمی (w/v) در حلال آب دیونیزه در دمای ۸۰ درجه سلسیوس طی مدت حدود ۲ ساعت تهیه شد (۲۷). سپس، محلول پلیمری داخل یک سرنگ پلاستیکی با

بر پایه پلیمر خالص PVA می‌تواند ذرات ۰/۳ میکرون را با کارایی ۹۹/۹۸٪ و افت فشار ۵۱۸ پاسکال در سرعت هوای عبوری ۵ cm/s فیلتر کند (۲۲). در مطالعه Lv و همکاران (۲۰۱۹) نیز مدیای نانولیفی PVA الکترورسی شده توانست عملکرد فیلتراسیون مطلوب (کارایی بالای فیلتراسیون ۹۹/۹۹ درصد) و افت فشار نسبتاً پایینی (۱۳۰ پاسکال) را نشان دهد (۲۳).

تاکنون پژوهش‌های مختلفی به تولید و توسعه مدیاهای فیلتر با استفاده از پلیمرها و افزودنی‌های مختلف و روش الکترورسی محلول و نیز به ارزیابی عملکرد آن‌ها پرداخته‌اند. برخی از این مطالعات، عملکرد فیلتراسیون را بر اساس مقادیر مشخصی از سرعت جریان هوا مطابق با یک استاندارد معین بررسی کرده‌اند (۲۲-۲۴)، در حالی‌که گروهی دیگر، استاندارد مشخصی را برای این منظور گزارش نکرده‌اند (۲۱، ۲۵، ۲۶). این امر نشان‌دهنده فقدان یک رویکرد واحد و استاندارد در ارزیابی عملکرد فیلتراسیون مدیاهای نانولیفی است. بر همین اساس، در پژوهش حاضر، مدیاهای نانولیفی هموار و بدون گره بر پایه پلی وینیل الکل با روش الکترورسی محلول تولید شدند و ویژگی‌های ساختاری و عملکرد فیلتراسیون آن‌ها در برابر اندازه‌های مختلف ذرات، تحت دو سرعت جریان هوای رایج و منطبق بر دو استاندارد معتبر مربوط به مدیاهای فیلتر هوا شامل ISO 29463 و

1. Polypropylene

جدول ۱: شرایط انجام فرآیند الکترورسی مدیاهای پلیمر PVA

شماره مدیای تولیدی	غلظت محلول (w/v%)	ولتاژ (kV)	نرخ تغذیه محلول (mL/h)	فاصله الکترورسی (cm)	زمان جمع‌آوری الیاف (min.)
۱	۵	۱۵	۰/۷۵	۱۸	۱۵۰
۲	۵/۵	۱۲	۰/۷۵	۱۸	۶۰۰
۳	۶	۱۵	۰/۵	۱۵	۲۲۵

قطر سوزن شماره ۱۸ بارگذاری شد و الیاف در شرایط ذکر شده در جدول ۱، در دمای محیط و رطوبت نسبی 1 ± 28 درصد، روی زیرلایه اسپان باند و با سرعت چرخش جمع‌آوری کننده ۱۷۰ rpm جمع‌آوری شدند (۲۷). محدوده غلظت و مقادیر پارامترهای فرآیندی بر اساس آزمون‌های پایلوت و تجربه عملی تعیین گردید. در این راستا، تنها محلول‌هایی که در شرایط مختلف فرآیندی، قادر به تولید الیاف پایدار و یکنواخت بودند، انتخاب شدند. همچنین، زمان جمع‌آوری الیاف به‌صورت بهینه و بر مبنای دستیابی به بالاترین کارایی فیلتراسیون برای ذرات ۰/۳ میکرون تنظیم شد (۲۴).

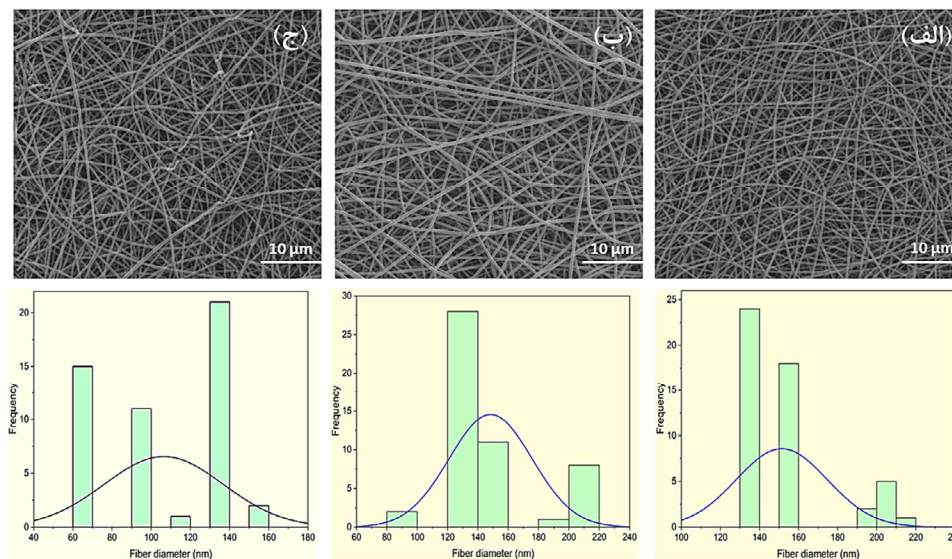
بررسی ویژگی‌های ریخت‌شناختی مدیاهای نانولیفی به‌منظور بررسی ویژگی‌های ریخت‌شناختی مدیاهای نانولیفی تهیه شده، از میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی (FE-SEM, TE-SCAN, MIRA III, Czech Republic) استفاده شد. بدین منظور، مدیاهای نانولیفی با طلا پوشش داده شده و با ولتاژ ۳۰ kV بررسی و از آن‌ها تصویر تهیه گردید (۲۷). به‌منظور تعیین قطر الیاف نیز از نرم افزار ImageJ استفاده شد. همچنین، میزان تخلخل هر یک از مدیاهای نانولیفی با استفاده از روابط ۱ و ۲ تعیین گردید (۲۸).

بررسی ویژگی‌های ریخت‌شناختی مدیاهای نانولیفی به‌منظور بررسی ویژگی‌های ریخت‌شناختی مدیاهای نانولیفی تهیه شده، از میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی (FE-SEM, TE-SCAN, MIRA III, Czech Republic) استفاده شد. بدین منظور، مدیاهای نانولیفی با طلا پوشش داده شده و با ولتاژ ۳۰ kV بررسی و از آن‌ها تصویر تهیه گردید (۲۷). به‌منظور تعیین قطر الیاف نیز از نرم افزار ImageJ استفاده شد. همچنین، میزان تخلخل هر یک از مدیاهای نانولیفی با استفاده از روابط ۱ و ۲ تعیین گردید (۲۸).

$$\varepsilon = 1 - \alpha \quad (1)$$

$$\alpha = \frac{w}{\rho \cdot Z} \quad (2)$$

که در آن، ε نشاندهنده تخلخل، α چگالی فشردگی و بدون بعد، w وزن پایه (وزن مدیای فیلتر نانولیفی در واحد



شکل ۲: تصاویر FE-SEM و توزیع فراوانی قطر نانوالیاف PVA در مדיاهای نانولیفی الکتروسی شده (الف) شماره ۱، (ب) شماره ۲ و (ج) شماره ۳

جدول ۲: مشخصات ساختاری مדיاهای نانولیفی حاصل از محلول PVA

شماره مدیای تولیدی	قطر الیاف (nm)	وزن پایه (g/m ²)	ضخامت (μm)	تخلخل (%)
۱	۱۵۱/۴۴ ± ۲۳/۲۷	۱۸/۰۷ ± ۰/۰۱	۱۱۱ ± ۱/۰	۸۶/۱۰ ± ۰/۴۲
۲	۱۴۸/۳۷ ± ۲۷/۴۳	۱۹/۱۲ ± ۰/۰۳	۱۲۱ ± ۲/۶	۸۶/۷۰ ± ۰/۲۶
۳	۱۰۶/۴۰ ± ۳۰/۴۱	۱۸/۱۱ ± ۰/۰۸	۱۱۲ ± ۲/۰	۸۶/۴۰ ± ۰/۳۲

تعیین شد تا امکان تولید الیاف الکتروسی پایدار و قابل قبول فراهم گردد. همان‌طور که در شکل ۲ می‌توان دید، تمامی مדיاهای نانولیفی الکتروسی شده، از ساختار تقریباً یکنواخت و الیاف بدون گره و برجستگی برخوردار بودند. میانگین و انحراف معیار قطر نانوالیاف در مדיاهای شماره ۱، ۲ و ۳ به ترتیب $151/44 \pm 23/27$ نانومتر، $148/37 \pm 27/43$ نانومتر و $106/40 \pm 30/41$ نانومتر تعیین گردید. به علاوه، در جدول ۲، سایر مشخصات ساختاری مדיاهای مورد مطالعه شامل وزن پایه، ضخامت و درصد تخلخل نیز آمده است.

با توجه به نتایج مشاهده شده در شکل ۲ و جدول ۲، بیشترین و کمترین میزان میانگین قطر الیاف به ترتیب در مדיاهای نانولیفی شماره ۱ و ۳ حاصل از محلول PVA با غلظت‌های محلول ۵ و ۶ درصد وجود داشت (جدول ۱). با

$$QF = - \frac{\ln(1-E)}{\Delta P} \quad (3)$$

- تحلیل آماری

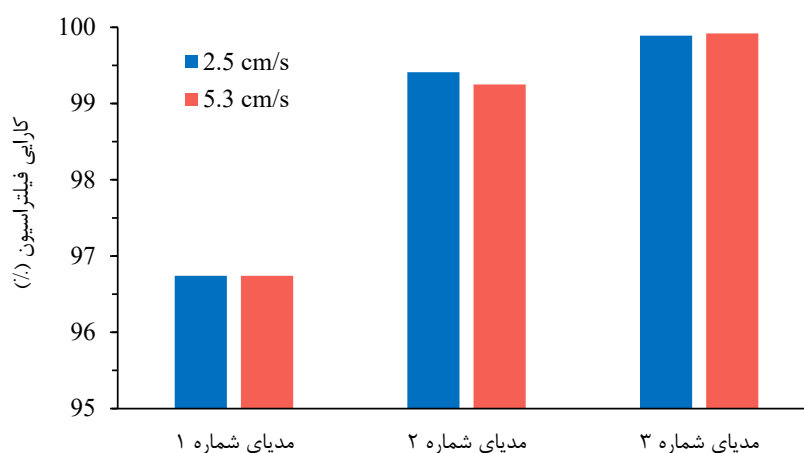
تحلیل آماری توسط نرم افزار SPSS (SPSS, Inc., Chicago, IL, USA) نسخه ۲۶ انجام گرفت. برای مقایسه میانگین‌های شاخص‌های کارایی فیلتراسیون و افت فشار مדיاها، تحلیل واریانس یک‌طرفه و نیز آزمون تعقیبی بن فرونی در سطح معنی‌دار $P < 0/05$ استفاده شدند. نتایج آزمایشگاهی به صورت مقدار میانگین $\pm$ انحراف معیار نشان داده شده است.

== یافته‌ها

همان‌گونه که پیش‌تر اشاره شد، در این مطالعه محدوده غلظت و پارامترهای فرآیندی به صورت تجربی

جدول ۳: خلاصه نتایج آزمون عملکرد فیلتراسیون مایه‌های نانولیفی الکترورسی شده در سرعت‌های جریان هوا و اندازه‌های مختلف ذرات

شماره مایه تولیدی	سرعت جریان هوا (cm/s)	کارایی فیلتراسیون (%) ذرات با اندازه مختلف (μm)				افت فشار (Pa)	فاکتور کیفیت (Pa ⁻¹)
		۰/۳	۰/۵	۱	۳		
۱	۲/۵	۹۶/۷۴	۹۷/۷۸	۹۹/۴۳	۱۰۰	۲۵	۰/۱۴
	۵/۳	۹۵/۷۲	۹۶/۱۰	۹۹/۷۴	۱۰۰	۵۸	۰/۰۵
۲	۲/۵	۹۹/۴۱	۹۹/۶۹	۱۰۰	۱۰۰	۵۸	۰/۰۹
	۵/۳	۹۹/۲۵	۹۹/۵۸	۱۰۰	۱۰۰	۱۳۰	۰/۰۴
۳	۲/۵	۹۹/۸۹	۹۹/۹۵	۱۰۰	۱۰۰	۶۷	۰/۱۰
	۵/۳	۹۹/۹۲	۹۹/۹۸	۱۰۰	۱۰۰	۱۵۰	۰/۰۵



شکل ۳: مقایسه کارایی فیلتراسیون مایه‌های نانولیفی تولید شده با روش الکترورسی محلول در رایش ذرات ۰/۳ میکرون در دو سرعت جریان هوای ۲/۵ و ۵/۳ cm/s

شاخص‌های کارایی فیلتراسیون ذرات ۰/۳ میکرون و افت فشار هوا در هر دو سرعت جریان هوای ۲/۵ و ۵/۳ cm/s به‌طور معناداری با ویژگی‌های ساختاری مایه‌ها، شامل میانگین قطر نانوالیاف و تخلخل، مرتبط بودند (جدول ۴). به بیان دیگر، اختلاف قابل توجهی در کارایی فیلتراسیون و افت فشار میان مایه‌های تولیدی مشاهده شد ($P < 0.05$). مقایسه دو به دوی مایه‌ها نیز این موضوع را تأیید کرد؛ به‌گونه‌ای که مایه شماره ۳ با داشتن الیاف ظریف‌تر و تخلخل بالاتر نسبت به مایه شماره ۱، کارایی فیلتراسیون و افت فشار بیشتری در هر دو سرعت جریان هوا نشان داد ($P < 0.001$). در واقع، افزایش کارایی این مایه همراه با افت فشار بالاتر بیانگر نقش ساختار متراکم‌تر و قطر کمتر الیاف در بهبود فرآیند فیلتراسیون است.

توجه به میزان تخلخل مایه‌های شماره ۱، ۲ و ۳ در جدول ۲، که به‌ترتیب طی زمان‌های بهینه ۱۵۰، ۶۰۰ و ۲۲۵ دقیقه الکترورسی شدند، مایه نانولیفی شماره ۲ از ضخامت نسبتاً بیشتر و ساختار تا حدودی متخلخل‌تری برخوردار بود.

همچنین، در جدول ۳، نتایج مربوط به آزمون عملکرد فیلتراسیون مایه‌های نانولیفی شامل کارایی به‌دام اندازی ذرات در اندازه‌های مختلف ۰/۳، ۰/۵، ۱ و ۳ میکرون، افت فشار و نیز فاکتور کیفیت محاسبه شده برای ذرات ۰/۳ میکرون ارائه گردیده است.

در شکل ۳، مقایسه میزان کارایی به‌دام اندازی ذرات در مایه‌های نانولیفی تولیدی برای ذرات ۰/۳ میکرون در سرعت‌های جریان هوای ۲/۵ و ۵/۳ cm/s آمده است. نتایج آزمون تحلیل واریانس یک‌طرفه نشان داد که

جدول ۴: نتایج تحلیل واریانس شاخص‌های عملکرد فیلتراسیون و ویژگی‌های ریخت‌شناختی مדיاهای نانولیفی مورد بررسی

شاخص عملکرد فیلتراسیون	سرعت جریان هوا (cm/s)	P-value	
		میانگین قطر نانوالیاف	میانگین تخلخل
کارایی فیلتراسیون	۱۵	۰/۰۰۲	۰/۰۰۲
	۳۲	<۰/۰۰۱	<۰/۰۰۱
افت فشار هوای عبوری	۱۵	<۰/۰۰۱	<۰/۰۰۱
	۳۲	<۰/۰۰۱	<۰/۰۰۱

بحث

دارد. به‌گونه‌ای که در آن تحقیقات نیز انتخاب محدوده مناسب پارامترهای محلول و فرآیندی به تولید مדיاهایی با لیاف نازک، یکنواخت و فاقد گره منجر شد.

علاوه بر یکنواختی و قطر لیاف، تخلخل نیز از عوامل تعیین‌کننده در عملکرد فیلتراسیون محسوب می‌شود و عمدتاً تحت تأثیر وزن پایه و ضخامت مדיا قرار دارد. نتایج این پژوهش نشان داد مدیای شماره ۲ به دلیل زمان الکتروریزی طولانی‌تر و ضخامت بیشتر (۱۶)، تخلخل بالاتری نسبت به سایر مדיاها داشت. هرچند اختلاف محاسبه‌شده در میزان تخلخل میان مדיاها اندک بود (حدود ۰/۶ درصد) و فضای خالی آن‌ها تقریباً مشابه به‌نظر می‌رسید، اما تفاوت در ضخامت نشان می‌دهد که تغییر زمان الکتروریزی می‌تواند ساختار نهایی و درجه فشردگی مדיا را تحت تأثیر قرار دهد. بنابراین، زمان الکتروریزی بیش از آن‌که بر تخلخل ذاتی اثرگذار باشد، نقش اصلی را در کنترل ضخامت و میزان لایه‌نشانی ایفا می‌کند، در حالی که میزان تخلخل به‌دلیل ماهیت فرآیند الکتروریزی و ویژگی‌های محلول تغییر چندانی نشان نداد (۳۸).

بر اساس یافته‌های مطالعه حاضر، بالاترین مقدار کارایی فیلتراسیون برای ذرات در اندازه ۰/۳ میکرون در سرعت جریان هوای ۵/۳ cm/s مربوط به مدیای نانولیفی شماره ۳ (۹۹/۹۲ درصد) با میزان وزن پایه (۱۸/۱۱ g/m²) می‌شد. این میزان از مقدار کارایی گزارش شده در مطالعات Yu و همکاران (۲۰۲۰) (۳۹) و کاظمی و همکاران (۲۰۲۳) (۴۰) نیز بالاتر بود. این نتیجه نشان می‌دهد که کاهش قطر لیاف توانسته است به‌دام اندازی

در این پژوهش مדיاهای نانولیفی هموار بر پایه PVA تحت شرایط پایدار الکتروریزی تولید و عملکرد فیلتراسیون آن‌ها شامل کارایی به‌دام اندازی ذرات با اندازه‌های مختلف، افت فشار و فاکتور کیفیت در سرعت‌های جریان هوا ارزیابی شدند. از آن جایی‌که ساختار نانولیفی یکنواخت مדיاهای الکتروریزی شده در کاربرد آن‌ها برای فیلتراسیون ذرات ترجیح داده می‌شود (۳۲)، بنابراین در مطالعه حاضر، مדיاهای نانولیفی هموار با غلظت‌های مختلف و در شرایط الکتروریزی پایدار و قابل قبول تولید شدند. تصاویر FE-SEM (شکل ۲) نشان دادند که تمامی مדיاهای تولیدی دارای ساختاری یکنواخت و بدون گره هستند. در میان آن‌ها، مدیای حاصل از محلول ۶ درصد PVA تحت شرایط ۱۵ kV، ۰/۵ mL/h و ۱۵ cm دارای لیاف نازک‌تر بود (جداول ۱ و ۲). این ویژگی احتمالاً ناشی از افزایش درهم‌تنیدگی زنجیره‌های پلیمری و هدایت بهتر نیروهای الکتریکی بوده که منجر به تشکیل لیاف هموار و بدون گره شده است (۳۳). بعلاوه، این مسئله نیز به نوبه خود می‌تواند منجر به تشکیل لیاف بدون گره و هموار گردد. به‌طوری‌که، با افزایش برهم‌کنش بین زنجیره‌های پلیمری و هدایت الکتریکی، بار الکتریکی بیشتری می‌تواند از طریق جریان شتاب‌دار از محلول الکتروریزی حمل شود. بنابراین، امکان تشکیل لیاف با ساختار هموار و بدون گره افزایش می‌یابد (۳۴، ۳۵). یافته‌های مطالعه حاضر در مورد سایر مדיاهای نانولیفی PVA تولید شده در مطالعات Zhao و همکاران (۲۰۱۶) (۳۶) و El-Aziz و همکاران (۲۰۱۷) (۳۷) نیز همخوانی

که افزایش سرعت جریان هوا موجب افزایش خطی افت فشار در مدیاهای نانولیفی تولیدی می‌شود ($r = 1$) $P < 0.05$ ؛ الگویی که می‌تواند بازتابی از رفتار جریان هوا در ساختار متخلخل الیاف و هم‌راستا با قانون دارسی باشد (۴۶). مقایسه میان مدیاهای نشان داد که کاهش قطر الیاف و افزایش تخلخل تأثیر معناداری بر تغییر شاخص‌های عملکردی در سرعت‌های مختلف جریان هوا دارد. در این میان، مدیای شماره ۳ بیشترین تغییر را در افت فشار با افزایش سرعت هوا نشان داد (حدود ۱۵۰ پاسکال). این یافته با گزارش فرهنگ دهقان و همکاران (۲۰۱۶) در مورد مدیای نانولیفی پلی‌آکریلونیتریل/اکسید منیزیم همسو است که در آن نیز افزایش سرعت جریان از ۵/۳ تا ۲/۵ منجر به افزایش ۱۵۰ پاسکالی در افت فشار گردید (۴۷). علت این رفتار را می‌توان به ساختار متراکم‌تر و قطر الیاف ظریف‌تر این مدیا (حدود ۱۰۶ نانومتر) نسبت داد که اگرچه آن موجب بهبود کارایی فیلتراسیون ذرات ریز شده، اما مقاومت بیشتری در برابر عبور هوا ایجاد کرده است. این نتیجه همچنین با مطالعه حبیبی محرز و همکاران (۲۰۱۸) مطابقت دارد (۴۸). علاوه بر این، میزان افت فشار در تمامی مدیاهای تولیدشده به‌طور قابل توجهی پایین‌تر از فیلتر هپای تجاری نوع H14 (بیش از ۴۰۰ پاسکال) (۲۷) بود که نشان‌دهنده مزیت بالقوه مدیاهای نانولیفی تولیدی در کاربردهای عملی است.

در مطالعه حاضر، عملکرد فیلتراسیون مدیاهای تولید شده در مقایسه با الزامات استانداردهای ISO 29463 (۲۹) و ASME AG-1-2019 (۳۰) مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که کارایی فیلتراسیون ذرات با اندازه ۰/۳ میکرون پایین‌تر از حد تعیین شده در استاندارد ASME AG-1-2019 (۳۰) است، در حالی‌که افت فشار این مدیاهای در سطح مطلوب و پایین قرار دارد. این ویژگی می‌تواند بازتابی از ساختار مناسب الیاف الکترورسی شده در مواجهه با جریان هوا باشد. از سوی دیگر، بر اساس طبقه‌بندی ISO 29463، مدیاهای تولیدی، با کارایی بالاتر از ۹۹٫۵٪، در گروه فیلترهای کارآمد (EPA) قرار می‌گیرند. مقایسه دو استاندارد نشان می‌دهد که

ذرات ریز را افزایش دهد و کارایی فیلتراسیون را بهبود بخشد. در این پژوهش، تنها در مدیای نانولیفی شماره ۳، افزایش جزئی در کارایی فیلتراسیون ذرات زیرمیکرونی ۰/۳ و ۰/۵ میکرون مشاهده شد. این بهبود احتمالاً ناشی از ساختار لیفی نازک‌تر و متخلخل‌تر این مدیا نسبت به سایر نمونه‌ها است. تغییرات جزئی کارایی برای این ذرات با گزارش Muniz و همکاران (۲۰۲۳) همخوانی دارد؛ به‌طوری که در مطالعه مذکور نیز افزایش سرعت جریان هوا در مدیای الکترورسی شده منجر به کاهش نسبی در کارایی ذرات ریز ۰/۳ و ۰/۵ میکرون شد (۲۱). این پدیده عمدتاً به تضعیف بارهای الکتروستاتیک در بستر الیاف طی فرآیند الکترورسی نسبت داده شده است (۴۱). از سوی دیگر، در حالی‌که افزایش سرعت جریان هوا در مدیای شماره ۳ منجر به بهبود کارایی جمع‌آوری ذرات ریز شد، در دو مدیای دیگر، همین تغییر سبب افزایش نفوذپذیری و در نتیجه کاهش کارایی این ذرات گردید. علاوه بر این، کارایی فیلتراسیون برای ذرات بزرگ‌تر (۱ و ۳ میکرون) در مدیاهای شماره ۲ و ۳ در بالاترین سطح (۱۰۰ درصد) باقی ماند و همین روند برای ذرات ۳ میکرون در مدیای شماره ۱ نیز مشاهده شد. به نظر می‌رسد این رفتار به ترکیب مکانیسم‌های فیلتراسیون، شامل ربایش ذرات که وابسته به اندازه ذره و سرعت جریان است (۴۲)، و ویژگی‌های ساختاری متفاوت مدیاهای مرتبط باشد. از آن‌جا که برخورد مستقیم نقش پررنگ‌تری در به‌دام‌اندازی ذرات زیرمیکرونی ۰/۳ و ۰/۵ میکرون ایفا می‌کند (۳۲)، ساختار ظریف‌تر و متخلخل‌تر مدیای شماره ۳ می‌تواند علت افزایش کارایی فیلتراسیون آن با افزایش سرعت جریان هوا باشد.

افت فشار به‌عنوان شاخص مقاومت مدیا در برابر عبور جریان هوا، مستقیماً با مصرف انرژی مرتبط است و کاهش آن در کنار حفظ کارایی بالا، شرط اساسی برای مقرون‌به‌صرفه بودن فیلترها محسوب می‌شود (۴۳، ۴۴). علاوه بر مشخصات ساختاری مدیای فیلتر، سرعت جریان هوا (یا دبی عبوری) نیز می‌تواند در میزان افت فشار فیلترها مؤثر باشد (۴۵). یافته‌های این پژوهش نشان داد

مرتبط با مدیاهای فیلتر هوا شامل ISO 29463 و ASME AG-1-2019 پرداخت. مدیاهای تولیدی از ساختار نانولیفی هموار با میانگین قطر در محدوده ۱۰۶ تا ۱۵۱ نانومتر و میزان تخلخل حدود ۸۶ درصد برخوردار بودند. یافته‌های این تحقیق نشان داد:

- مدیاهای نانولیفی تولیدی توانایی بالایی در ربایش ذرات زیرمیکرونی ۰/۳ و ۰/۵ میکرون در محدوده ۹۵/۷۲ تا ۹۹/۹۲ درصد و ذرات ۱ و ۳ میکرون در محدوده ۹۹/۴۳ تا ۱۰۰ درصد داشتند.
- در میان مدیاهای تولیدی، مدیای نانولیفی حاصل از غلظت محلول ۶ درصد PVA تحت شرایط الکترورسی ۱۵ kV، ۱۵ cm و ۰/۵ mL/h، با دارا بودن الیاف نازک‌تر (حدود ۱۰۶ نانومتر)، میزان کارایی نسبتاً بالاتری (۹۹/۹۲ درصد) در فیلتراسیون ذرات ریز ۰/۳ میکرون داشت.
- افزایش سرعت جریان هوا منجر به بهبود توانایی ربایش ذرات زیرمیکرونی در مدیای نانولیفی دارای الیاف نازک‌تر شد.
- میزان افت فشار هوای عبوری از مدیاهای نانولیفی تولیدی با افزایش میزان سرعت جریان هوا افزایش یافت.
- مدیاهای نانولیفی تولیدی بر اساس استاندارد ISO 29463 در طبقه فیلترهای کارآمد قرار می‌گیرند.

تشکر و قدردانی

این مطالعه حاصل بخشی از طرح تحقیقاتی مصوب دانشگاه علوم پزشکی تهران با کد اخلاق IR.TUMS.SPH.REC.1401.133 می‌باشد که با حمایت دانشگاه علوم پزشکی تهران انجام گردیده است.

REFERENCES

1. Heal MR, Kumar P, Harrison RM. Particles, air quality, policy and health. *Chem Soc Rev*. 2012;41(19):6606-30.
2. World Health Organization. WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide [Internet]. Geneva: World Health Organization; 2021 Sep 7 [cited 2025 Oct 3]. Available from: <https://www.who.int/publications/i/item/9789240034228>

استاندارد ASME AG-1-2019 به‌دلیل ماهیت کاربردی خود در صنایع هسته‌ای، معیارهای سخت‌گیرانه‌تری از جمله حدود مجاز افت فشار را در نظر می‌گیرد؛ در حالی که استاندارد ISO 29463 تمرکز بیشتری بر درجه تمیزی و کارایی فیلتراسیون برای کاربردهای متنوع صنعتی دارد. بنابراین، استفاده هم‌زمان از هر دو استاندارد می‌تواند دیدگاه جامع‌تری نسبت به قابلیت‌های فیلتراسیون مدیاهای نانولیفی فراهم سازد.

به‌طور کلی، این پژوهش از مزایایی همچون فرآیند تولید ساده، ایمنی بیشتر به دلیل استفاده از حلال آب، بهره‌گیری از پلیمر مقرون‌به‌صرفه و دستیابی به عملکرد مطلوب در فیلتراسیون ذرات برخوردار بود. با این حال، محدودیت‌هایی نیز وجود داشت. نخست آن‌که نانوالیاف پایدار در شرایط متنوع الکترورسی تولید شدند و در نتیجه امکان ارزیابی دقیق اثر پارامترهای فرایندی بر ویژگی‌های ریخت‌شناختی مدیا فراهم نشد. افزون بر این، نتایج حاصل در شرایط آزمایشگاهی به‌دست آمد و برای تعمیم‌پذیری به کاربردهای واقعی، نیاز به مطالعات تکمیلی وجود دارد.

نتیجه‌گیری

- مطالعه حاضر با هدف تولید مدیاهای نانولیفی بر پایه PVA با غلظت‌های مختلف و پارامترهای مختلف شرایط فرآیندی به روش الکترورسی محلول، به بررسی ویژگی‌های ساختاری الیاف و تحلیل عملکرد فیلتراسیون مدیاهای تولیدی برای ذرات با اندازه‌های مختلف در سرعت‌های جریان هوای رایج بر اساس دو استاندارد

3. Mukherjee A, Agrawal M. World air particulate matter: sources, distribution and health effects. *Environ Chem Lett*. 2017;15(2):283-309.
4. Korten I, Ramsey K, Latzin P. Air pollution during pregnancy and lung development in the child. *Paediatr Respir Rev*. 2017;21:38-46.
5. Schraufnagel DE. The health effects of ultrafine particles. *Exp Mol Med*. 2020;52(3):311-7.
6. Wyon DP. The effects of indoor air quality on performance

- and productivity. *Indoor Air*. 2004;14.
7. World Health Organization. Ambient (outdoor) air quality and health [Internet]. Geneva: World Health Organization; [cited 2025 Oct 3]. Available from: [https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)
8. Jackiewicz A, Podgorski A, Gradon L, Michalski J. Nanostructured media to improve the performance of fibrous filters. *KONA Powder Particle J*. 2013;30:244-55.
9. Yun KM, Hogan CJ Jr, Matsubayashi Y, Kawabe M, Iskandar F, Okuyama K. Nanoparticle filtration by electrospun polymer fibers. *Chem Eng Sci*. 2007;62(17):4751-9.
10. Lv D, Zhu M, Jiang Z, Jiang S, Zhang Q, Xiong R, et al. Green electrospun nanofibers and their Application in air filtration. *Macromol Mater Eng*. 2018;303(12):1800336.
11. Zhang Q, Welch J, Park H, Wu CY, Sigmund W, Marijnissen JC. Improvement in nanofiber filtration by multiple thin layers of nanofiber mats. *J Aerosol Sci*. 2010;41(2):230-6.
12. Buivydiene D, Krugly E, Ciuzas D, Tichonovas M, Kliucininkas L, Martuzevicius D. Formation and characterisation of air filter material printed by melt electrospinning. *J Aerosol Sci*. 2019;131:48-63.
13. Keyvani S, Golbabaie F, Neisiany RE, Das O, Pourmand MR, Kalantary S. Filtration performance of biodegradable electrospun nanofibrous membrane for sub-micron particles: A systematic review. *Macromol Mater Eng*. 2025;310(3):2400323.
14. Kanmaz D, Toprakci HAK, Olmez H, Toprakci O. Electrospun polylactic acid based nanofibers for biomedical applications. *Mater Sci Res India*. 2018;15(3):224-40.
15. Gu S, Ren J, Vancso G. Process optimization and empirical modeling for electrospun polyacrylonitrile (PAN) nanofiber precursor of carbon nanofibers. *Eur Polym J*. 2005;41(11):2559-68.
16. De Riccardis MF. Electrospun nanofibrous membranes for air filtration: A critical review. *Compounds*. 2023;3(3):390-410.
17. Nataraj S, Yang K, Aminabhavi T. Polyacrylonitrile-based nanofibers—A state-of-the-art review. *Prog Polym Sci*. 2012;37(3):487-513.
18. Upadhyaya P, Verma R. Biodegradable polymer for biomedical applications. *Mater Sci Res India*. 2006;3(24):283-5.
19. Zheng H, Du Y, Yu J, Huang R, Zhang L. Preparation and characterization of chitosan/poly (vinyl alcohol) blend fibers. *J Appl Polym Sci*. 2001;80(13):2558-2565.
20. Elshishiny F, Mamdouh W. Fabrication of nanofibrous/xerogel layer-by-layer biocomposite scaffolds for skin tissue regeneration: In Vitro study. *ACS Omega*. 2020;5(5):2133-47.
21. Muniz NO, Gabut S, Maton M, Odou P, Vialette M, Pinon A, et al. Electrospun filtering membrane designed as component of self-decontaminating protective masks. *Nanomaterials*. 2023;13(1):9.
22. Des Ligneris E, Dumée LF, Al-Attabi R, Castanet E, Schütz J, Kong L. Mixed matrix poly (vinyl alcohol)-copper nanofibrous anti-microbial air-microfilters. *Membranes*. 2019;9(7):87.
23. Lv D, Wang R, Tang G, Mou Z, Lei J, Han J, et al. Ecofriendly electrospun membranes loaded with visible-light-responding nanoparticles for multifunctional usages: highly efficient air filtration, dye scavenging, and bactericidal activity. *ACS Appl Mater Interfaces*. 2019;11(13):12880-9.
24. Cui J, Wang Y, Lu T, Liu K, Huang C. High performance, environmentally friendly and sustainable nanofiber membrane filter for removal of particulate matter 1.0. *J Colloid Interface Sci*. 2021;597:48-55.
25. Tian H, Fu X, Zheng M, Wang Y, Li Y, Xiang A, et al. Natural polypeptides treat pollution complex: Moisture-resistant multi-functional protein nanofabrics for sustainable air filtration. *Nano Res*. 2018;11:4265-77.
26. Kadam V, Truong YB, Schutz J, Kyrtatzis IL, Padhye R, Wang L. Gelatin/ β -Cyclodextrin Bio-Nanofibers as respiratory filter media for filtration of aerosols and volatile organic compounds at low air resistance. *J Hazard Mater*. 2021;403:123841.
27. Keyvani S, Golbabaie F, Neisiany RE, Das O, Rahimi Foroushani A, Kalantary S. Bio-based nanofiber membranes for effective air filtration: Fabrication and evaluation of flame-retardant behavior, mechanical properties, and filtration performance. *Macromol Mater Eng*. 2025;310(8):2500017.
28. Leung WWF, Hung CH, Yuen PT. Effect of face velocity, nanofiber packing density and thickness on filtration performance of filters with nanofibers coated on a substrate. *Sep Purif Technol*. 2010;71(1):30-7.

29. International Organization for Standardization. ISO 29463-5:2022. High-efficiency filters and filter media for removing particles in air — Test method for filter elements [Internet]. Geneva: ISO; 2022 [cited 2025 Oct 3]. Available from: <https://www.iso.org/standard/777v40.html>
30. American Society of Mechanical Engineers. ASME AG-1-2023: Code on nuclear air and gas treatment [Internet]. New York: ASME; 2023 [cited 2025 Oct 3]. Available from: https://www.asme.org/getmedia/1f9c612e-ff17-482a-a633-520c58f9c937/AG-1_2023_ToC.pdf
31. Wang C, Meng N, Babar AA, Gong X, Liu G, Wang X, et al. Highly transparent nanofibrous membranes used as transparent masks for efficient PM0.3 removal. *ACS Nano*. 2021;16(1):119-28.
32. Borojeni IA, Gajewski G, Riahi RA. Application of electrospun nonwoven fibers in air filters. *Fibers*. 2022;10(2):15.
33. Phachamud T, Phiriyawirut M. Physical properties of polyvinyl alcohol electrospun fiber mat. *Res J Pharm Biol Chem Sci*. 2011;2:675-84.
34. Fathi M, Nasrabadi MN, Varshosaz J. Characteristics of vitamin E-loaded nanofibres from dextran. *Int J Food Prop*. 2017;20(11):2665-74.
35. Nelson BC, Johnson ME, Walker ML, Riley KR, Sims CM. Antioxidant cerium oxide nanoparticles in biology and medicine. *Antioxidants*. 2016;5(2):15.
36. Zhao J, Sun Z, Shao Z, Xu L. Effect of surface-active agent on morphology and properties of electrospun PVA nanofibres. *Fibers Polym*. 2016;17(6):896-901.
37. Abd El-aziz A, El-Maghraby A, Taha NA. Comparison between polyvinyl alcohol (PVA) nanofiber and polyvinyl alcohol (PVA) nanofiber/hydroxyapatite (HA) for removal of Zn²⁺ ions from wastewater. *Arab J Chem*. 2017;10(8):1052-60.
38. Kimura VT, Zanin MHA, Wang SH. Influence of thickness on the properties of electrospun PCL/gelatin nanofiber scaffolds. *Polym Bull*. 2024; 81: 9347–61.
39. Yu X, Li C, Tian H, Yuan L, Xiang A, Li J, et al. Hydrophobic cross-linked zein-based nanofibers with efficient air filtration and improved moisture stability. *Chem Eng J*. 2020;396:125373.
40. Kazemi M, Kalantari S, Abbasi A, Foroushani AR, Mowlavi H, Montazemi AH, et al. Fabrication of PET Nanofibers Media by Electrospinning Method and Determining its Efficiency in Removing Submicron and Micron Particle Contaminants from Air. *Journal of Health and Safety at Work*. 2023;13(1):44-59. [Persian]
41. Leung WWF, Sun Q. Electrostatic charged nanofiber filter for filtering airborne novel coronavirus (COVID-19) and nano-aerosols. *Sep Purif Technol*. 2020;250:116886.
42. Otani Y, Eryu K, Furuuchi M, Tajima N, Tekasakul P. Inertial classification of nanoparticles with fibrous filters. *Aerosol Air Qual Res*. 2007;7(3):343-52.
43. Huang SH, Chen CW, Kuo YM, Lai CY, McKay R, Chen CC. Factors affecting filter penetration and quality factor of particulate respirators. *Aerosol Air Qual Res*. 2013;13(1):162-71.
44. Mousavi T, Golbabaie F, Pourmand M, Rezaei S, Hosseini M, Shahri MHK, 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):309-19. [Persian]
45. Moradi Gh, Sedighzadeh A, Yarahmadi R, Bakand Sh, Farshad AA, Rezaeifard B, et al. Synthesis of nano-fibrous mats using electrospinning method and determining their efficiency for nanoaerosols removal. *Iran Occupational Health*. 2014;11(4):1-11 [Persian]
46. Barhate R, Loong CK, Ramakrishna S. Preparation and characterization of nanofibrous filtering media. *J Memb Sci*. 2006;283(1-2):209-18.
47. Farhang Dehghan S, Maddah B, Golbabaie F. The development of nanofibrous media filter containing nanoparticles for removing particles from air stream. *Iranian Journal of Health and Environment*. 2016;8(4):509-24. [Persian]
48. Habibi Mohraz M, Golbabaie F, Je Yu I, Sedigh Zadeh A, Mansournia MA, 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. [Persian]