Iran Occupational Health

Iran Occupational Health. 2021 (01 Feb);18: 4

Original Article

http://ioh.iums.ac.ir

Comparison of Filtration Performance Between Neat and Plasma-Treated PAN / MgO Nanofibers in the Removal of 10 To 1000 Nm Particles

Farideh Golbabaei, Professor, Department of Occupational Health, School of Public Health, Tehran University of Medical Sciences, Tehran, Iran.
Majid Habibi Mohraz, Assistant Professor, Department of Occupational Health, School of Public Health, Hamedan University of Medical Sciences, Hamedan, Iran.
Rasoul Yarahmadi, Associate Professor, Department of Occupational Health, School of Public Health, Iran University of Medical Sciences, Tehran, Iran.
Asghar Sadighzadeh, Nuclear Fusion Research Center, Atomic Energy Organization, Tehran, Iran.
Hamzeh Mohammadi, PhD Student, Department of Occupational Health, School of Public Health, Tehran University of Medical Sciences, Tehran, Iran.
Somayeh Farhang Dehghan, (*Corresponding author), Assistant Professor, Environmental and Occupational Hazards Control Research Center, School of Public Health and Safety, Shahid Beheshti University of Medical Sciences, Tehran, Iran. somayeh.farhang@gmail.com

Abstract

Background and aims: The present study aims to compare the filtration performance of the neat hybrid electrospun nanofibers, consisting of polyacrylonitrile (PAN) polymer and magnesium oxide (MgO) nanoparticles and the plasma treated ones in removing fine particles from the air stream.

Methods: The upper surface of the nanofibers, were processed by cold-plasma with a radio frequency power supply (13.56 MHz with a power of 20 watts), argon gas and operating pressure of 0.2 torr. Initial efficiency tests for numerical removal of particles have been done in accordance with standards ISO 29463 and EN 779. Pressure drop and quality factors were determined for the fabricated media. In order to confirm the presence of magnesium oxide nanoparticles in the nanofibers, X-Ray Diffraction pattern (XRD) was prepared. Analysis algorithms of SEM images, were used to calculate the porosity of filters, using the MATLAB software.

Results: The mean initial efficiency of the neat and plasma-treated media was, 90.77 ± 6.7 ٪ and 73.66 ± 8.86 ٪ for collecting particles from 10 to 1000 nm, respectively. The initial mean pressure drop of the neat and treated media at the test face velocity was, 78.22 ± 3.11 pa and 22.00 ± 2.33 pa, respectively, and their mean quality factor for collecting 10 to 1000 nm particles was, 0.029 and 0.010 (Pascal/1), respectively.

Conclusion: By performing plasma treatment, collection efficiency of particles decreased, but with a significant decrease in pressure drop, the neat media ultimately presented a higher score of quality factor in comparison with the treated ones.

Conflicts of interest: None

Funding: Tehran University of Medical Sciences

Keywords

Filtration

Nanofiber

Plasma-treated

Performance

Nanoparticle

Received: 2019/07/19

Accepted : 2020/05/3

Copyright © 2021 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.

[Downloaded from ioh.iums.ac.ir on 2026-11-18]

[DOI: 10.52547/ioh.18.1.45]

INTRODUCTION

Polymer nanofibers are increasingly used in various fields, due to their large surface area per unit of mass and their small sizes, which are often produced by electrospinning techniques. Mixing the polymer nanofibers with the metal oxide nanoparticles such as, MgO and other oxides, has been considered by some researchers for air purification applications. This is due to the unique ability of these nanoparticles to clean a wide variety of toxic gases, such as chemical pollutants, biological pollutants (viruses, bacteria), pesticides, and many more [1]. Hybrid nanofibers (for example, a combination of polymers and nanoparticles) can present multiple functions in the simultaneous purification of aerosols, bioaersols, and gaseous pollutants. The electrospun nanofiber mat itself, is soft and brittle, on the other hand, due to the high pressure drop across its surface, nanofiber mat is not commonly used as an air filter media [2]. In an effort to provide good structural support, without altering the nanofiber properties and preventing this pressure drop, the nanofiber composites have been introduced. This means that, nanofibers are coated on a rigid substrate to form a composite. However, one of the major challenges in the composite structure, is the good adhesion of the nanofibers to the substrate and the satisfactory durability of the nanofibers against bending and abrasion. Among the various methods available for the surface treatment, as a surface modification technique, Plasma treatment has introduced itself as a clean and environmentally friendly product, to overcome these problems [3]. In addition, different types of surface modifications can be easily designed by selecting the gas for the plasma production. Surface activation is achieved through plasma treatment, by replacing or adding chemical groups and so altering the surface's properties. Studies have shown, that by plasma, the polymer's surface can be made much more efficient and effective. Plasma polymers are composed of various active species, including free radicals and ions. The process is done without generating any environmental pollution [4]. The present study, aims to compare the filtration performance of the neat hybrid nanofibers consisting of polyacrylonitrile (PAN) polymer, the magnesium oxide (MgO) nanoparticles and plasma treated ones, in removing fine particles from the air stream.

METHODOLOGY

In order to fabricate the filter media containing the nanofiber layer, the nozzle-based solution electrospinning technique was applied. Materials used to prepare the electrospinning solution included: the polyacrylonitrile polymer (PAN), solvent N, N-dimethyl formamide (DMF) and magnesium oxide nanoparticles (MgO). They were purchased from Polyacryle Co. (Isfahan, Iran), Merck Co. (Darmstadt, Germany) and Merck Co., respectively. The concentration of PAN / MgO solution was 16٪ wt. in 3: 1 ratio in DMF solvent. Nanofibers were fabricated with nozzle solution electrospinning machine (Nano-Meghyas R&D Co, Iran) in the following conditions: Applied voltage: 20 kV, needle to drum collector distance: 10 cm, ambient temperature: 20-25 °C, electrospinning duration: 30 minutes, flow rate: 1 ml/h; Needle type: 18 gauge and the rotation speed of the drum: 500-1000 rpm. All electrospinning variables were selected based on the optimal

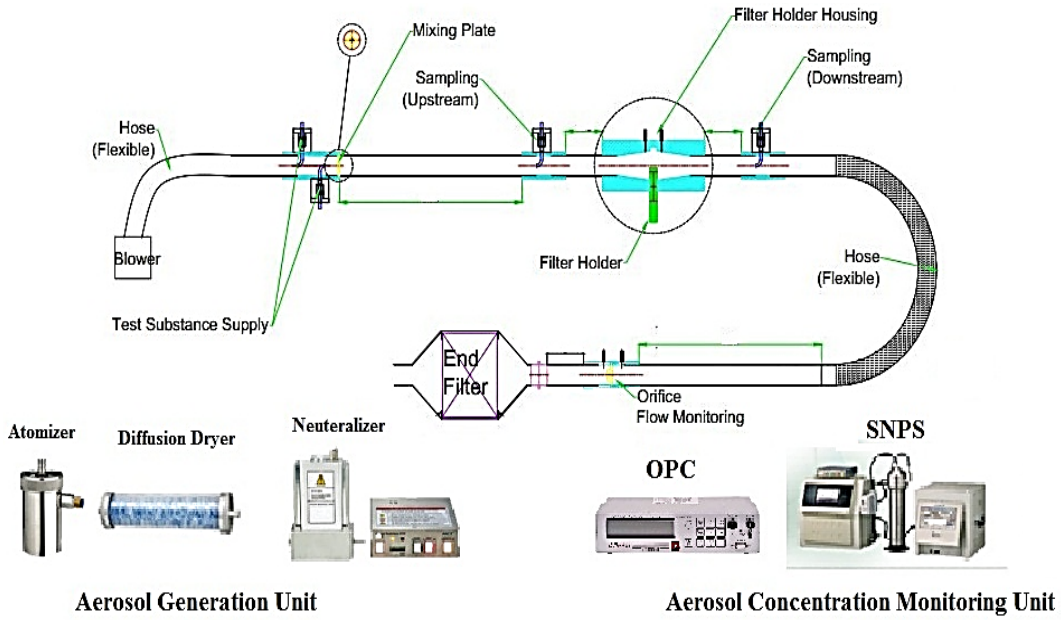


Fig. 1. Schematic diagram of the filter test rig [8]

[Downloaded from ioh.iums.ac.ir on 2026-11-18]

[DOI: 10.52547/ioh.18.1.45]

models in the author's previous studies. During the electrospinning process, the nanofibers were deposited on a polypropylene spun bond substrate, with a basis weight of 17 g/m^2, a filament diameter of 3.5 – 11.5 µm and a thickness of 100 µm.

For the plasma treatment, the substrate coated with PAN / MgO nanofiber layer was used. The samples were placed on the central plate, as a grounded negative electrode of a cold plasma device (manufactured by the Atomic Energy Organization of Iran) which acted as a cathode. The cathode electrode (15 cm in diameter) was located 5 cm away from the electrical-discharge electrode (10 cm in diameter as the anode), which was connected to the radio frequency (RF) generator. The surface of the samples were treated for 10 minutes, under cold plasma with the RF power supply (13.56 MHz with a power of 20 watts) with the argon gas and an operating pressure of 0.2 Tor.

Initial pressure drop and removal efficiency of particles less than 1000 nm, was measured according to the ISO 29463: 2011 standards [5] in the test rig (Fig. 1), which was designed based on ASHREA52.2: 2007[6]. The filter media was placed in a holder (open cross-sectional area of 28.26 cm^2) and then, the required air flow was set based on the test face velocity (10 cm/s). The filtration efficiency test was performed by injecting KCL particles, in the size ranges of 10 nm to 1000 nm in the test rig, by the HCT-Atomizer 4810-South Korea, and counting the filter media's particle's downstream and upstream by the Nanoparticle Scanning Spectrometer (SNPS) (HCT -SNPS-20N- South Korea) and Optical Particle Counter (OPC) (Grimm -1.109- Germany). Particles were emitted from the atomizer of the diffusion dryer (HCT-4920-South Korea) and neutralizer (HCT-XRC03 -South Korea) to remove moisture from the particles and neutralize their electrical charges, respectively. In the test rig, High-Efficiency Particulate Air filters (HEPA) were used to purify the inlet air and dilute the particle's concentration. Initial pressure drop was measured by the differential digital manometer and quality factors were determined for the produced media. Temperature and relative humidity of the test airflow were recorded. Seven samples were taken from the upstream and six samples from the downstream media (sampling time was two minutes and fifteen seconds at a time) and the results were recorded in the SNPS and OPC software systems. The results obtained from the counting the upstream and downstream were averaged and then the collection efficiency was calculated. It should be noted that at least 4 samples of each type of the media were tested for assessing the filtration performance. The calculation of Coefficient of the Variation (CV) and uncertainty of the results, was performed according to EN 779: 2012 standard [7]. All tests were performed in the temperature ranges of 20 to 25 °C, relative humidity of 25 to 50 ٪ and atmospheric pressure of about 1005 mbar. All the calculations and the graph's drawings were done with the help of Microsoft Excel 2010 software.

Using the Scanning Electron Microscopy (SEM) (Philips-XL 30-USA), the fiber morphology studies and fiber diameter determinations were performed. Elemental detection of the magnesium oxide nanoparticles in PAN/MgO nanofiber media was performed by Wavelength- dispersive X-ray spectroscopy (WDX). The X-Ray Diffraction (XRD) (STOE-STADIP 'Germany) was also used, to confirm the presence of magnesium oxide particles in the nanofibers. SEM image analysis algorithms were done through MathWorks software, Version 7 (MATLAB) to calculate the percentage of the media's porosity. Measurements of the media thickness was done by using a digital caliper (ASIMETO- 307-56-3 6" ABS- Hong Kong).

RESULT

Table (1) reveales the results for the mean initial efficiency, pressure drop and quality factors of the filter media, for 80 to 250 nm particles (according to the standard ISO 29463-3), as well as the mean overall efficiency for the particles below 1 micron, most penetrating particle size (MPPS) of the media and their quality factors for 100 and 300 nm particles. On average, the highest filtration efficiencies and the lowest pressure drops were obtained from neat and treated PAN/MgO media, respectively. However, the highest quality factors belongs to treated media; the efficiency of the particle collection was reduced by the plasma treatment. Indeed, with a significant reduction in the pressure drop of the treated media, it's quality factors eventually became more significant than that of neat media. The MPPS was 100 nm for both types of the media. It should be noted that, the CV and uncertainty results of less than 5-10٪ is considered as an acceptable and reiable result.

Dimensional characteristics of the studied fibers in neat and plasma-treated media, along with their size distribution and the corresponding SEM images are given in Table (2). In general, neat PAN / MgO nanofibers had smaller fiber diameters and the plasma treatment could lead to the increase in the fiber's diameter. The mean diameter of the substrate fibers were 22.37 ± 3.66 microns.

Structural characteristics of the neat and plasma-treated media, including their morphology, thickness, basis weight, and porosity are listed in Table (3). In cases where the ratio of the standard deviation of the fiber diameter to the mean diameter is less than 0.3, the morphological type is considered as a uniform and otherwise, a non-uniform. The studied media showed

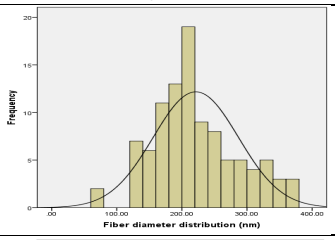
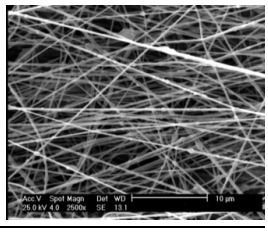
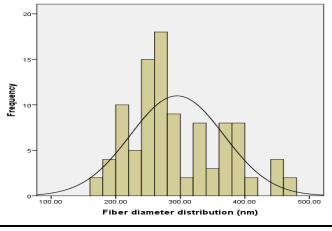
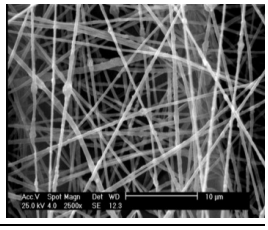
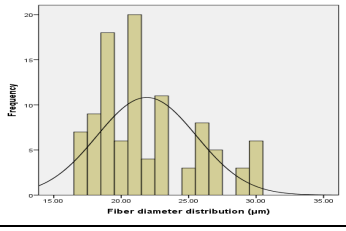
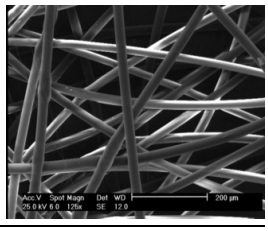
[Downloaded from ioh.iums.ac.ir on 2026-11-18]

[DOI: 10.52547/ioh.18.1.45]

Table 1. Results of filtration performance of the studied media in removal of particles below 1 micron.

Particle size (nm)	Parameter	Media	
		Neat	Treated
80	Mean (± SD) of initial efficiency (%)	82.75±2.64	53.43±2.12
	Uncertainty (%)	2.76	2.21
	Coefficient of variation (%)	3.19	3.96
100	Mean (± SD) of initial efficiency (%)	81.60±2.61	51.57±1.76
	Uncertainty (%)	2.73	1.84
	Coefficient of variation (%)	3.19	3.41
125	Mean (± SD) of initial efficiency (%)	83.07±2.35	53.51±1.52
	Uncertainty (%)	2.46	1.59
	Coefficient of variation (%)	2.82	2.84
160	Mean (± SD) of initial efficiency (%)	83.54±2.11	56.45±1.87
	Uncertainty (%)	2.21	1.96
	Coefficient of variation (%)	2.52	3.31
200	Mean (± SD) of initial efficiency (%)	86.87±1.47	63.30±1.16
	Uncertainty (%)	1.82	1.21
	Coefficient of variation (%)	2.00	1.83
250	Mean (± SD) of initial efficiency (%)	88.36±1.01	67.37±0.58
	Uncertainty (%)	1.05	0.84
	Coefficient of variation (%)	1.14	0.86
Mean initial efficiency for 80 to 250 nm particles (%)		88.36±2.28	57.61±6.19
Mean initial penetration for 80 to 250 nm particles (%)		15.64	42.39
Mean initial pressure drop (Pa)		78.22±3.11	22.00±2.23
Mean quality factor for 80 to 250 nm particles (Pa-1)		0.0237	0.0390
Mean initial efficiency for particles 300 nm		90.80±1.26	72.15±2.16
Mean quality factor (Pa-1) for particles 300 nm		0.0637	0.0305
Mean quality factor (Pa-1) for particles 100 nm		0.0329	0.0216
Mean initial efficiency for particles below 1000 nm		90.37±6.07	73.60±8.86
Most penetrating particle size (nm)		101.8	101.8

Table 2. Dimensional characteristics of the neat PAN / MgO nanofibers and the plasma treated ones.

Media	Descriptive Statistics		Histogram chart	SEM image
Neat	Mean fiber diameter (nm)	221.38		
	Standard deviation (nm)	65.56		
	Coefficient of variation	0.77		
Treated	Mean fiber diameter (nm)	295.07		
	Standard deviation (nm)	72.62		
	Coefficient of variation	1.08		
Substrate	Mean fiber diameter (nm)	22.37		
	Standard deviation (nm)	3.66		
	Coefficient of variation	0.16		

[Downloaded from ioh.iums.ac.ir on 2026-11-18]

[DOI: 10.52547/ioh.18.1.45]

Table 3. Structural characteristics of the neat PAN / MgO nanofibers and plasma treated ones.

Media	Morphology	Thickness of media (mm)	Basis weight of media (gsm)	Porosity (%)
Neat	Beaded*	0.115	17.58	41
Treated	Beaded	0.115	17.58	48

* Morphology of beaded fibers is obtained directly from SEM images.

slight differences, in the thickness and basis weight, while they had different conditions for porosity.

According to the XRD pattern, three reflection peaks corresponding to the pure MgO crystals appeared at $2\theta = 36.8^\circ$, $2\theta = 42.8^\circ$ and $2\theta = 62.2^\circ$, suggesting that the nanofibers contain pure MgO.

CONCLUSION

In terms of morphology, the neat PAN / MgO nanofibers had lower porosity and a higher packing density compared to the plasma-treated ones, which increased the air flow resistance of the media, reduced it's air permeability, and increased the pressure drop. Increased pressure drop of the neat PAN / MgO nanofibers compared to the treated ones, can also be due to the smaller diameter of their fibers. The plasma treatment, reduced the particle collection efficiency of the media. However, the quality factors of the treated media were generally higher than the neat one. The higher collection efficiency of the neat media can be attributed to their smaller diameter, higher packing density, and their beaded morphology. According to the classic filtration theory, the efficiency is directly related to the thickness and packing density of the media, and is inversely related to the fiber diameter and the porosity. Fibers with the smaller diameters have higher surface areas, higher packing densities and larger pore sizes, which results in an increased filtration capacity of the media. On the other hand, the fibers which are larger in diameter, are usually bulkier, more porous, and have a higher air permeability and a lower pressure drop.

Conventional microfiber media, have a minimum particle collection efficiency of 100 to 500 nanometers, called the Most Penetrating Particle Size (MPPS). Their efficiency can be increased by the use of nanofibers. For different types of media, the results of the MPPS showed that, the mean for the two different types of the media is the same; 101.8 nm .Various studies indicate that, lowering the fiber diameter and increasing the basis weight, causes the MPPS to move to a smaller size range, which is probably due to the obtained results. The mean difference in the fiber diameter, in both the neat and treated media, was not significant enough to cause a change in MPPS. In conclusion, the highest percentage of the filtration efficiency and the lowest pressure drop, were obtained from the neat and plasma-treated PAN / MgO media, respectively. However, the treated media had the highest quality factor. By performing plasma treatment, collection efficiency of the particles decreased, but with a significant decrease in the pressure drop, the treated media ultimately presented a higher score in quality factor than the neat one. Therefore, the plasma treatment can be a good option for surface modification of the filter media, although the definitive conclusion depends on additional tests such as, mechanical resistance of the media, adhesion of the layer and so on.

CONFLICT OF INTEREST

The authors declare that there are no conflicts of interest regarding the publication of this manuscript.

How to cite this article:
Farideh Golbabaei, Majid Habibi Mohraz, Rasoul Yarahmadi, Asghar Sadighzadeh, Hamzeh Mohammadi, Somayeh Farhang Dehghan. 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 (01 Feb);18:4.

[Downloaded from ioh.iums.ac.ir on 2026-11-18]

[DOI: 10.52547/ioh.18.1.45]

سلامت کار ایران
دوره ۱۸ - ۱/۱۴۰۰
مقاله پژوهشی
http://ioh.iums.ac.ir

مقایسه عملکرد فیلتراسیون نانوالیاف PAN/MgO ساده و پردازش شده با پلاسما در حذف ذرات ۱۰۰۰-۱۰ نانومتری از جریان هوا

فریده گل بابایی: استاد، گروه بهداشت حرفه‌ای، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی تهران، تهران، ایران.
مجید حبیبی محرز: استادیار، گروه مهندسی بهداشت حرفه‌ای، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی همدان.
رسول یاراحمدی: دانشیار، گروه بهداشت حرفه‌ای، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی ایران، تهران، ایران .
اصغر صدیق زاده: مرکز تحقیقات گداخت هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی، تهران، ایران.
حمزه محمدی: دانشجوی دکتری، گروه بهداشت حرفه‌ای، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی تهران، تهران، ایران.
سمیه فرهنگ دهقان: (* نویسنده مسئول) استادیار، ، مرکز تحقیقات کنترل عوامل زیان آور محیط و کار، دانشکده بهداشت و ایمنی، دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی، تهران، ایران . somayeh.farhang@gmail.com

چکیده

زمینه و هدف: نانو الیاف به خودی خود نرم و شکننده است و در تلاش برای حمایت خوب ساختاری، معمولاً بر روی یک زیرلایه سفت نشانده می شوند. با این حال، یکی از چالش‌های عمده در ساختارهای این چنینی، چسبندگی خوب لایه نانوالیاف بر روی زیرلایه است که در این خصوص پردازش پلاسما به عنوان یک روش پاک و سازگار با محیط زیست برای اصلاح سطح تلقی می‌گردد . مطالعه حاضر به مقایسه عملکرد فیلتراسیون نانوالیاف هیبریدی پلی آکریلونیتریل (PAN) و نانوذرات اکسید منیزیم (MgO) ساده و پردازش شده با پلاسما، در حذف ذرات ریز از جریان هوا می‌پردازد.

روش بررسی: *نانوالیاف از محلول ٪ 16 wt متشکل از پلیمر پلی آکریلونیتریل، نانوذرات اکسید منیزیم (با نسبت ۳:۱) و حلال N، N–دی متیل فرمامید توسط تکنیک الکتروریسی تولید گردید. سطح رویی بخش از نانوالیاف تولیدی تحت پردازش پلاسمای سرد با منبع تغذیه فرکانس رادیویی (۱۳/۵۶ مگاهرتز با توان ۲۰ وات) ، گاز تشکیل‌دهنده آرگون و فشار عملیاتی ۰/۲ تور قرار گرفتند. آزمون کارایی اولیه در حذف عددی ذرات، مطابق استاندارد ISO 29463 و EN 779 انجام گرفت . همچنین افت فشار و فاکتور کیفیت برای مدیاهای تولیدی تعیین گردید و با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)، مطالعات ریخت شناسی الیاف و تعیین قطر الیاف صورت پذیرفت . از الگوریتم‌های تجزیه و تحلیل تصاویر SEM از طریق نرم‌افزار MATLAB برای محاسبه درصد تخلخل مدیاها استفاده شد و به منظور تایید حضور نانوذرات اکسید منیزیم در نانوالیاف PAN/MgO الگوی پراش ایکس (XRD) از آنها تهیه گردید.

یافته ها: نانوالیاف PAN/MgO ساده از قطر الیاف (۶۵/۵۶±۲۲۱/۳۸ نانومتر) کوچکتری برخوردار بوده و انجام پردازش پلاسما باعث افزایش قطر الیاف (۷۲/۶۲±۲۹۵/۰۷ نانومتر) شده است. از نظر ریخت شناسی، هر دو نوع نانوالیاف دانه‌دار و میزان تخلخل سطحی نانوالیاف PAN/MgO ساده و پردازش شده به ترتیب ۴۱ و ۴۸ درصد می باشد. نتایج ارزیابی عملکرد مدیاهای تولیدی در حذف عددی ذرات نشان داد که میانگین کارایی اولیه مدیای ساده و پردازش شده به ترتیب ۶/۰۷±۹۰/۳۷ و ۸/۸۶±۷۳/۶۰ درصد برای جمع آوری ذرات ۱۰ تا ۱۰۰۰ نانومتری محاسبه گردیده است. حداقل میانگین کارایی (٪۸۱/۶۰) و حداکثر میانگین کارایی (٪۹۷/۸۹) مدیای ساده به ترتیب مربوط به سایز ذره ۱۰۱/۸ نانومتر و ۹۰۰ نانومتر بوده و حداقل میانگین کارایی (٪۵۱/۵۷) و حداکثر میانگین کارایی (٪۹۹/۲۵) مدیای پردازش شده به ترتیب مربوط به سایز ذره ۱۰۱/۸ نانومتر و ۹۰۰ نانومتر می باشد. میانگین افت فشار اولیه مدیای ساده و پردازش شده در سرعت سطحی آزمون به ترتیب ۳/۱۱±۷۸/۲۲ و ۲/۳۳±۲۲/۰۰ پاسکال و میانگین فاکتور کیفیت آنها برای جمع آوری ذرات ۱۰ تا ۱۰۰۰ نانومتری به ترتیب برابر ۰/۰۲۹ و ۰/۰۶۰ (پاسکال/۱) تعیین گشته است .

نتیجه گیری: به طور کلی، بیشترین درصد کارایی فیلتراسیون و کمترین میزان افت فشار به ترتیب برای مدیای PAN/ MgO ساده و پردازش شده، بدست آمد. با این حال بالاترین فاکتور کیفیت متعلق به مدیای پردازش شده می باشد. با انجام پردازش پلاسما اگرچه کارایی جمع آوری ذرات کاهش پیدا کرده ولی با کاهش چشمگیر افت فشار مدیا، در نهایت فاکتور کیفیت نسبت به مدیای ساده میزان قابل توجه‌تری را بدست می آورد.

تعارض منافع: گزارش نشده است.
منبع حمایت کننده: دانشگاه علوم پزشکی تهران.

کلیدواژه‌ها
فیلتراسیونپ
نانوالیاف
پردازش پلاسما
عملکرد
نانوذرات

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۴/۲۸
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۲/۱۴

شیوه استناد به این مقاله:
Farideh Golbabaei, Majid Habibi Mohraz, Rasoul Yarahmadi, Asghar Sadighzadeh, Hamzeh Mohammadi, Somayeh Farhang Dehghan. 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 (01 Feb);18:4.

*انتشار این مقاله به صورت دسترسی آزاد مطابق با CC BY-NC 4.0 صورت گرفته است

[Downloaded from ioh.iums.ac.ir on 2026-11-18]
[DOI: 10.52547/ioh.18.1.45]

مقدمه

امروزه تحقیقات گسترده‌ای در زمینه فناوری نانو در حال انجام است و روز به روز کاربردهای متنوعی از این فناوری در زمینه‌های مختلف زندگی و کار، برای انسان روشن می‌شود. در این خصوص نانوالیاف به عنوان نانو شیءای که با دو بعد خارجی مشابه، در مقیاس نانو و بعد سومی که به طور قابل توجهی بزرگتر است، دارای خواص و مشخصه‌هایی هستند که آنها را از سایر ساختارهای یک بعدی متمایز می‌سازد. نانو الیاف به علت خواص فیزیکی و شیمیایی بی نظیر و ویژگی‌های منحصر به فرد، در تحقیقات استفاده بسیاری دارند. نانوالیاف دامنه قطری بین ۱۰ تا ۱۰۰ نانومتر (و بعضاً تا ۵۰۰ نانومتر) دارند که این ویژگی باعث افزایش سطح مقطع ویژه و نسبت سطح به حجم آنها و همچنین انعطاف بالای سطوح و خواص مکانیکی عالی از قبیل استحکام کششی می‌گردد [۱]. شایان ذکر است که روش‌های مختلفی مانند طراحی، ساخت الگو، جداسازی فازی خود - مونتاژ و الکتروریسی، برای تولید نانوالیاف مورد استفاده قرار می‌گیرند. از بین روش‌های متداول تولید نانو الیاف، الکتروریسی روشی است که نتایج امیدوار کننده‌تری برای برنامه‌های کاربردی در فیلتراسیون داشته و به طور کلی لایه الکتروریسی شده قابلیت زیادی را برای بدام انداختن ذرات آئروسل از خود نشان می‌دهد [۲]. نانوالیاف پلیمری به طور فزاینده‌ای در زمینه‌های مختلف، با توجه به مساحت سطحی بزرگ خود در واحد جرم و پور سایز کوچک، مورد استفاده قرار می‌گیرند که غالباً بوسیله تکنیک الکتروریسی تولید می‌شوند [۳]. اختلاط نانوالیاف پلیمری با نانوذرات اکسید فلزی مانند MgO و اکسیدهای دیگر، توسط برخی از محققان برای کاربردهای تصفیه ی هوا مد نظر قرار گرفته است. این به خاطر توانایی‌های منحصر به فرد این نانوذرات برای پاکسازی انواع گسترده‌ای از گازهای سمی، مانند آلاینده‌های شیمیایی، آلاینده‌های بیولوژیکی (ویروس‌ها، باکتری‌ها)، آفت کش‌ها، و بسیاری دیگر می‌باشد [۴]. نانوالیاف هیبریدی (بطور مثال ترکیب پلیمر و نانوذرات) می‌توانند عملکردهای چندگانه در تصفیه همزمان آلاینده‌های ذره‌ای، بیولوژیکی و گازی از خود نشان دهند.

لایه نانولیفی الکتروریسی شده به خودی خود نرم و شکننده است و مدیاهایی که به طور کامل از نانوالیاف تشکیل شده باشند به دلیل افت فشار بالا در سراسر سطح خود، معمولاً به عنوان مدیای فیلتر هوا استفاده نمی‌شود. در تلاش برای حمایت خوب از ساختاری فاقده تغییر ویژگی نانوالیاف و جلوگیری از این افت فشار، مدیاهای نانولیفی نشانده شده (کامپوزیت) معرفی شده‌اند. یعنی نانوالیاف بر روی یک زیرلایه سفت و سخت نشانده شده تا یک کامپوزیت تشکیل گردد. به واسطه ی مدیای کامپوزیت، بازده فیلتراسیون بدون ایجاد تفاوت قابل توجهی در نفوذ پذیری آن بهبود می‌یابد [۵]. با این حال، یکی از چالش‌های عمده در ساختارهای کامپوزیت، چسبندگی خوب لایه نانوالیاف بر روی زیرلایه، و رسیدن به میزان دوام مورد رضایت، از لایه نانوالیاف در برابر خم شدگی و سایش در هنگام استفاده ی عملی می‌باشد. در میان روش‌های مختلفی که برای اصلاح سطحی آنها جهت غلبه بر این مشکل وجود دارد، پردازش پلاسما، خود را به عنوان یک روش پاک و سازگار با محیط زیست معرفی نموده است [۶]. در پردازش‌های شیمیایی، به عنوان روش‌های مرسوم و سنتی اصلاح سطحی، مقدار زیادی مواد شیمیایی و معرف مصرف می‌شوند که به طبع تاثیر نامطلوبی بر محیط زیست می‌گذارد. همچنین این پردازش ها ممکن است باعث کمتر شدن دوام مدیا گردد. رادیکالهای آزاد و الکترون‌هایی که در پردازش پلاسما ایجاد می‌شوند، می‌توانند برای تغییر شیمیایی سطح نانوالیاف پلیمری مورد استفاده قرار گیرند. اتصال کووالانسی از ترکیبات عملیاتی به سطح لیف، رویکردی ارجح با راندمانی بالا نسبت به ایجاد ویژگی‌ها دائمی است، علاوه بر این، انواع مختلف اصلاحات سطح به آسانی با انتخاب گاز برای تولید پلاسما قابل انجام است [۷]. فعال‌سازی سطح از طریق پردازش پلاسما، بواسطه تغییر ویژگی‌های سطح با جایگزینی یا افزودن گروه‌های شیمیایی صورت می پذیرد. مطالعات نشان داده‌اند که سطح پلیمر را می‌توان توسط پلاسمایی که از گونه‌های فعال مختلف از جمله رادیکال‌ها و یون‌های آزاد تشکیل شده است را، بدون القای هر گونه آلودگی زیست محیطی، بسیار کارآمد تر و موثرتر نمود. دو مزیت اصلی در استفاده از پردازش پلاسمای مواد پلیمری وجود دارد. یک مزیت این است که واکنش تنها بر روی سطح مواد، بدون تغییر خواص اولیه صورت می‌گیرد و دیگری این است که این امکان وجود دارد انواع مختلفی از پلاسما، مانند اکسیداتیو، احیایی و غیر فعال تولید شود [۷] [۸]. در مطالعه حاضر، عملکرد فیلتراسیون نانوالیاف هیبریدی پلی آکریلونیتریل (PAN) و نانوذرات اکسید منیزیم (MgO) ساده و پردازش شده با پلاسما، در حذف نانوذرات از جریان هوا مورد بررسی قرار گرفته است، تا از این طریق، امکان معرفی نسل جدیدی از مدیاها با قابلیت عملکرد بالا، فراهم گردد. در صورت عملکرد بالای نانوالیاف هیبریدی پردازش شده، می توان

[Downloaded from ioh.iums.ac.ir on 2026-11-18]

[DOI: 10.52547/ioh.18.1.45]

کاربرد های بالقوه آتی از آن را برای حذف همزمان ذرات و آلاینده های گازی و بیولوژیکی انتظار داشت.

روش کار

تولید نانوالیاف

به منظور ساخت مدیای حاوی لایه نانوالیاف، از تکنیک الکتروریسی محلول نازل دار استفاده گردید. مواد مورد استفاده برای تهیه محلول الکتروریسی شامل پلیمر پلی آکریلونیتریل (PAN)، حلال N، N-دی متیل فرمامید (DMF) و نانوذرات اکسید منیزیم (MgO) می باشند که از شرکت‌های پلی آکریل اصفهان و مرک آلمان تهیه گردیدند. غلظت محلول PAN/MgO ۱۶ درصد وزنی به نسبت ۳:۱در حلال DMF تهیه شده و محلول حاوی نانوذرات اکسید منیزیم برای ۲۰ ساعت توسط هیتر هم‌زن به منظور به دست آوردن محلول همگن، در دمای اتاق هم زده شد و سپس به منظور رسیدن به یک پراکندگی بهینه، به مدت ۲ ساعت در حمام اولتراسونیک قرار گرفتند [۹]. نانوالیاف با دستگاه الکتروریسی محلول نازل دار (شرکت فن آوران نانومقیاس، ایران) در شرایط ذیل به تولید رسیدند: ولتاژ کاربردی: ۲۰ کیلوولت ، فاصله سوزن تا صفحه جمع‌آوری کننده: ۱۰سانتیمتر، دما: ۲۵-۲۰ درجه سانتیگراد، مدت زمان: ۳۰ دقیقه، نرخ تزریق: ۱ میلی‌لیتر بر ساعت، قطر سوزن: گیج ۱۸، سرعت چرخش درام ۱۰۰۰- ۵۰۰ دور در دقیقه و سرعت روبش نازل ۳۰۰ میلی‌متر بر دقیقه. تمامی متغیرهای الکتروریسی بر اساس مدل‌های بهینه ی موجود در مطالعات پیشین نویسندگان انتخاب گردیدند [۹]. نانوالیاف حین فرایند الکتروریسی روی زیرلایه اسپان‌باند پلی‌پروپیلن با وزن مبنای (گراماژ) ۱۷ گرم بر مترمربع، قطر فیلامنت ۱۱/۵-۳/۵ میکرون و ضخامت ۱۰۰ میکرون نشانده می‌شوند. زیرا نانوالیاف الکتروریسی شده بسیار نرم و شکننده بوده و به راحتی می‌توانند با تماس ملایم آسیب ببینند، بنابراین به‌ندرت می‌توان آنها را به‌تنهایی به عنوان مدیای فیلتر هوا استفاده نمود. زیرلایه انتخابی مقاومت مکانیکی مناسب، قیمت ارزان، افت فشار و راندمان ناچیزی را داراست [۶].

پردازش پلاسما

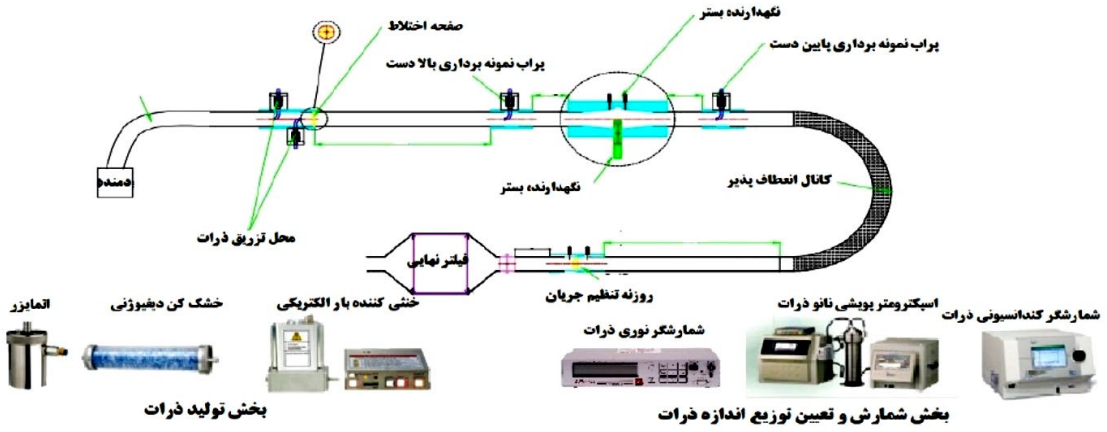
به منظور پردازش پلاسما، از زیرلایه پوشش داده شده با لایه نانوالیاف PAN/MgO استفاده می شود. نمونه‌ها بر روی صفحه مرکزی دستگاه پلاسمای نوع سرد (ساخت سازمان انرژی اتمی ایران) قرار گرفته و این صفحه به پتانسیل منفی وصل گردیده (متصل به زمین) و به عنوان کاتد عمل می کند. الکترود کاتد (با قطر ۱۵ سانتی‌متر) به فاصله ۵ سانتی متر از الکترود تخلیه الکتریکی (به قطر ۱۰ سانتی‌متر به عنوان آند) متصل به پتانسیل مثبت (مولد RF) قرار گرفته و سطح رویی نمونه‌ها به مدت ۱۰ دقیقه تحت پلاسمای سرد با منبع تغذیه فرکانس رادیویی (RF) (فرکانس ۱۳/۵۶ مگاهرتز با توان ۲۰ وات) با گاز تشکیل‌دهنده آرگون و فشار عملیاتی ۰/۲ تور مورد پردازش قرار گرفتند [۶].

تست عملکرد

افت فشار و کارایی اولیه حذف ذرات کمتر از ۱۰۰۰ نانومتر (۱ میکرون) مطابق استاندارد ISO 29463:2011 [۱۰] و EN 779:2012، در تونل تست طراحی شده (شکل ۱) مبتنی بر استاندارد ASHREA52.2: 2007 [۱۱]، در دانشگاه Hanyang کره جنوبی انجام گرفت. روش کار بدین صورت بود که مدیا پس از آماده سازی در هولدر (سطح مقطع باز دایره‌ای ۲۸/۲۶ سانتی متر مربع) قرار می گرفت و سپس جریان هوای مورد نیاز بر اساس سرعت سطحی مورد آزمون برقرار می‌گردید. این آزمون توسط تزریق ذرات KCL در رنج سایزی ۱۰ نانومتر تا ۱۰۰۰ نانومتر در تونل تست توسط دستگاه اسپری کننده ذرات تست (اتمایزر) (HCT-Atomizer 4810-South Korea) و شمارش ذرات در پایین دست و بالادست مدیای فیلتر، توسط دستگاه‌های طیف سنج (اسپکترومتر) روبشی نانوذرات (SNPS[1]) و شمارشگر نوری ذرات (OPC[2]) انجام می پذیرفت. ذرات خروجی از اتمایزر، از دستگاه های خشک کن انتشاری (دیفیوژنی) (HCT-4920-South Korea) و نوترولایزر (خنثی کننده) (HCT-XRC03 -South Korea) و به ترتیب به منظور حذف رطوبت ذرات، و خنثی شدن شارژ الکتریکی ذرات تولید شده، عبور می‌کردند. در تونل تست از فیلترهای با عملکرد بالا (هپا) به منظور تصفیه هوا و رقیق سازی غلظت ذرات استفاده شد. طیف سنج روبشی نانوذرات یک ایمپکتور، طبقه بندی کننده الکترواستاتیکی مجهز به ستون آنالیزگر افتراقی مبتنی بر تحرک پذیری الکتریکی ذره (DMA[3]) وصل شده به شمارشگر تراکمی ذرات (CPC[4]) (TSI Inc., Model 3022A, USA) بود. جریان هوای ورودی از طریق سیستم شمارش (SNPS و OPC) پایش می‌گردید تا تاثیر افت فشار ایجاد شده توسط مدیا

1 Scanning NanoParticle Spectrometer
2 Optical Particle Counter
3 Differential Mobility Analyzer
4 Condensation Particle Counter

[Downloaded from ioh.iums.ac.ir on 2026-11-18]
[DOI: 10.52547/ioh.18.1.45]



شکل ۱. طرح شماتیک ست آزمون عملکرد مدیای فیلتر مورد استفاده برای ذرات زیر ۱ میکرون [۱۲]

در دبی هوای ورودی بررسی و تنظیم گردد. درجه حرارت، رطوبت نسبی جریان هوای تست و افت فشار اولیه مدیا ثبت می‌گردید. سپس دبی هوای اسپری کننده (اتمایزر) با توجه به غلظت مورد نظر تنظیم می‌شد و پس از آن سیستم شمارش (SNPS و OPC) راه اندازی می‌گردید. هفت نمونه از بالادست و شش نمونه از پایین دست مدیا گرفته می‌شد (زمان نمونه برداری در هر بار دو دقیقه و پانزده ثانیه بود) و نتایج در سیستم نرم افزاری SNPS و OPC ثبت می‌گردید. نتایج نمونه برداری یا شمارش انجام شده در بالادست مدیا (قبل از نصب مدیا) پایش و در صورت مشاهده ناپایداری در غلظت آئروسل تولیدی سیستم، مجدداً مورد بررسی قرار می‌گرفت. از نتایج به دست آمده از شمارش‌های انجام شده در بالادست و پایین‌دست میانگین‌گیری کرده و سپس کارایی جمع‌آوری محاسبه می‌شد. تمامی محاسبات و رسم نمودارها با کمک نرم افزار Microsoft Excel 2010 صورت گرفت. لازم به ذکر است که از هر نوع مدیا حداقل ۴ نمونه مورد تست کارایی قرار گرفت [۱۰].

میزان نفوذ مدیا برابر با ۱ منهای کارایی است و از حاصل تقسیم تعداد ذرات بالادست به تعداد ذرات پایین دست بدست می‌آید. مدیاهایی نانولیفی دارای کارایی فیلتراسیون (E) بالا در افت فشار(ΔP) کم هستند. این دو جنبه معمولاً در پارامتری تحت عنوان فاکتور کیفیت (QF) ادغام می‌شوند که معیار شایستگی فیلتر را نشان می‌دهد و برای ارزشیابی عملکرد فیلتراسیون مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۳].

$$QF = -\frac{\ln(1-E)}{\Delta P} \qquad (۱)$$

تعیین مشخصات ساختاری

با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM[1]) (Philips- XL 30- USA)، مطالعات ریخت شناسی الیاف و تعیین قطر الیاف صورت گرفت [۱۴] و از طریق طیف سنجی تفکیک طول موج اشعه ایکس (WDX[2]) در میکروسکوپ SEM شناسایی عنصری نانوذرات اکسید منیزیم در مدیای نانوالیاف PAN/MgO صورت پذیرفت . همچنین به منظور تایید مجدد حضور نانوذرات اکسید منیزیم در نانوالیاف PAN/MgO الگوی پراش ایکس (XRD[3]) (STOE-STADIP' Germany) از آنها تهیه شد [۹]. ضخامت مدیا توسط کولیس (ASIMETO- 307-56-3 6" ABS- Hong Kong) تعیین گردید و از الگوریتم‌های تجزیه و تحلیل تصاویر SEM از طریق نرم‌افزار MATLAB (MathWorks,Version7) برای محاسبه درصد تخلخل مدیاها استفاده شد [۱۵].

نتایج

کلیه آزمون‌ها در رنج دمایی هوا ۲۰ تا ۲۵ درجه سانتیگراد، رطوبت نسبی ۲۵ تا ۵۰ درصد و فشار اتمسفر حدود ۱۰۰۵ میلی‌بار گرفت. نتایج آزمون افت فشار اولیه برای نانوالیاف PAN/MgO در دو وضعیت، با پردازش پلاسما و بدون پردازش پلاسما در جدول ۱ آورده شده است. همان طور که از جدول ۱ مشخص است انجام پردازش پلاسما موجب کاهش افت فشار مدیا شده است.

جدول ۲ نتایج مربوط به میانگین کارایی اولیه، میزان نفوذ و فاکتور کیفیت مدیاهای فیلتر برای ذرات ۸۰ تا ۲۵۰ نانومتری (مطابق استاندارد ISO 29463-3) و

1 Scanning Electron Microscope
2 Wavelength-dispersive X-ray spectroscopy
3 X-ray Diffraction Spectroscopy

[Downloaded from ioh.iums.ac.ir on 2026-11-18]

[DOI: 10.52547/ioh.18.1.45]

جدول ۱. افت فشار اولیه مدیاهای حاوی نانوالیاف PAN/ MgO (میانگین± انحراف معیار)

نوع پردازش	افت فشار (پاسکال) بر حسب درصد گذر حجمی مورد آزمون			
	۵۰٪	۷۵٪	۱۰۰٪	۱۲۵٪
بدون پردازش	۴۲/۲±۰۰/۱۸	۵۸/۳±۳۶/۰۵	۷۸/۳±۲۲/۱۱	۱۰۲/۲±۳۴/۱۷
تحت پردازش پلاسما	۱۴/۲±۱۴/۱۰	۱۸/۱±۳۱/۹۳	۲۲/۲±۰۰/۲۳	۲۸/۱±۷۱/۰۹

جدول ۲. نتایج عملکرد مدیاهای حاوی نانوالیاف PAN/ MgO برای حذف ذرات زیر ۱ میکرون

اندازه ذره (nm)	پارامتر	نمونه	
		بدون پردازش	با پردازش پلاسما
۸۰	میانگین (± انحراف معیار) کارایی اولیه (Ei) (٪)	۸۲/۷۵	۵۳/۴۳
		۲±/۶۴	۲±/۱۲
	عدم قطعیت (U) (٪)	۲/۷۶	۲/۲۱
	درصد ضریب تغییرات (CV)	۳/۱۹	۳/۹۶
۱۰۰	میانگین (± انحراف معیار) کارایی اولیه (Ei) (٪)	۸۱/۶۰	۵۱/۵۷
		۲±/۶۱	۱±/۷۶
	عدم قطعیت (U) (٪)	۲/۷۳	۱/۸۴
	درصد ضریب تغییرات (CV)	۳/۱۹	۳/۴۱
۱۲۵	میانگین (± انحراف معیار) کارایی اولیه (Ei) (٪)	۸۳/۰۷	۵۳/۵۱
		۲±/۳۵	۱±/۵۲
	عدم قطعیت (U) (٪)	۲/۴۶	۱/۵۹
	درصد ضریب تغییرات (CV)	۲/۸۲	۲/۸۴
۱۶۰	میانگین (± انحراف معیار) کارایی اولیه (Ei) (٪)	۸۳/۵۴	۵۶/۴۵
		۲±/۱۱	۱±/۸۷
	عدم قطعیت (U) (٪)	۲/۲۱	۱/۹۶
	درصد ضریب تغییرات (CV)	۲/۵۲	۳/۳۱
۲۰۰	میانگین (± انحراف معیار) کارایی اولیه (Ei) (٪)	۸۶/۸۷	۶۳/۳۰
		۱±/۷۴	۱±/۱۶
	عدم قطعیت (U) (٪)	۱/۸۲	۱/۲۱
	درصد ضریب تغییرات (CV)	۲/۰۰	۱/۸۳
۲۵۰	میانگین (± انحراف معیار) کارایی اولیه (Ei) (٪)	۸۸/۳۶	۶۷/۳۷
		۱±/۰۱	۰±/۵۸
	عدم قطعیت (U) (٪)	۱/۰۵	۶۰/۸۴
	درصد ضریب تغییرات (CV)	۱/۱۴	۰/۸۶
	میانگین کارایی اولیه برای ذرات ۸۰ تا ۲۵۰ nm (٪)	۸۴/۳۶	۵۷/۶۱
		۲±/۲۸	۶±/۱۹
	میانگین نفوذ اولیه برای ذرات ۸۰ تا ۲۵۰ nm (٪)	۱۵/۶۴	۴۲/۳۹
	میانگین افت فشار اولیه (Pa)	۷۸/۲۲	۲۲/۰۰
		۳±/۱۱	۲±/۲۳
	میانگین فاکتور کیفیت برای ذرات ۸۰ تا ۲۵۰nm (Pa^{-1})	۰/۰۲۳۷	۰/۰۳۹۰
	میانگین کارایی اولیه برای ذرات ۳۰۰nm	۹۰/۸۰	۷۲/۱۵
		۱±/۲۶	۲±/۱۶
	میانگین فاکتور کیفیت (Pa^{-1}) در ۳۰۰nm	۰/۰۳۰۵	۰/۰۶۳۷
	میانگین فاکتور کیفیت (Pa^{-1}) در ۱۰۰nm	۰/۰۲۱۶	۰/۰۳۲۹
	میانگین کارایی اولیه برای ذرات زیر ۱۰۰۰nm	۹۰/۳۷	۷۳/۶۰
		۶±/۰۷	۸±/۸۶
	اندازه ذره (nm) با بیشترین میزان نفوذ (MPPS)	۱۰۱/۸	۱۰۱/۸

[Downloaded from ioh.iums.ac.ir on 2026-11-18]

[DOI: 10.52547/ioh.18.1.45]

همچنین میانگین کارایی کل برای ذرات زیر ۱ میکرون و اندازه ذره با بیشترین میزان نفوذ (MPPS[1]) در مدیا و همچنین فاکتور کیفیت آن‌ها برای ذرات ۱۰۰ و ۳۰۰ نانومتری را نشان می‌دهد. به طور میانگین، بیشترین درصد کارایی فیلتراسیون و کمترین میزان افت فشار به ترتیب برای مدیای PAN/ MgO ساده و پردازش شده بدست آمد. با این حال بالاترین فاکتور کیفیت متعلق به مدیای پردازش شده بود. با انجام پردازش پلاسما اگرچه کارایی جمع آوری ذرات کاهش پیدا کرد ولی با کاهش چشمگیر افت فشار مدیا، در نهایت فاکتور کیفیت نسبت به مدیای ساده میزان بسیار چشمگیری را بدست آورد. اندازه ذره با بیشترین میزان نفوذ برای انواع مدیاها حدود ۱۰۰ نانومتر بود. لازم به ذکر است ضریب تغییرات و عدم قطعیت کمتر از ۱۰ -۵٪ نشان دهنده نتایج قابل قبول است [۱۶].

شکل ۲ میانگین کارایی و فاکتور کیفیت مدیاهای مورد بررسی را در اندازه ذرات مختلف نشان می‌دهند. میانگین کارایی مدیای PAN/MgO برای ذرات ۱۰ تا ۱۰۰ نانومتر به تدریج روند نزولی داشته و بعد از ۱۰۰ نانومتر، درصد کارایی رو به افزایش می رود. حداقل میانگین کارایی (۸۱/۶۰٪) و حداکثر میانگین کارایی (۹۷/۸۹٪) این مدیا به ترتیب مربوط به سایز ذره ۱۰۱/۸ نانومتر و ۹۰۰ نانومتر می باشد. مدیای PAN/MgO برای ذرات با رنج سایزی ۱۰ تا ۲۰ نانومتر کارایی مشابه با ذرات با سایز بزرگتر به طور مثال ۴۰۰ تا ۹۰۰ نانومتر از خود نشان می دهد. میانگین کارایی مدیای PAN/MgO پردازش شده با پلاسما، برای ذرات ۱۰ تا ۱۰۰ نانومتر به تدریج روند نزولی داشته و بعد از آن، میانگین کارایی افزایش می یابد. حداقل میانگین کارایی (۵۱/۵۷٪) و حداکثر میانگین کارایی (۹۹/۲۵٪) این مدیا به ترتیب مربوط به سایز ذره ۱۰۱/۸ نانومتر و ۹۰۰ نانومتراست. مدیای PAN/MgO پردازش شده با پلاسما برای ذرات با رنج سایزی ۱۰ تا ۱۵ نانومتر، کارایی مشابه ذرات با سایز بزرگتر به طور مثال ۴۲۵ تا ۹۰۰ نانومتر را از خود نشان می دهد. طبق نتایج حاصل از این تحقیق ، انجام پردازش پلاسما باعث کاهش درصد کارایی و از طریق کاهش قابل توجه افت فشار، منجر به افزایش فاکتور کیفیت مدیا گردیده است. به طور کلی، درصد کارایی عمدتاً در رنج سایزی ۲۰ تا ۲۹۰ نانومتر، و فاکتور کیفیت در رنج‌های سایزی ۱۰ تا ۴۰ نانومتر و ۲۹۰ تا ۱۰۰۰ نانومتر در دو حالت ساده و با پردازش پلاسما، دارای اختلاف فاحش‌تری می باشند.

منحنی عملکرد فیلتراسیون زیرلایه و مقایسه کارایی فیلتراسیون آن با حالت پوشش داده شده با نانوالیاف PAN/MgO به ترتیب در اشکال ۳ و ۴ نشان داده شده است. این زیرلایه بالاترین درصد کارایی (۴۰/۱۱) و کمترین درصد کارایی (۰/۲۳) را به ترتیب برای ذرات ۱۰/۶ نانومتر و ۱۸۷/۷ نانومتر را داراست. میانگین کلی کارایی آن برای ذرات زیر ۱ میکرون، ذرات ۱۰۰ نانومتری و ذرات ۳۰۰ نانومتری، به ترتیب برابر ۷/۸۹، ۱/۷۲ و ۱/۸۵ درصد می باشد. به طور کلی درصد کارایی آن برای ذرات بزرگتر از ۳۳ نانومتر، کمتر از ۶٪ است . به طور کلی با افزایش سایز ذرات، درصد کارایی روند کاهشی داشته و درصد کارایی آن برای ذرات بزرگتر از ۳۳ نانومتر، کمتر از ۶٪می باشد. این زیرلایه بعد از کوت شدن ۳۰ دقیقه‌ای با نانوالیاف PAN/MgO حدود ۵۷/۴۲ تا ۹۷/۲۸درصد افزایش کارایی فیلتراسیون را از خود نشان داده و دیگر روند نزولی درصد کارایی زیرلایه بر حسب سایز ذره، بعد از پوشش دهی نانوالیاف، دیده نمی شود. شکل۵، تصویر SEM از زیرلایه و لایه نانوالیاف PAN/MgO پوشش داده شده بر روی آن را به نمایش گذاشته است.

مشخصات ابعادی انواع الیاف مورد بررسی در مدیاهای بدون پردازش و با پردازش پلاسما، به همراه توزیع سایزی آن‌ها و تصاویر SEM مربوطه در جدول ۳ آمده است. بطور کلی نانوالیاف PAN/MgO ساده از قطر الیاف کوچکتری برخوردار بوده و انجام پردازش پلاسما باعث افزایش قطر الیاف گردیده است. میانگین قطر الیاف زیرلایه برابر ۲۲/۳۷±۳/۶۶ میکرون می باشد.

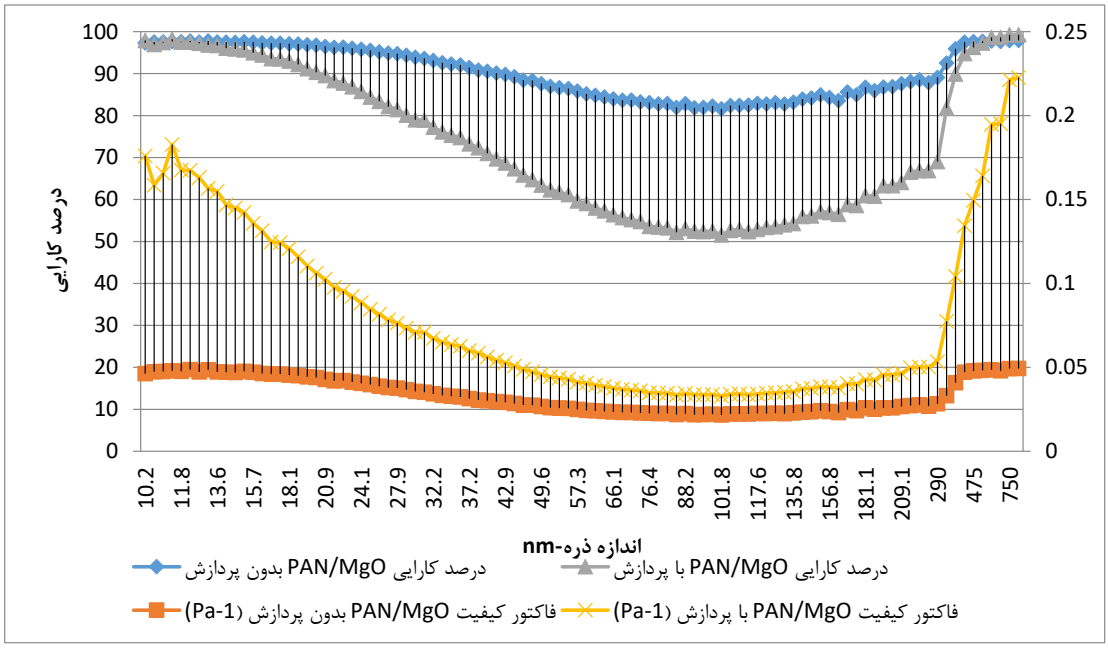
ویژگی‌های ساختاری انواع مدیاهای بدون پردازش و با پردازش پلاسما، شامل نوع ریخت شناسی، ضخامت، وزن مبنا و درصد تخلخل در جدول ۴ ذکر شده است. در مواردی که نسبت انحراف معیار قطر لیف به میانگین قطر، کمتر از ۰/۳ باشد، نوع ریخت شناسی یکنواخت و در غیر اینصورت غیر یکنواخت در نظر گرفته می‌شود [۱۳]. مدیاهای مورد بررسی تفاوت جزئی در ضخامت و وزن مبنا از خود نشان می دهند، در حالیکه در مورد تخلخل شرایط متفاوتی داشتند.

روش طیف سنجی تفکیک طول موج اشعه ایکس (WDX) در میکروسکوپ SEM، بر اساس شناسایی عنصری نانوذرات اکسید منیزیم در مدیای نانوالیاف PAN/ MgO مطابق شکل ۶ صورت گرفته است. نقاط سفید رنگ نقشه حضور ذرات اکسید منیزیم را در نمونه مورد بررسی نشان می‌دهند. همچنین به منظور تایید مجدد حضور نانوذرات اکسید منیزیم در نانوالیاف PAN/MgO، الگوی

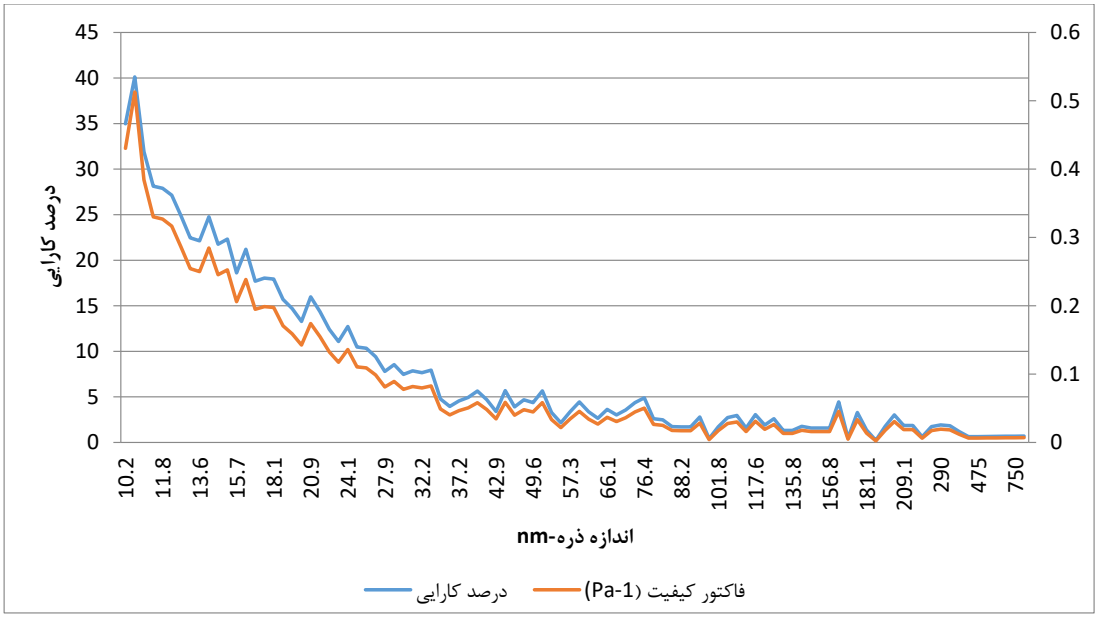
1 Most Penetration Particle Size

[Downloaded from ioh.iums.ac.ir on 2026-11-18]

[DOI: 10.52547/ioh.18.1.45]



شکل ۲. مقایسه میانگین کارایی و فاکتور کیفیت مدیای PAN/MgO ساده و با پردازش پلاسما



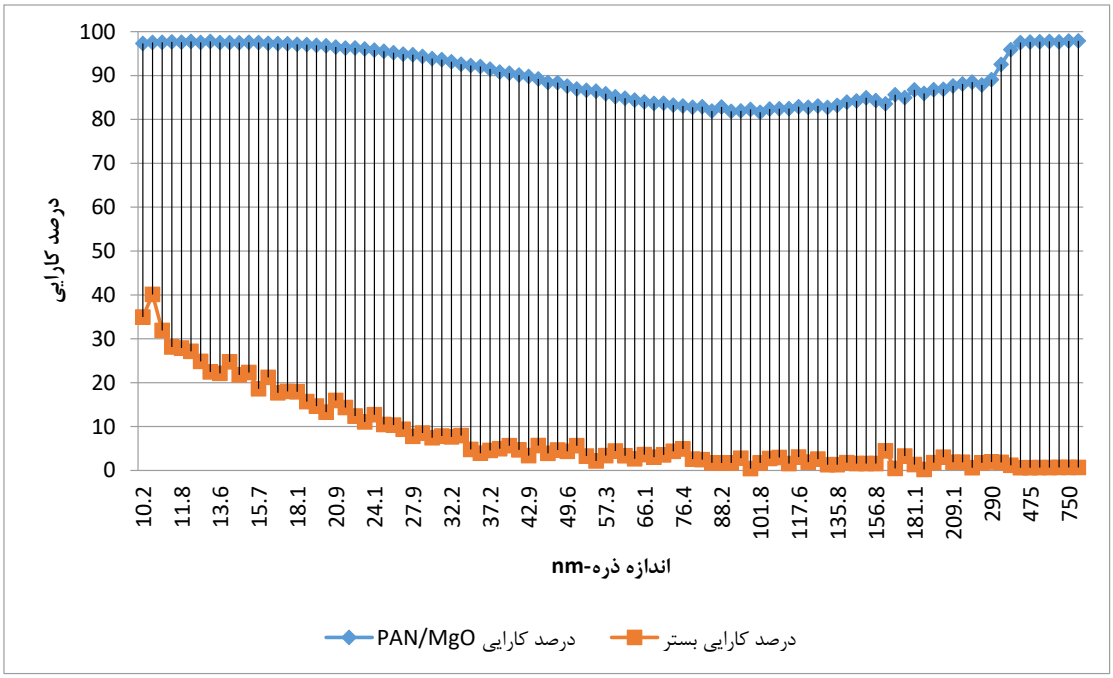
شکل ۳. منحنی عملکرد فیلتراسیون زیرلایه (افت فشار= ۱پاسکال)

پراش ایکس (XRD) نیز از آن تهیه شده است (شکل ۷). سه پیک انعکاسی متناظر با کریستال MgO خالص که در $2\theta = 36.8^{\circ}$، $2\theta = 42.8^{\circ}$ و $2\theta = 62.2^{\circ}$ ظاهر شدند، نشان می‌دهند که نانوالیاف الکتروریسی شده PAN/MgO حاوی کریستال MgO خالص می‌باشند [۱۷].

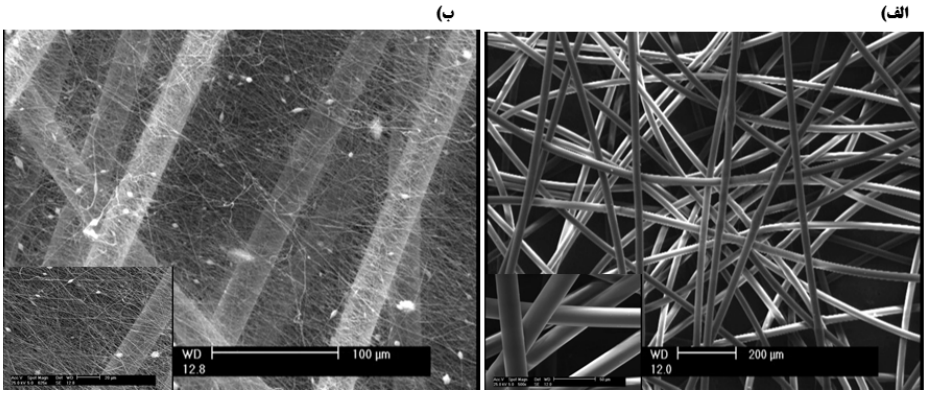
بحث

از نظر ریخت شناسی، نانوالیاف PAN/MgO ساده از تخلخل کمتر و تراکم و فشردگی الیاف بیشتری نسبت به نوع پردازش شده با پلاسما برخوردار هستند، که همین موضوع باعث افزایش مقاومت مدیا در برابر عبور

[Downloaded from ioh.iums.ac.ir on 2026-11-18]
[DOI: 10.52547/ioh.18.1.45]



شکل ۴. مقایسه کارایی فیلتراسیون زیرلایه (بستر) و زیرلایه پوشش داده شده با نانوالیاف PAN/MgO



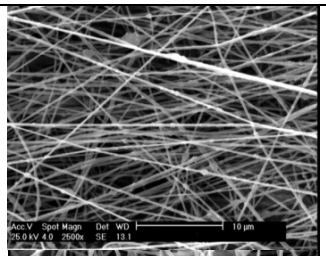
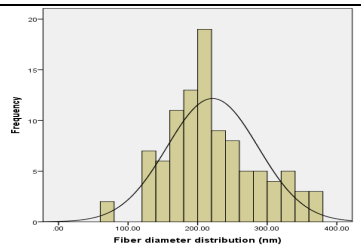
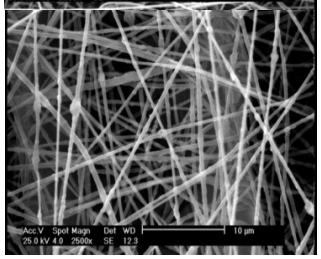
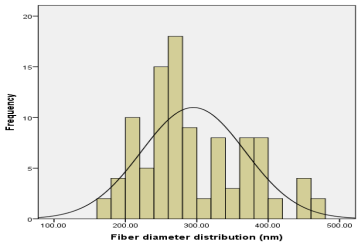
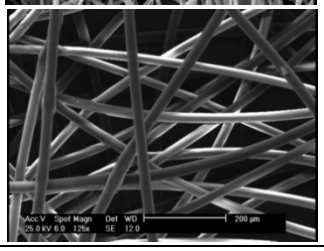
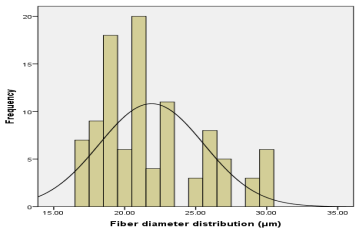
شکل ۵. تصویر SEM از زیرلایه (الف) و لایه نانوالیاف PAN/MgOپوشش داده شده بر روی آن (ب)

هوا، کاهش نفوذپذیری آن و افزایش افت فشار شده است (جداول ۱ و ۴) [۱۹]. افزایش افت فشار مدیاهای حاوی نانوالیاف PAN/MgO ساده نسبت به پردازش شده می‌تواند ناشی از کوچکتر بودن قطر الیاف آن‌ها نیز باشد (جدول ۳). طبق تئوری کلاسیک فیلتراسیون، افت فشار در رژیم جریان پیوسته، رابطه معکوس با مجذور قطر لیف دارد، با این حال میزان افزایش افت فشار با کاهش قطر نانو الیاف بعلت اثر لغزشی، دارای شیب کمتری است [۲۰]. مطالعه براون (Brown) نشان می‌دهد در فشردگی ثابتی از نانوالیاف، افزایش افت فشار با کاهش قطر لیف حتی در رژیم لغزشی دیده می‌شود [۲۱].این موضوع به خوبی اثبات شده است که رژیم لغزشی به هنگام عبور هوا در اطراف نانولیف رخ می‌دهد. این بدان علت است که قطر لیف، نزدیک اندازه میانگین فاصله آزاد مولکول‌های گاز (بطور مثال ۶۵ نانومتر برای هوا در شرایط دمایی و فشار نرمال) می‌باشد. در یک جریان لغزشی، سرعت هوا در سطح لیف غیر صفر فرض می‌گردد [۲۲]. افت فشار یک مدیای فیلتر، نسبت به به قطر حفره بسیار حساس است، زیرا سرعت بینابینی[1] در یک مدیا، رابطه عکس با مجذور

1 Interstitial velocity

[Downloaded from ioh.iums.ac.ir on 2026-11-18]
[DOI: 10.52547/ioh.18.1.45]

جدول ۳. مشخصات ابعادی نانوالیاف PAN/MgO ساده و با پردازش پلاسما

مدیا	آمار توصیفی		تصویر SEM	نمودار هیستوگرام
نانوالیاف PAN/MgO ساده	میانگین قطر الیاف(nm)	۲۲۱/۳۸		
	انحراف معیار (nm)	۶۵/۵۶		
	ضریب تغییرات	۰/۷۷		
نانوالیاف PAN/MgO تحت پردازش پلاسما	میانگین قطر الیاف(nm)	۲۹۵/۰۷		
	انحراف معیار (nm)	۷۲/۶۲		
	ضریب تغییرات	۱/۰۸		
زیر لایه	میانگین قطر الیاف(µm)	۲۲/۳۷		
	انحراف معیار (µm)	۳/۶۶		
	ضریب تغییرات	۰/۱۶		

جدول ۴. مشخصات ساختاری انواع مدیای بدون پردازش و با پردازش پلاسما

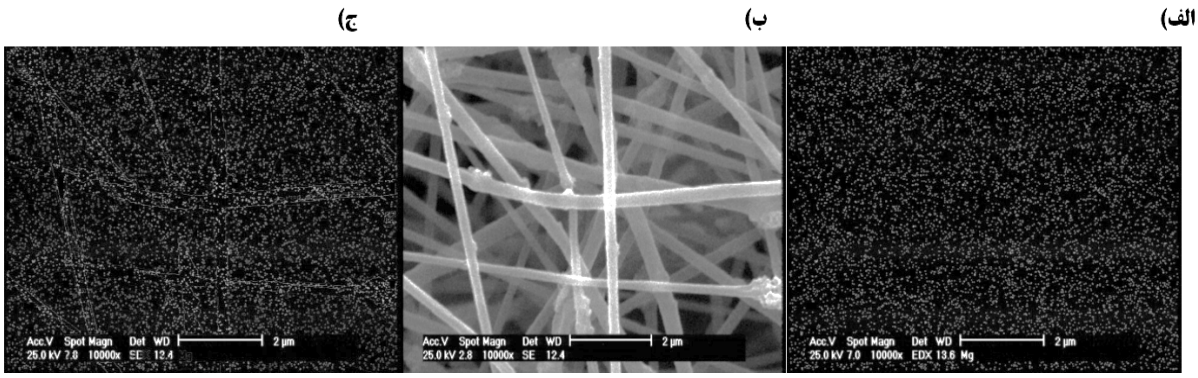
مدیا	ریخت شناسی نانوالیاف	ضخامت مدیا (میلی‌متر)	وزن مبنا مدیا (گرم بر مترمربع)	تخلخل (درصد)
ساده	دانه دار*	۰/۱۱۵	۱۷/۵۸	۴۱
پردازش پلاسما	دانه دار	۰/۱۱۵	۱۷/۵۸	۴۸

* مورفولوژی الیاف دانه دار (Bead) مستقیماً از تصاویر SEM به دست آمده است.

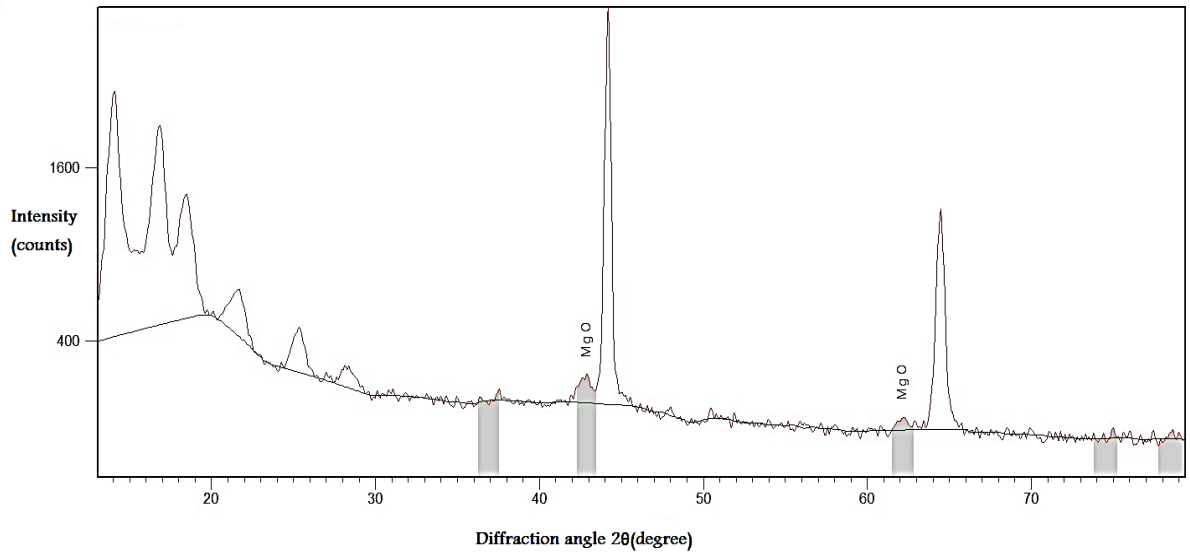
قطر حفره دارد [۲۳]. انجام پردازش پلاسما می‌تواند از طریق تخریب توده‌ها و ایجاد برآمدگی‌های یکنواخت در سطح، منجر به شکل‌گیری سطحی یکنواخت‌تر و صاف‌تر گردد [۲۴] [۲۵] و طبق نتایج این مطالعه، پردازش پلاسما، قطر الیاف (جدول۳) و میزان تخلخل مدیا (جدول ۴) را افزایش داده است. از این رو منجر به کاهش افت فشار گردیده است. وانگ (Wang) و همکارانش (۲۰۱۴) نشان دادند که با افزایش غلظت محلول الکتروریسی PAN از ۷ تا ۱۳٪ و در نتیجه افزایش میانگین قطر الیاف از ۱۷۵ نانومتر تا ۵۵۸ نانومتر، درصد کارایی فیلتراسیون از ۹۸/۸۹ تا ۴۰/۸۰ درصد کاهش یافت، که این امر را به افزایش پورسایز ممبران‌های لیفی نسبت می دهند. در این شرایط، افت فشار از ۵۳ تا ۳ پاسکال کاهش یافت و فاکتور کیفیت مدیاها در نهایت از ۰/۰۸۶ به ۰/۱۷۵ افزایش پیدا کرد. آنها قطر نانوالیاف و فشردگی الیاف را با تاثیر مستقیم بر افت فشار و فاکتور کیفیت مدیا، به عنوان پارامترهای تجاری و عوامل مهمی در به صرفه بودن اقتصادی مدیا برای مشتریان معرفی کردند [۲۶].

انجام پردازش پلاسما، کارایی جمع آوری ذرات را کاهش می دهد، اگرچه فاکتور کیفیت مدیای پردازش شده در مجموع بالاتر از نوع ساده ی آن می باشد. کارایی جمع آوری بیشتر مدیای PAN/MgO ساده را می‌توان به کوچکتر بودن قطر آن‌ها، فشردگی الیاف بیشتر و مورفولوژی دانه‌دار آن‌ها نسبت داد. طبق تئوری کلاسیک فیلتراسیون، میزان کارایی، رابطه مستقیم با ضخامت مدیا، فشردگی الیاف و همچنین رابطه عکس با قطر لیف

[Downloaded from ioh.iums.ac.ir on 2026-11-18]
[DOI: 10.52547/ioh.18.1.45]



شکل ۶. نقشه عنصری نانوذرات اکسید منیزیم (الف)، تصویر SEM نانوالیاف PAN/MgO (ب) و نقشه عنصری نانوذرات اکسید منیزیم به همراه تصویر نانوالیاف PAN/MgO (ج) [۱۸]



شکل ۷. الگوی پراش ایکس (XRD) مدیای حاوی نانوالیاف PAN/MgO [۱۸]

و میزان تخلخل دارد [۲۰]. الیاف با قطر کوچکتر دارای مساحت رویه بیشتر، تراکم و چگالی بالاتر و سایز حفره کوچکتر می باشند که در نتیجه قابلیت فیلتراسیون مدیا را افزایش می‌دهند[۲۷]. در حالیکه الیاف با قطر بزرگتر معمولاً حجیم‌تر، متخلخل‌تر و با نفوذپذیری هوای بالاتر و افت فشار کمتری همراه هستند [۲۸].

در مطالعه‌ای به این نتیجه رسیدند که افزایش فشردگی نانوالیاف، منجر به افزایش درصد کارایی و افت فشار می‌گردد و این موضوع را به علت افزایش بخش جامد لایه نانولیفی و کاهش حجم حفرها و در نتیجه افزایش سطح فیلتراسیون داستند [۲۰]. در این مطالعه نشان داده شد که، درصد کارایی فیلتراسیون نانوالیاف با دانسیته فشردگی ۰/۱۳۴ در حذف ذرات ۰/۳ میکرونی، نسبت به نمونه‌ای با دانسیته فشردگی ۰/۰۵۹، حدود دو برابر بیشتر و افت فشار حدود ۳/۸ برابر بالاتر است. با این حال، فاکتور کیفیت آن به رغم کارایی فیلتراسیون دو برابری کمتر می‌شود [۲۰]. 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 به سطح لیف حرکت می‌کنند و این چنین شانس ربایش آن‌ها از طریق برخورد مستقیم افزایش می‌یابد. فاکتور کیفیت، نسبتی بین کارایی و افت فشار می باشد و به طور کلی مطلوب است که یک فیلتر، کارایی بالا و افت فشار پایین داشته باشد، بنابراین فاکتور کیفیت بالاتر، نشان دهنده عملکرد بهتر فیلتر است. الیاف PAN با دو ویژگی محکم و سخت مشخص می‌شوند [۲۹]، و به

[Downloaded from ioh.iums.ac.ir on 2026-11-18]
[DOI: 10.52547/ioh.18.1.45]

همین دلیل است که می‌توانند گزینه خوبی برای کاربرد در فیلتراسیون هوا باشند و مطالعات مختلف نیز عملکرد فیلتراسیون خوبی را از آن نشان داده است [۳۰]. عملکرد خوب الیاف PAN می‌تواند از طریق تخلخل مناسب آن [۳۱] [۳۲]، الیاف تراز و یکنواخت و جهت دار و با توزیع قطری باریک توجیه شود [۳۳, ۳۴]. اگرچه حضور الیاف دانه‌دار از نظر ریخت شناسی، کمی چالش برانگیز است، ولیکن کآور (Kaur) و همکارانش حضور دانه را در الیاف، باعث افزایش کارایی فیلتراسیون دانست، زیرا آن‌ها با تاثیر بر روی فشردگی نانوالیاف و کاهش پورسایز می‌توانستند شرایط فیلتراسیون بهتری را فراهم نمایند [۳۵]. با این حال، Yun و همکاران (۲۰۱۰) دریافتند که مدیاهای PAN با نانوالیاف حاوی گره، در مقایسه با الیاف فاقد گره، دارای افت فشار کمتر و در نتیجه فاکتور کیفیت بالاتری هستند [۳۶]. به علت کمبود مطالعات کافی در این زمینه، نتیجه گیری قطعی مشکل خواهد بود. دانه‌ها در الیاف باعث ایجاد جداسازی فیزیکی لایه‌های نانولیفی وافزایش فاصله بین نانوالیاف می‌شوند، همچنین نفوذپذیری هوا و عملکرد فیتراسیون را بهبود می‌بخشند [۳۶].

مدیاهای میکرولیفی معمول، دارای حداقل کارایی جمع آوری ذرات در رنج سایزی ۱۰۰ تا ۵۰۰ نانومتر هستند که MPPS نامیده می‌شود و این کارایی می‌تواند با استفاده از نانوالیاف افزایش یابد. نتایج بررسی اندازه ذره با بیشترین میزان نفوذ (MPPS) برای انواع مدیا (جدول ۲) نشان می دهد که متوسط این مقدار برای انوع مدیاها ی ۱۰۱/۸ نانومتر است. مطالعات مختلف نشان می‌دهند که کاهش قطر لیف و افزایش وزن مبنا، باعث انتقال MPPS به رنج سایزی کوچکتر می‌شود [۲۰] [۳۷]. با توجه به نتایج بدست آمده در مطالعه حاضر ، اختلاف میانگین قطر الیاف در دو حالت ساده و پردازش شده به اندازه‌ای قابل توجه نبوده است که باعث تغییر در MPPS آنها گردد. پودگورسکی (Podgórski) و همکاران (۲۰۰۶) نیز از دو طریق آزمایشگاهی و تئوریکی تاکید کردند که در فیلترهای نانولیفی بعلت قطر کوچک الیاف‌شان، پارامتر «بانفوذترین سایز ذره» (MPPS) به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد [۳۸]. لئونگ (Leung) و همکارانش نشان دادند که کوتینگ (پوشش دهی با) نانوالیاف باعث افزایش کارایی زیرلایه میکرولیفی می‌شود و همچنین MPPS را تا زیر ۱۴۰ نانومتر کاهش می‌دهد [۳۷].

نتیجه گیری

طبق نتایج مطالعه حاضر، با انجام پردازش پلاسما اگرچه کارایی جمع آوری ذرات کاهش پیدا کرد، ولی با کاهش چشمگیر افت فشار مدیا، در نهایت فاکتور کیفیت آن‌ها نسبت به مدیاهای بدون پردازش، میزان کارایی قابل توجه‌تری را بدست آورد. بنابراین بطور کلی می‌تواند پردازش پلاسما، گزینه خوبی برای اصلاح سطحی مدیا باشد، اگرچه نتیجه گیری قطعی منوط به انجام آزمون‌های تکمیلی مانند، مقاومت مکانیکی مدیا، چسبندگی لایه و .. است. ضمن آنکه می توان کاربرد های بالقوه آتی از نانوالیاف هیبریدی پردازش شده با پلاسما را برای حذف همزمان ذرات و آلاینده های گازی و بیولوژیکی انتظار داشت.

پردازش پلاسما باعث افزایش قطر الیاف و در نتیجه کاهش فشردگی مدیا می گردد و ، از این رو منجر به کاهش کارایی فیلتراسیونمی شود. علاوه بر این، بارش یونی در پردازش پلاسما می‌تواند از طریق تخریب بافت مدیا و ایجاد حفره در آن، سبب نفوذپذیری زیاد مدیا و کاهش کارایی آن گردد. همان طور که قبلاً نیز بحث شد کارایی جمع آوری بالا از طریق قطر الیاف کوچکتر و دانسیته فشردگی بالاتر الیاف و افت فشار پایین از طریق دانسیته فشردگی پایین (تخلخل بالاتر)، و قطر بزرگتر الیاف محقق می‌شود . بنابراین یافتن نقطه بهینه برای ایجاد تعادل مناسب بین افت فشار مدیای فیلتر و کارایی آن جهت کسب فاکتور کیفیت قابل قبول به هنگام تولید آن بسیار ضروری است.

تشکر و قدردانی

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

منابع

1. Kenry, Lim CT: Nanofiber technology: current status and emerging developments. Progress in Polymer Science 2017, 70:1-17.
2. Wang G, Yu D, Kelkar AD, Zhang L: Electrospun nanofiber: Emerging reinforcing filler in polymer matrix composite materials. Progress in Polymer Science 2017, 75:73–107.
3. Tao D, Wei Q, Cai Y, Xu Q, Sun L: Functionalization of polyamide 6 nanofibers by electroless deposition of copper. Journal of Coatings Technology and Research 2008, 5(3):399-403.
4. Balamurugan R, Sundarrajan S, Ramakrishna S: Recent

[Downloaded from ioh.iums.ac.ir on 2026-11-18]
[DOI: 10.52547/ioh.18.1.45]

Zadeh AS: Experimental Investigations on electrospun mat production: for use in high-performance air filters. International Journal of Occupational Hygiene 2015, 7(3):110-118.
16. Bettencourt da Silva R, Williams A: Eurachem/CITAC Guide: Setting and Using Target Uncertainty
in Chemical Measurement; 2015.
17. Shao C, Guan H, Liu Y, Mu R: MgO nanofibres via an electrospinning technique. Journal of materials science 2006, 41(12):3821-3824.
18. Dehghan SF, Golbabaei, F.2 , Mousavi, T2, Mohammadi, H 2, Kohneshahri, M.H.2 and Bakhtiari, R.3: Production of nanofibers containing magnesium oxide nanoparticles for removing bioaerosol. Pollution 2020, 6(1):185-196.
19. Bao L, Seki K, Niinuma H, Otani Y, Balgis R, Ogi T, Gradon L, Okuyama K: Verification of slip flow in nanofiber filter media through pressure drop measurement at low-pressure conditions. Separation and Purification Technology 2016, 159:100-107.
20. 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):323-334.
21. Brown RC: Air filtration. London: Pergamon Press; 1993.
22. Hosseini S, Tafreshi HV: Modeling permeability of 3-D nanofiber media in slip flow regime. Chemical Engineering Science 2010, 65(6):2249-2254.
23. Karwa AN, Tatarchuk BJ: Aerosol filtration enhancement using carbon nanostructures synthesized within a sintered nickel microfibrous matrix. Separation and purification technology 2012, 87:84-94.
24. Liu J, Zeng B, Wu Z, Zhu J, Liu X: Improved field emission property of graphene paper by plasma treatment. Applied Physics Letters 2010, 97(3):033109.
25. Wei Q: Surface characterization of plasma-treated polypropylene fibers. Materials Characterization 2004, 52(3):231-235.
26. Wang N, Zhu Z, Sheng J, Al-Deyab SS, Yu J, Ding B: Superamphiphobic nanofibrous membranes for effective filtration of fine particles. Journal of colloid and interface science 2014, 428:41-48.
27. Moradi G, Sedighzadeh A, Yarahmadi R, Bakand S, Farshad A, Rezaeifard B: Synthesis of nano-fibrous mats using electrospinning method and determining their efficiency for nanoaerososls removal. Iran Occupational Health 2014, 11(4):1-11.
28. Hutten I: Handbook of Nonwoven Filter Media. Oxford Elsevier; 2007.
29. Papkov D, Zou Y, Andalib MN, Goponenko A, Cheng SZ, Dzenis YA: Simultaneously strong and tough ultrafine continuous nanofibers. ACS nano 2013, 7(4):3324-3331.
30. Zhang Q, Welch J, Park H, Wu C-Y, Sigmund W, trends in nanofibrous membranes and their suitability for air and water filtrations. Membranes 2011, 1(3):232-248.
5. Park JH, Yoon KY, Na H, Kim YS, Hwang J, Kim J, Yoon YH: Fabrication of a multi-walled carbon nanotube-deposited glass fiber air filter for the enhancement of nano and submicron aerosol particle filtration and additional antibacterial efficacy. Science of the total environment 2011, 409(19):4132-4138.
6. Dehghan SF, Golbabaei F, Sedigh-Zadeh A, Mohammadi H: Possibility of using plasma-processed hybrid nanofibers to remove toluene in air stream. Journal of Health and Safety at Work 2019, 9(3):179-190.
7. Vitchuli N, Shi Q, Nowak J, Nawalakhe R, Sieber M, Bourham M, McCord M, Zhang X: Plasma-electrospinning hybrid process and plasma pretreatment to improve adhesive properties of nanofibers on fabric surface. Plasma Chemistry and Plasma Processing 2012, 32(2):275-291.
8. Kamlangkla K, Paosawatyanyong B, Pavarajarn V, Hodak JH, Hodak SK: Mechanical strength and hydrophobicity of cotton fabric after SF6 plasma treatment. Applied Surface Science 2010, 256(20):5888-5897.
9. Dehghan S, Golbabaei F, Maddah B, Latifi M, Pezeshk H, Hasanzadeh M, Akbar F: Optimization of Electrospinning Parameters for PAN-MgO Nanofibers Applied in Air Filtration Somayeh. Journal of the Air & Waste Management Association 2016, 66(9):912–921.
10. ISO: ISO 29463: High-efficiency filters and filter media for removing particles in air-- Part 3: Testing flat sheet filter media. In. Geneva: International Organization for Standardization; 2011.
11. ASHREA: ASHREA 52.2: Method of Testing General Ventilation Air-Cleaning Devices for Removal Efficiency by Particle Size. In. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.; 2006.
12. 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.
13. Matulevicius J, Kliucininkas L, Martuzevicius D, Krugly E, Tichonovas M, Baltrusaitis J: Design and characterization of electrospun polyamide nanofiber media for air filtration applications. Journal of nanomaterials 2014, 2014:14.
14. Dehghan S, Maddah B, Golbabaei F: The Development of Nanofibrous Media Filter Containing Nanoparticles for Removing Particles from Air Stream. Iranian Journal of Health and Environment 2016, 8(4):509-524.
15. Dehghan SF, Golbaaei F, Maddah B, Yarahmadi R,

[Downloaded from ioh.iums.ac.ir on 2026-11-18]

[DOI: 10.52547/ioh.18.1.45]

Marijnissen JC: Improvement in nanofiber filtration by multiple thin layers of nanofiber mats. Journal of Aerosol Science 2010, 41(2):230-236.
31. 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):2407-2409.
32. Nataraj S, Yang K, Aminabhavi T: Polyacrylonitrile-based nanofibers—A state-of-the-art review. Progress in polymer science 2012, 37(3):487-513.
33. Chen H-M, Yu D-G: An elevated temperature electrospinning process for preparing acyclovir-loaded PAN ultrafine fibers. Journal of Materials Processing Technology 2010, 210(12):1551-1555.
34. Ji L, Zhang X: Ultrafine polyacrylonitrile/silica composite fibers via electrospinning. Materials Letters 2008, 62(14):2161-2164.
35. Kaur S, Gopal R, Ng WJ, Ramakrishna S, Matsuura T: Next-generation fibrous media for water treatment. Mrs Bulletin 2008, 33(1):21-26.
36. 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):340-345.
37. Leung WW-F, Hung C-H, Yuen P-T: Effect of face velocity, nanofiber packing density and thickness on filtration performance of filters with nanofibers coated on a substrate. Separation and purification technology 2010, 71(1):30-37.
38. Podgórski 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):6804-6815.

[Downloaded from ioh.iums.ac.ir on 2026-11-18]

[DOI: 10.52547/ioh.18.1.45]