



ORIGINAL RESEARCH PAPER

Optimizing the Electrospinning Process of PAN/ZIF8 Multifunctional Nanofiber Substrates and Using Them in Respiratory Protection Masks

Adel Jafari, Farshid Ghorbani Shahna, Abdulrahman Bahrami, Majid Habibi Mohraz*

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

Received: 2022-07-14

Accepted: 2023-03-01

ABSTRACT

Introduction: With the spread of the COVID-19 pandemic and the lack of adequate protection by existing protective equipment, many researchers' attention has turned to developing improved respiratory protection equipment. Considering their special properties and nanoscale dimensions, electrospun nanofibers are a suitable option for improving operational characteristics of substrates used in conventional facemasks. This study aimed to optimize the electrospinning process of polyacrylonitrile nanofibers (PAN) containing ZIF8 and use the optimized substrate in medical facemasks to increase their protective performance.

Material and Methods: This study employed an environmentally friendly method to synthesize ZIF8 in an aqueous environment. Then, PAN/ZIF8 polymer solutions were prepared in dimethylformamide. The effects of electrospinning parameters, including electrospinning voltage, polymer solution concentration, electrospinning distance, and polymer injection flow rate on diameter and uniformity of nanofibers were investigated. Electrospinning conditions were optimized using response surface methodology (RSM) and central composite design (CCD) to obtain desired values for response (dependent) variables. Finally, optimized PAN/ZIF8 and PAN nanofibers were electrospun on spun-bond substrate. Base weight, average diameter of fibers, filtration performance, pressure drop, and quality factor of fabricated substrates were assessed.

Results: According to results, optimal conditions for electrospinning of PAN/ZIF8 polymeric solution for polymer concentration (A), electrospinning voltage (B), electrospinning distance (C), and polymer injection flow rate (D) were respectively 70 w/v%, 20 kV, 18 cm, and 0.4 ml/h. Moreover, despite lower base weight of PAN/ZIF8 nanofiber mask, it displayed higher filtration performance (98.51%), lower pressure drop (31.42 Pa), and higher quality factor (0.140 Pa_{.1}) in comparison to other studied masks.

Conclusion: Experimental models developed in this study provide acceptable values for filtration efficiency and quality factor for filtration applications. Additionally, they serve as a guideline for subsequent experiments to produce uniform and continuous nanofibers with desired diameter for future applications in absorbent media (intermediate absorbent layers) of respirators.

Keywords: Electrospinning, Optimization, Nanofiber substrate, Polyacrylonitrile, ZIF8

HOW TO CITE THIS ARTICLE

Jafari A, Ghorbani Shahna F, Bahrami A, Habibi Mohraz M. Optimizing the Electrospinning Process of PAN/ZIF8 Multifunctional Nanofiber Substrates and Using Them in Respiratory Protection Masks. Journal of Health and Safety at Work. 2023; 13(2): 384-403.

1. INTRODUCTION

Global COVID-19 outbreaks have led researchers to develop respiratory protection materials that offer better properties and are more

* Corresponding Author Email: m.habibi@umsha.ac.ir

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.

cost-effective. A key aspect of these efforts is their emphasis on the importance of using modern methods and protective equipment. Currently, the most promising approach to prevent contamination by nanoparticles and hazardous gases in the

Copyright © 2023 The Authors.

atmosphere is air filtration. Using electrospinning and a variety of chemical compounds, researchers aim to develop multifunctional filter media that can simultaneously remove air contaminants. Metal-organic frameworks (MOFs) have also been noticed as adsorbents for atmospheric pollutants due to their excellent properties, such as open crystal structure, high availability, low density, adjustable and predictable pore size, and other surface properties. Among these materials, ZIF8 has been extensively studied. This material is characterized by MOFs' unique properties but also exhibits chemical stability and strong mechanical strength and is easy to synthesize at room temperature. A further distinction is that ZIF8 possesses the property of a macromolecular rotation gate, allowing it to adsorb materials with larger pore diameters than its own. Combining PAN and ZIF8 is expected to increase nanoparticle filtration rates.

Therefore, our study presents the fabrication and optimization of specific electrospinning parameters for PAN/ZIF8 nanofibers for air filtration. Future studies can use empirical models developed in this study to fabricate uniform and continuous nanofibers for air purification applications.

2. MATERIAL AND METHODS

Electrospinning parameters such as polymer concentration, applied voltage, needle tipto-collector distance, and polymer flow rate were optimized to achieve the desired fiber diameter. Other electrospinning variables were kept constant. Pilot studies were conducted to determine the boundary values for the investigated electrospinning parameters and to ensure the formation of continuous fibers without breaking into droplets.

The experimental design was created using Design-Expert software (version 7) and Response Surface Methodology (RSM) based on a central composite design (CCD). This was done to evaluate the effects of process conditions on fiber diameter and uniformity of electrospun PAN/ZIF8.

Polyacrylonitrile (12 wt %) was dissolved in dimethylformamide to prepare the polymer solution. Different concentrations of ZIF8 zeolite frames (with weight percentages of 30, 50, and 70) were then prepared. The electrospinning conditions were determined according to the experimental design and included needle tip-tocollector distance (8-20 cm), polymer solution concentration (30, 50, and 70%), electrospinning voltage (10-20 kV), and polymer solution flow rate (0.3-1.0 mL/h). The solutions were transferred to a 5 mL syringe and nanofiber layers were collected on aluminum foil for each experiment.

The morphology of the fibers was studied using a scanning electron microscope (Philips XL-30 ESEM). The average diameter of the nanofibers was analyzed using an image analyzer (ImageJ 1.44p software) with 50 measurements of random fibers taken from SEM images.

For the filtration test, a PAN/ZIF8 nanofiber layer was prepared using the proposed optimal conditions on a spun-bond substrate with a thickness of about 90 μ m and a basis weight of 25 g/m2. This was compared with a surgical mask. Additionally, a PAN nanofiber layer was coated on the spun-bond substrate to investigate the effect of ZIF8 and its filtration performance was evaluated.

3. RESULTS AND DISCUSSION

Table 1 presents the SEM images and fiber morphology obtained from different experimental runs. The minimum mean fiber diameter belongs to STD 14 (concentration 30 wt%, applied voltage 10 kV, distance 8 cm, and injection flow rate: 0.3 mL/h). The maximum mean fiber diameter is achieved in standard experiment 20 (STD 20) with a concentration of 70 wt%. According to Table 1, the highest CV% (uniformity) of nanofiber diameter is achieved in experiment standard 30, while the lowest CV% (uniformity) is found in experiment standard 2.

Table 2 shows the individual influences of concentration, applied voltage, electrospinning distance, and injection flow rate on average fiber diameter and CV% (uniformity) while holding three other factors constant. Solution concentration exhibits the strongest positive correlation with fiber diameter and significantly affects fiber size more than the other predictor variables (r = 0.614, P < 0.01). The injection flow rate parameter exhibits the highest correlation with the average fiber diameter of nanofibers (r = 0.527, P < 0.01). A significant relationship was observed between inverse electrospinning voltage and nanofiber diameter (r = -0.449, P < 0.05). The polymer injection flow rate showed a positive and significant correlation with the uniformity of PAN/ZIF8 nanofibers (r = 0.248) and was negatively correlated with polymer concentration (r = -0.399).

Filtration Performance Evaluation: Table

A. Jafari et al. / Optimizing the Electrospinning Process of PAN/ZIF8

Run		Electrospinn	ing Parameters		Respons	se Variables	SEM images
	Polymer Concentration (wt %)	Applied voltage (kV)	Electrospinning distance (cm)	Injection flow rate (ml. h ⁻¹)	Average Fiber Diameter (nm)	CV% of the nanofiber diameter (uniformity)	
2	50	10	13	0.65	223.17	40.47	
14	30	10	8	0.3	152.91	29.33	
20	70	10	18	1	253.45	39.67	
30	70	20	8	0.3	167.43	22.47	

Table 1: Design of experiment and average fiber diameter (nm) and uniformity (CV%) of filter media

Table 2: Correlation coefficients between electrospinning parameters and response variables.

	Response Variables					
Electrospinning Parameter	Mean diameter (nm)	CV% of the nanofiber diameter (uniformity)				
Polymer concentration (wt %)	0.614**	-0.399*				
Applied voltage (kV)	-0.449*	-0.089				
Electrospinning distance (cm)	0.043	-0.020				
Polymer injection flow rate (ml. h^{-1})	0.527**	0.248*				
*Correlation is significant at the 0.01 level. **Correlation is significant at the 0.05 level.						

Table 3: Filtration performance and characteristics of layers.

Sample name	Electrospinning duration (min)	Number of layers	Filter Weight (g/m2)	Thickness (mm)	Pressure Drop (Pa)	Filtration efficiency(%)	Quality factor (Pa ⁻¹)
Media	20	CD CDN CD	2.21	163.42	31.42 ±	9.71 ± 0.49	0.1401 ± 0.005
PAN/ZIF8	20	3D-3DIN-3D	17.06	8321	2.83	0.71 <u>F</u> 0.48	0.1401 ± 0.003
Madia DAN	20	SB-SBN-SB	2.20	346.14	49.82 ± 4.19	90.21 ± 0.79	0.0481 ± 0.001
Media PAN	20		17.10	8295			
Three layer		Spon-bond	17.12	8178	57 17 +		0.0183 ± 0.001
Surgical mask	-	Meltblown	24.83	3251	4 48	64.53 ± 3.21	
ourgicur musik		Spon-bond	17.07	8359			

3 shows that the filtration performance of the PAN/ZIF8 nanofiber layer coated on a spunbond substrate (polypropylene) was evaluated at a velocity of 9.8 m/s and a particle range between 10 and 1000 nm and compared with a three-layer surgical mask. A three-layer PAN/ZIF8 coating on a spun-bond substrate showed improved filtration performance (98.71 vs. 64.53%) and lower pressure drops (31.42 vs. 57/17).

According to the results of Design Expert statistical software, the optimal conditions for electrospinning the polymer PAN/ZIF8 are: electrospinning solution concentration of 70% w/v (A), applied voltage of 20 kV (B), electrospinning distance of 18 cm (C), and injection flow rate of 0.4 mL/h (D).

Optimization of the obtained responses can be performed using Design-Expert software. This involves measuring several combinations of input parameters to achieve the desired response conditions. Since nanofiber diameter is a significant parameter for filtration efficiency and pressure drop of filtering media, the mean diameter and CV% of diameter (uniformity) were chosen as minimum values based on the desired objectives of this study.

The information obtained from the model suggests a correct and significant relationship PAN/ZIF8 polymer concentration, between polymer injection flow rate, and diameter of the produced nanofibers. A higher polymer concentration leads to higher viscosity of the liquid, reducing the strength of the magnetic field in the Taylor cone and causing the fabrication of nanofibers with a larger diameter. There is also a significant inverse relationship between an increase in applied electrospinning voltage and a decrease in nanofiber diameter. This downward trend in nanofiber diameter can be attributed to an increase in suction speed of the polymer, leading to the production of nanofibers with a smaller diameter.

In terms of polymer injection flow, a similar pattern was observed where nanofiber diameter increased with an increase in injection rate. This increase in polymer injection rate may cause a larger volume of polymer to accumulate in the Taylor cone, resulting in a larger volume of polymer moving towards the collector and ultimately increasing nanofiber diameter. The results demonstrate a significant indirect relationship between polymer concentration and CV% of diameter (uniformity). Previous studies have shown that enhancing electrostatic force in polymer jets improves uniformity of electrospun nanofibers. A significant direct relationship was found between polymer injection rate and CV% of diameter (uniformity), leading to production of nanofibers with higher CV% and lower uniformity when polymer injection rate is increased. This can be explained by an increase in charge density and resulting decrease in polymer injection rate in the syringe head.

After fabrication, filtration efficiency of PAN/ ZIF8 electrospun nanofiber filter media was measured using the recommended optimized method. Despite their lower basis weight, filtration efficiency of PAN/ZIF8 substrates was compared to that of other three-layer medical masks. PAN/ ZIF8 substrates had higher filtration efficiency, lower pressure drop, and higher quality factor. During nanoparticle filtration process, PAN/ZIF8 nanofiber layer achieves higher filtration efficiency and lower pressure drop by creating smooth flow between fibers that reduces airflow resistance between fibers.

4. CONCLUSIONS

Our findings on optimizing the electrospinning process of PAN/ZIF8 substrates allow us to adjust the variables in the electrospinning process and filtration substrates, resulting in promoted fibrous filter media. Furthermore, the experimental models developed in this study can provide guidance for further experiments to produce uniform and continuous nanofibers with the desired diameter for future applications in industrial filtration, specifically personal respirators. The results showed that the produced substrates have high filtration performance and can be used in respiratory protection equipment, offering enhanced protection compared to typical masks used to combat COVID-19.

5. ACKNOWLEDGMENTS

This work is supported by Hamedan University of Medical Sciences and was taken from a master's thesis on Occupational Health Engineering (No. 140004293634). The authors would like to thank the experts for enabling collaborative work.

بهینهسازی فرایند الکتروریسی بسترهای نانوفیبری چند منظوره PAN/ZIF8 و استفاده از آن در ماسکهای حفاظت تنفسی

عادل جعفری فتح، فرشید قربانی شهنا، عبدالرحمن بهرامی، مجید حبیبی محرز*

قطب علمی و آموزشی بهداشت حرفهای، مرکز تحقیقات بهداشت و ایمنی شغلی، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی همدان، ایران

تاريخ دريافت: ۱/۰۴/۲۳، ۲۴۰۱، تاريخ پذيرش: ۱۴۰۱/۱۴۰۱

🔳 مِكِيدە

مقدمه: با گسترش پاندمی کووید ۱۹ (COVID) و عدم ایجاد حفاظت کافی توسط تجهیزات حفاظتی موجود، توجه بسیاری از پژوهشگران به توسعه ی تجهیزات حفاظت تنفسی ارتقایافته، سوق یافته است. نانوفیبرهای الکتروریسی شده، به دلیل دارا بودن خواص ویژه و قطر الیاف در ابعاد نانومتری، گزینه ی مناسبی جهت ارتقای خصوصیات عملکردی بسترهای معمول مورد استفاده در ماسکها هستند. هدف مطالعه ی حاضر، بهینه سازی فرایند الکتروریسی برای ساخت بسترهای نانوفیبری پلی اکریلونیتریل (PAN) بر پایه ی جاذب چار چوب های ایمیدازول زئولیتی –۸ (ZIFA) و به کار گیری بستر بهینه شده در ماسکهای پزشکی به منظور افزایش عملکرد حفاظتی این ماسکها است.

روش کار: در این مطالعه، برای سنتز AIFA، از روش دوستدار محیط زیست در محیط آبی استفاده شد. در ادامه، محلولهای پلیمری PAN/ZIFA در حلال دی متیل فرمامید آماده سازی شده و سپس نحوه ی اثر پارامترهای الکتروریسی، ازجمله غلظت محلول پلیمری، ولتاژ اعمالی الکتروریسی، فاصله ی الکتروریسی و دبی تزریق پلیمر بر روی قطر و یکنواختی (درصد ضریب تغییرات نانوفیبرها) با بهره گیری از طرح آزمایشات سطح-پاسخ (RSM) بر اساس طرح مرکب مرکزی (CCD) مورد بررسی قرار گرفت. درنهایت بستر PAN/ZIFA بهینه شده و بستر PAN بر روی زیرلایه ی اسپان باند، الکتروریسی شد و وزن پایه، میانگین قطر فیبرها، راندمان فیلتراسیون، افت فشار و فاکتور کیفیت بسترها مورد بررسی قرار گرفت.

یافته ها: با توجه به نتایج کسبشده، شرایط بهینه ی الکتروریسی محلول پلیمری PAN/ZIFA برای پارامترهای غلظت محلول پلیمری، ولتاژ الکتروریسی، دبی تزریق و فاصله ی الکتروریسی، به ترتیب w/w ۲۰، ۲۰ kml.hr⁻¹ و ml.hr به دست آمد. همچنین نتایج مطالعه ی حاضر، حاکی از این بود که ماسک دارای بستر نانوفیبری PAN/ZIFA با وجود وزن پایه ی کمتر، از عملکرد فیلتراسیون بهتر (۹۸/۵۱/)، افت فشار پایین تر (۳۱/۴۲ Pa) و درنهایت فاکتور کیفیت بالاتر (۲۰۱۹۵۰۱/۰۱۹ در با سایر ماسکهای مورد بررسی برخوردار است.

نتیجه گیری: نتایج مطالعه ی حاضر، حاکی از این بوده که بسترهای ساختهشده ی PAN/ZIF۸، از عملکرد فیلتراسیونی خوبی برای استفاده در تجهیزات حفاظت تنفسی برخوردار هستند و میتوان با مدل توسعه دادهشده، نانوفیبرهای یکنواخت و پیوسته با قطر دلخواه را برای کاربردهای خاص، بهویژه در ساختار بسترهای فیلتراسیونی ماسکهای حفاظت تنفسی استفاده کرد.

💳 كلمات كليدى: بهينه سازى، الكتروريسى، فيلتراسيون، بستر نانوفيبرى، پلى اكريلونيتريل، ZIF۸

* پست الكترونيكى نويسنده مسئول مكاتبه: : m.habibi@umsha.ac.ir

عادل معفری فتع و همکاران

🔳 مقدمه

با گسترش پاندمی COVID-19، بسیاری از پژوهشگران حوزه ی سلامت، بر آن شدند تا عملکرد و ارتقای سطح حفاظتی تجهیزات حفاظت تنفسی معمول را مورد بررسی قرار دهند. همچنین آلودگی هوا و افزایش روند استفاده از نانوذرات در محیطهای صنعتی و آزمایشگاهی و امکان انتشار آن در هوا، امروزه به یکی از نگران کنندهترین مسائل زیستمحیطی در جهان تبدیل شده است (۱). همین طور آمارهای موجود، حاکی از این است که درمجموع سالانه حدود پنج میلیون مرگ زودرس در جهان ناشی از آلودگی هوا است (۲). این موضوعات، اهمیت و ضرورت استفاده از روشها و تجهیزات حفاظتی نوین برای کاهش مواجهه و اثرات سلامتی ناشی از این آلایندهها را دوچندان مینماید.

نانوفیبرهای تولیدشده بهوسیله ی فرایند الکتروریسی، یکی از روشهای موجود جهت ساخت بسترهای فیلتراسیونی با عملکرد بالا است که از این نسترها میتوان برای ساخت تجهیزات حفاظت فردی و انواع فیلترهای صنعتی استفاده نمود (۳، ۴). الکتروریسی، یکی از روشهای در حال رشد است که الیافی در ابعاد زیر میکرون تا قطر چند نانومتر در یک میدان الکترواستاتیک با ولتاژ بالا تولید میکند؛ و علی رغم اینکه این روش، روشی نسبتاً قدیمی برای ریسندگی الیاف است؛ اما در حال حاضر، یکی از پیشرفته ترین روشها درزمینه ی تولید نانوفیبرهای با کارایی بالا است که به دلیل مشخصات متمایز خود، از جمله نسبت ابعاد بالا، تخلخل و خواص شیمیایی و فیزیکی مناسب، زمینه را برای ورود نانوفیبرها به رشتههای مختلف باز کرده است (۵).

یکی از مزایای این بسترها، قابلیت عاملدار کردن آنها بهوسیله ی اضافه نمودن دیگر نانوذرات برای ایجاد ویژگیهای دلخواه است. چارچوبهای آلی- فلزی (MOFs)، یکی از مواد جاذبی هستند که اخیراً بسیار مورد توجه محققان قرار گرفتهاند (۶). چارچوبهای آلی-فلزی (MOFs)، خواص منحصربهفردی مانند ساختار

كريستالى باز، واكنش پذيرى مناسب، سطح جذب بالاى در دسترس، چگالی کم، قابلت تنظیم و قابل پیشبینی بودن اندازه ی منافذ و دیگر خصوصیات سطحی را دارا می باشند که همین ویژگیها، منجر به این شده است که این مواد از مطلوبیت بالایی برای استفاده در ساختار بسترهای فیلتراسیونی چندکاربردی داشته باشند (۲، ۸). در بین چارچوبهای آلی فلزی، ZIF8، بهعنوان یکی از زیرمجموعه های MOFs، بسیار مورد مطالعه قرار گرفته است؛ زیرا نهتنها خواص منحصربهفرد MOFs را از خود نشان میدهد، بلکه دارای پایداری شیمیایی بالا و استحکام مکانیکی قوی است و بهراحتی در دمای اتاق سنتز می شود (۹). با وجود این، قابل توجه ترین ویژگی ZIF8، دروازه ی چرخش ماکرومولکولی آن است که به جهت این خاصیت، میتواند موادی با قطر بزرگتر از قطر منافذ خود را جذب كند و يك انتخاب مناسب جهت جذب مواد باشد (۱۰، ۱۱).

تاکنون پلیمرهای متنوعی جهت تولید بسترهای فیلتراسیونی نانوفیبری مورد مطالعه قرار گرفته است که در این بین، پلیمرهای با پایه ی پلی اکریلونیتریل (PAN)، به دلیل دارا بودن خواص ساختاری مناسب همانند کشسانی بالا، عدم حلالیت در آب، مقاومت مکانیکی، دوام و سطح متخلخل، به گزینه ی مناسبی جهت تولید بسترهای فیلتراسیونی با استفاده از فرایند الکتروریسی بدل شدهاند (۱۲). برخی از مطالعات، نشان دادهاند که از تلفیق نانوفیبرها با نانوذرات دیگر، همانند چارچوبهای آلی- فلزی، میتوان بسترهای با عملکرد فیلتراسیونی بالاتر در عین حفظ تنفسپذیری مناسب تولید کرد (۱۴، ۱۴).

هدف مطالعه ی حاضر، بهینهسازی فرایند الکتروریسی جهت تولید بسترهای فیلتراسیونی نانوفیبری پلی اکریلونیتریل (PAN) بر پایه ی جاذب چارچوبهای ایمیدازول زئولیتی-۸ (ZIF8) است. برای این منظور، بهینهسازی بر اساس روش سطح پاسخ و طرح مرکب مرکزی انجام شد و بستر PAN/ZIF8 بر روی زیرلایه ی

^{1.} Metal-organic frameworks

^{2.} Zeolitic imidazolate frameworks

اسپان باند، الکتروریسی گردید و عملکرد فیلتراسیونی آن با ماسک حاوی نانوفیبرهای PAN بدون ZIF8 (بهمنظور تعیین تأثیر ZIF8 بر روی عملکرد بستر) و ماسکهای سهلایه ی پزشکی معمول، مورد مقایسه قرار گرفت.

🔳 روش کار

۱) مواد

 $(M_w = 8000 \text{ g.mol}^{-1})$ پلیمر پلی آکریلونیتریل (DMF) از شرکت و حلال N,N–دی متیل فرمامید (DMF) از شرکت مرک آلمان، نیترات روی ششآبه (Zn(NO₃)₂. 6H₂O) و محلول آبی ۲-متیل ایمیدازول (Hmim, C₄H₆N₂) و محلول آبی هیدروکساید آمونیوم (NH_3 , 28-30) از شرکت سیگما آلدریچ، خریداری شدند. تمامی مواد به صورت خالص استفاده شدند.

۲) سنتز ZIF8

جهت سنتز ZIF8، نیترات روی ۶ آبه را در آب دیونیزه حل و سپس ترکیب ۲ متیل ایمیدازول در حلال هیدروکسید آمونیوم آماده شده است. در ادامه، محلول نیترات روی در حین هم زدن، به آهستگی به ۲-متیل ایمیدازول اضافه شد که این مخلوط بلافاصله به یک سوسپانسیون شیریرنگ تبدیل شده و آنگاه، سوسپانسیون شیری به مدت ۱۰ دقیقه سانتریفیوژ و فاز بالای آن جدا و ZIF8 سنتز شده با آب دیونیزه شستشو (۳ بار تکرار) داده شد. درنهایت، ZIF8 سنتزشده به مدت ۱۲ ساعت تحت دمای ۶۰ درجه ی سانتی گراد در کوره ی خشک قرار گرفت (۱۵).

۳) ساخت بسترهای نانوفیبری PAN/ZIF8

جهت انتخاب و بهینهسازی متغیرهای الکتروریسی برای پلیمر پلیاکریلونیتریل، در ابتدا شرایط مرزی پارامترهای اثرگذار، دبی تزریق محلول پلیمری، ولتاژ الکتروریسی، غلظت محلول پلیمر و فاصله ی سوزن تا جمع آوری کننده از طریق انجام مطالعات اولیه بهمنظور تولید یکنواخت و مداوم نانوفیبرهای تعیین شد. روند

بهینهسازی فرایند الکتروریسی، از شش مرحله تشکیل شده که به شرح زیر است:

۱. تعیین مقادیر مرزی پارامترهای الکتروریسی:
تعیین مقادیر مرزی برای پارامترهای الکتروریسی شامل
غلظت محلول پلیمری، ولتاژ الکتروریسی، دبی تزریق و
فاصله ی الکتروریسی (که به ترتیب با حروف A، B، C
و D نامگذاری شدهاند)، از طریق انجام مطالعات اولیه و
پایلوت برای تشکیل نانوفیبرهای پیوسته بدون شکستن
قطرات در نوک سرنگ تزریق الکتروریسی انجام شده

۲. تعیین طرح آزمایشات الکتروریسی: تعیین طرح آزمایشات فرایند الکتروریسی با هدف ارزیابی تأثیر پارامترهای فرآیند الکتروریسی بر روی متغیرهای پاسخ و PAN/
۹ پینهسازی و پیشبینی میانگین قطر نانوفیبرهای /PAN
۲۰ بهوسیله ی نرمافزار Design Expert و بر اساس روش سطح پاسخ (RSM) – طرح مرکب مرکزی (CCD)
۱نجام شد. در این مطالعه بر اساس نتایج طراحی آزمایشات راجهت دستیابی به مقادیر بهینه، متغیرهای الکتروریسی الکتروریسی
۳۰ نوبت آزمایش تعیین شد.

۳. تهیه ی محلول الکتروریسی: محلولهای پلیمری
پلیآکریلونیتریل (۲۲ wt/) با حل کردن مقادیر مشخصی
از پلیمر PAN در حلال دی متیل فرمامید، آماده گردید و
در ادامه، سه غلظت مختلف از چارچوبهای زئولیتی ZIF8
(با درصدهای وزنی- وزنی ۳۰، ۵۰ و ۲۰) به این محلول
اضافه شد و جهت دستیابی به محلول پلیمری یکنواخت،
به مدت ۲۲ ساعت با استفاده از همزن مغناطیسی آماده

۴. انجام الکتروریسی: پس از حل شدن و پایداری کامل محلولهای پلیمری PAN/ZIF8، محلولها جهت الکتروریسی به سرنگهای ۵ میلیلیتری با سرسوزن از جنس استیل با قطر استاندارد شماره ی ۱۸ (۰۸۵۵ mm) منتقل شدند و سپس بر اساس طرح آزمایشات، فاصله ی الکتروریسی، غلظت محلول پلیمری حاوی ZIF8، ولتاژ الکتروریسی و دبی تزریق محلول پلیمری، برای هر یک از آزمایشها تنظیم گردید و لایههای نانوفیبرها روی

ورق آلومینیومی جمع آوری شد. سپس نمونهها به مدت ۲ ساعت در خلأ نگه داشته شد تا قبل از تصویربرداری با میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) در دمای اتاق خشک شوند. سپس تصاویر SEM به جهت مطالعه ی مورفولوژی نانوفیبرها با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (Hitachi S 4160) پس از پوشش دادن با ورق طلا تهیه شدند. درخصوص شرایط الکتروریسی بستر نانوفیبری PAN نیز غلظت اولیه ی محلول پلیمری این بستر بر اساس آزمایشات پایلوت و نتایج مطالعات قبلی، wt بستر RT/XIF8 سایر پارامترهای الکتروریسی بستر نانوفیبری PAN/ZIF8 سایر پارامترهای الکتروریسی بستر نانوفیبری PAN مشابه بستر PAN/ZIF8 در نظر گرفته شد.

۵. تعیین میانگین قطر و یکنواختی نانوفیبرها: میانگین قطر و یکنواختی نانوفیبرها (ضریب تغییرات قطر نانوفیبر) (۱۸، ۱۸)، از روی تصاویر میکروسکوپ SEM (سه تصویر برای هر نمونه و انتخاب ۵۰ نانوفیبر بهصورت تصادفی) ایدازه گیری شد. همچنین برای تحلیل آماری دادهها، اندازه گیری شد. همچنین برای تحلیل آماری دادهها، از نرمافزار آماری Design Expert نسخه ی ۲ (DX7) بهره گرفته شد. این برنامه، امکان ارائه ی یک مدل چندجمله ای از متغیرهای مستقل را برای پیشبینی متغیرهای پاسخ و تعیین شرایط بهینه برای متغیرهای تجربی برای به حداکثر رساندن یا به حداقل رساندن مقدار متغیرهای وابسته، فراهم میکند.

۶. درنهایت، پس از بهینهسازی شرایط، ساخت بسترهای نانوفیبری PAN/ZIF8 (مقادیر از پارامترهای الکتروریسی که در شرایط مشخص نانوفیبرهای با قطر و یکنواختی قابل قبول تولید می کنند) صورت گرفت. در این مطالعه، بهمنظور آمادهسازی بسترهای نانوفیبری جهت انجام تست فیلتراسیون، این بسترها بر روی زیرلایهای از جنس اسپان باند با ضخامت در حدود ۹۰میکرومتر و وزن پایه ی ۲۵ گرم بر مترمربع پوشش داده شدند. همچنین بهمنظور بررسی تأثیر ZIF8، بستر نانوفیبری PAN بر روی زیرلایه ی اسپان باند پوشش داده شد و

عملکرد فیلتراسیونی آن مورد بررسی قرار گرفت.

۴) تعیین عملکرد فیلتراسیونی بسترهای نانوفیبری PAN/ZIF8

بەمنظور تعیین عملکرد فیلتراسیونی بسترهای ساختهشده، از یک سیستم تست آزمایشگاهی که در شکل ۱ بخشهای مختلف این سیستم نشان داده شده، استفاده شد. این سیستم، از چهار بخش شامل بخش مولد ذرات، بخش شمارش کننده ی ذرات، بخش نگهدارنده ی نمونه بستر و بخش تأمين و تنظيم جريان تشكيل شده است. سیستم تأمین جریان، از یک پمپ مکنده و اینورتر تنظیم جریان تشکیل شده که در انتهای سیستم تست قرار گرفته بود. در ادامه، بهمنظور تولید آئروسلهای مورد استفاده در تست بسترها، از سوسپانسیون کلرید پتاسیم (KCl) با غلظت ۱ ۰/۰ در آب دیونایز در اتمایزر ساخته شده توسط شركت HCT كره جنوبي ,4920, HCT Co., Ltd.) (Korea استفاده گردید. در این سیستم، هوای ترقیقی و جريان حاوى ذرات كلريد پتاسيم كه توسط اتمايزر توليد شده، پس از اختلاط در مقادیر تنظیم شده، وارد بخش نگهدارنده ی بستر شدند. بخش نگهدارنده ی بستر، از استوانه با قطر ۶/۵ سانتیمتر تشکیل شده بود که در آن دو پرآب در بالادست و پاییندست بستر برای تعیین تراکم شمارشی ذرات (دامنه ی سایزی ذرات بین ۳۰۰ تا ۱۰۰۰ نانومتر) و دو پرآب نیز بهمنظور اندازه گیری میزان افت فشار (در سرعت سطحی ۱۰ سانتیمتر بر ثانیه) تعبیه شده بودند که با اتصال دو پرآب به مانومتر دیجیتال اختلافی (Kimo, CP 110)، افت فشار اندازه گیری و پایش گردید. همچنین در مطالعه ی حاضر، توزیع سایز ذرات و تراکم عددی و عبوری از هر نمونه ی مورد سنجش، با استفاده از سیستم پایشگر گردوغبار (,Model 1.1.09 Grimm Technologies Inc., Douglasville, GA, USA) مورد سنجش قرار گرفت (۱۹).

۵) محاسبه ی ضریب حفاظت Protection Factor با در نظر گرفتن راندمان فیلتراسیون برای ذرات با

فصلنامه بهداشت و ایمنی کار، جلد ۱۳/ شماره ۲/ تابستان ۹۱٬۹۰



شکل ۱: شماتیک سیستم تست عملکرد فیلتراسیونی ماسک ها

اندازه ی ۳۰۰ نانومتر و همچنین میانگین نفوذ ذرات برای ماسک ارتقا یافته و ماسک سهلایه ی معمولی، با استفاده از فرمول زیر، ضریب حفاظت ماسک PF، محاسبه شد (۲۰):

$$PF = \left(\frac{n}{\sum_{i=1}^{n} Pe}\right)$$
(1) A subscripts (1)

در این فرمول، n، راندمان فیلتراسیون ماسک وPe ، بیانگر میانگین تعداد ذرات نفوذ کرده است (۲۱).

🔳 يافته ها

رنج مناسب تغییرات متغیرهای تأثیرگذار در فرایند الکتروریسی، امر بسیار حیاتی برای رسیدن به نتایج مناسب و مطلوب است. رنج تغییر، میبایست به گونه ای باشد که تمامی احتمالات تأثیرگذار پارامترها را شامل باشد و همچنین نباید محدوده ی تغییرات به حدی باشد که میزان تناسب رگرسیون سطح-پاسخ را به نسبت مقدار واقعی کاهش دهد. جدول ۱، طراحی آزمایشات به روش مرکب مرکزی و نتایج بهدستآمده را نشان میدهد و همچنین در ادامه، تصاویر SEM مربوط به آزمایشات در شکل ۲ نمایش داده شده است.

بر اساس نتایج کسبشده در جدول ۱، کمترین قطر نانوفیبرهای PAN/ZIF8 تولیدی، مربوط به آزمایش

فصلنامه بهداشت و ایمنی کار، جلد ۱۳/ شماره ۲/ تابستان ۱۴۰۴

شماره ی ۱۴ (غلظت پلیمر: ۳۰ س/۳ ولتاژ الکتروریسی: شماره ی ۱۴ (غلظت پلیمر: ۳۰ س/۳ و فاصله ی الکتروریسی: ۸ cm) و بیشترین قطر نانوفیبر تولیدی نیز در آزمایش شماره ی ۲۰ (غلظت پلیمر: ۷۰ س/۷۰ ولتاژ الکتروریسی: ۱۰ kv مناره ی ۲۰ (غلظت پلیمر: ۱^m ۱ و فاصله ی الکتروریسی: ۱۰ kv مشاهده شده است. همین طور بالاترین میزان ۱۰ cm) مشاهده شده است. همین طور بالاترین میزان یکنواختی (درصد ضریب تغییرات قطر نانوفیبرها) در قطر نانوفیبرها، به آزمایش شماره ی ۳۰ (غلظت پلیمر: س/۷۰ w/v مراب شماره ی ۲۰ kv (غلظت پلیمر: میزان میزان میزان یکنواختی نیز به آزمایش شماره ی ۲ (غلظت میزان یکنواختی نیز به آزمایش شماره ی ۲ (غلظت میزان یکنواختی نیز به آزمایش شماره ی ۲ (غلظت میزان یکنواختی نیز به آزمایش شماره ی ۲ (غلظت میزان یکنواختی نیز به آزمایش شماره ی ۱۰، دبی تزریق:

ضریب همبستگی، ارتباط بین پارامترهای الکتروریسی و متغیرهای پاسخ را نشان می دهد. همان طور که در جدول ۲ نشان داده شده است، در مطالعه ی حاضر، بالاترین ضریب همبستگی و ارتباط بین پارامترهای الکتروریسی و قطر نانوفیبرها، مربوط به غلظت پلیمر (۰۱/۰۰ – P_v ، $P_v = -1/۶1$) بوده و بعد از آن پارامتر دبی تزریق پلیمر (۱۰/۰۰ – P_v ، ۲۷/۵۲۷ – ۲۱)، ارتباط معنادار و مستقیمی را نشان داده است؛ و حاکی از این است که با افزایش در مقدار هر یک از پارامترهای ذکرشده، قطر نانوفیبرهای تولیدشده نیز افزایش پیدا می کند. همچنین در ارتباط

щрщ

یکنواختی یا	میانگین	مقادير واقعى پارامترها					
درصد ضریب تغییرات قطر نانوفیبرها	قطر نانوفیبرها (نانومتر)	دبی تزریق (میلی لیتر بر ساعت)	فاصله الکتروریسی (سانتی متر)	ولتاژ الکتروریسی (کیلو ولت)	غلظت پلیمر (درصد وزنی)	شماره آزمایش	
۲۹/۶ ۳	198/74	۰/۶۵	١٣	۱۵	۵۰	١	
۴۰/۴۷	222/10	۰/۶۵	١٣	١٠	۵۰	۲	
۲١/۵٧	۱۷۹/۵۱	۰/۶۵	٨	۱۵	۵۰	٣	
371/18	184/44	۰ /٣	١٣	۱۵	۵۰	۴	
٣٠/٩١	177/14	١	٨	۲۰	۳۰	۵	
۲۳/۱۷	۱۹۶/۹ ۸	۰/۶۵	۱۸	۱۵	۵۰	۶	
۳۳/۸۹	۲۰۲/۰۶	۰/۶۵	١٣	۱۵	۵۰	۷	
۲۲/۸۱	181/41	۰ /٣	۱۸	۲۰	٧٠	٨	
21/46	107/20	۰ / ۳	١٨	١٠	۳۰	٩	
۳۵/۱۱	108/54	۰ /٣	٨	۲.	۳۰	۱۰	
۲۵/۳۷	۲۰۷/۵۹	١	١٨	۲.	٧٠	11	
۳۲/۱۴	198/79	١	١٨	١٠	۳۰	١٢	
۳۳/۷۱	۲۰۸/۱۷	۰ /٣	١٨	١.	٧٠	١٣	
۲٩/٣٣	157/91	۰ /٣	٨	١٠	۳۰	14	
77/44	176/71	۰/۶۵	١٣	۲.	۵۰	۱۵	
۳۳/۲ ۸	22./21	١	١٣	۱۵	۵۰	18	
۳۱/۴۲	7 • 4/79	۰/۶۵	١٣	۱۵	٧٠	۱۷	
344/21	187/41	۰/۶۵	١٣	۱۵	۳۰	۱۸	
۳۲/۸۱	۲ • ۹/۳۲	۰/٣	٨	١.	٧٠	١٩	
34/61	202/40	١	١٨	١.	٧٠	۲.	
T &/9V	۲•٩/١٣	١	٨	۲۰	٧٠	۲۱	
371/3	190/14	۰/۶۵	١٣	۱۵	۵۰	۲۲	
40/20	189/14	١	١٨	۲۰	۳۰	۲۳	
78/48	190/18	۰/۶۵	١٣	۱۵	۵۰	۲۴	
۳۰/۸۷	193/40	۰/۶۵	١٣	۱۵	۵۰	۲۵	
38/15	749/17	١	٨	۱.	٧٠	26	
21/26	191/77	۰/۶۵	١٣	۱۵	۵۰	۲۷	
۳۳/۵۷	197/87	١	٨	۱.	٣٠	۲۸	
۳۷/۱۴	107/38	۰/۳	١٨	۲۰	٣٠	۲۹	
22/27	187/42	۰/٣	٨	۲.	٧٠	۳۰	

جدول ۱: طراحی آزمایشات پارامترهای الکتروریسی و مقادیر پاسخ به دست آمده از الکتروریسی پلیمر PAN/ZIF8



بهينه سازى فرايند الكتروريسى بسترهاى نانوفيبرى چند منظوره PAN/ZIF8 ...

۵

۴

٣

۲

۱

فصلنامه بهداشت و ایمنی کار، جلد ۱۳/ شماره ۲/ تابستان ۱۴۰۴



شکل ۳: نمونه تصویر الکتروریسی شده نانوفیبری PAN با شرایط الکتروریسی: غلظت محلول الکتروریسی ۱۲ درصد وزنی-حجمی، ولتاژ الکتروریسی ۲۰ کیلو ولت، فاصله سوزن تا جمع آوری کننده ۱۸ سانتیمتر، دبی تزریق پلیمر ۲۵/۰ میلی لیتر در ساعت.

بیرهای پاسخ						
یکنواختی (درصد)	ميانگين قطر نانوفيبرها (نانومتر) يكنواختى (درصد)					
PAN/ZIF8	PAN/ZIF8					
-•/٣٩٩ [★]	•/۶۱۴ **	غلظت پليمر (A)				
-•/• ⋏ ٩	-•/۴۴٩ *	ولتاژ الکتروریسی (B)				
-•/•Y•	•/•44	فاصله الكتروريسي (C)				
•/۲۴۸ *	•/۵۲۷ **	دبی تزریق پلیمر (D)				
در سطح ۰/۰۵ معنی دار است.	**رابطه در سطح ۰۱					

	پاسخ	متغيرهاي	لکتروریسی و	ن پارامترهای ا	ھمبستگی بی	جدول ۲: ضریب
--	------	----------	-------------	----------------	------------	--------------

وابسته و تعیین ارتباط بین متغیرهای پاسخ و پارامترهای الکتروریسی، استفاده شد. در این روش، بر اساس طراحی انجامشده، ضرایب پارامترها در این مدل پیش بینی و همین طور برای پلیمر مدل مناسب تعیین شد؛ و از میان مدلهای مختلف، بر اساس مقایسه ی مقادیر واقعی و مشاهدهشده با مقادیر پیش بینی شده، بهترین مدل که مدل درجه دوم با دارا بدون شاخصهای آماری مطلوب از جمله ضرایب تعیین تنظیم شده، ریشه ی میانگین مربعات خطای کمتر، پیش بینی دقیق تر و همین طور پیش بینی مجموع مربعات مانده مدل پایین تر به نسبت سایر مدل های پیش بینی کننده ی متغیر وابسته انتخاب گردید.

جدول ۳، مدل درجه دوم و درجه دوم کاهشیافته و همچنین سایر پارامترهای آماری را نشان میدهد. بر اساس با پارامتر ولتاژ الکتروریسی و قطر نانوفیبرهای تولیدی، رابطه ی معنادار و معکوسی (۵-۹۰ پا، ۹۹ $P_v - - ۹$) (r = -/۴۴۹) وجود دارد. همین طور پارامتر فاصله ی الکتروریسی و قطر نانوفیبرها، ارتباط مستقیم ولی غیرمعناداری مشاهده شده است. در ارتباط با یکنواختی نانوفیبرها، رابطه ی معنادار و غیرمستقیمی بین فاصله ی الکتروریسی و یکنواختی وجود دارد (۵-۹۰ پا، ۹۹ - - - 7۹) و رابطه ی مستقیم و معناداری بین دبی تزریق پلیمر مشاهده شد. در میان متغیرهای مستقل موجود، پارامتر غلظت پلیمر، رابطه ی معنادار و غیرمستقیمی را با یکنواختی نانوفیبرها نشان میدهد (۵-۹۰ پاره (۲۰ میلیم).

در این مطالعه، از روش تجزیهوتحلیل واریانس (ANOVA) و برازش مدل به جهت بررسی اثر متغیرهای

P _{value}	مجموع مربعات درجه آزادی مقدار پارمتر آماره F		مجموع					
يكنواختى	قطر	يكنواختى	قطر	يكنواختى	قطر	يكنواختى	قطر	مىبح
• •••</th <td>•<!--•••</td--><td>१९/१९</td><td>۳۳/۳۴</td><td>١۴</td><td>14</td><td>837/28</td><td>۱<i>۸۰۷/۳۶</i> ۹</td><td>مدل</td></td>	• •••</td <td>१९/१९</td> <td>۳۳/۳۴</td> <td>١۴</td> <td>14</td> <td>837/28</td> <td>۱<i>۸۰۷/۳۶</i> ۹</td> <td>مدل</td>	१९/१९	۳۳/۳۴	١۴	14	837/28	۱ <i>۸۰۷/۳۶</i> ۹	مدل
• •••</th <td>·<!--···</td--><td>40/22</td><td>۱۸۱/۵۱</td><td>١</td><td>١</td><td>1.5/48</td><td>٧٠٣٠/۶١</td><td>غلظت(A)</td></td>	· ···</td <td>40/22</td> <td>۱۸۱/۵۱</td> <td>١</td> <td>١</td> <td>1.5/48</td> <td>٧٠٣٠/۶١</td> <td>غلظت(A)</td>	40/22	۱۸۱/۵۱	١	١	1.5/48	٧٠٣٠/۶١	غلظت(A)
•/1641	۰ ۰۰۰</td <td>۲/۲۵</td> <td>٩٧/٠٨</td> <td>١</td> <td>١</td> <td>۵/۳۰</td> <td>8780/11</td> <td>ولتاژ(B)</td>	۲/۲۵	٩٧/٠٨	١	١	۵/۳۰	8780/11	ولتاژ(B)
•/४۴۶٩	•/۳۵үл	•/١•٨١	•/٩•••	١	١	•/2044	34/18	فاصله(C)
•/••• \	• •••</td <td>17/01</td> <td>۱۳۳/۹۵</td> <td>١</td> <td>١</td> <td>41/22</td> <td>6188/41</td> <td>دبی تزریق(D)</td>	17/01	۱۳۳/۹۵	١	١	41/22	6188/41	دبی تزریق(D)
• •••</th <td>•/•••٢</td> <td>111/98</td> <td>26/98</td> <td>١</td> <td>١</td> <td>201/08</td> <td>٩۶٧/۵۲</td> <td>AB</td>	•/•••٢	111/98	26/98	١	١	201/08	٩۶٧/۵۲	AB
•/۵۳۶۷	•/1187	۰/۳۹۹۸	•/•711	١	١	•/94•9	٠/٨١٩٠	AC
•/٣•٣۴	•/•778	1/14	۵/۹۳	١	١	۲/۶۷	۲۲۹/۸۳	AD
•/۵۲۴۴	•/8•1•	•/4749	•/7864	١	١	۱/۰۰۰	11/08	BC
•/۶۵Y•	۰/۰۳۸۱	•/ ٢ •۵٢	۵/۱۷	١	١	•/۴۸۳•	7/77	BD
۰/۳۰۶۳	•/987•	1/17	۰/۰۰۷۵	١	١	7/94	۰/۲۹۱۶	CD
•/•••٢	•/•714	74/94	8/8·	١	١	۵۸/۰۰	200/26	\mathbf{A}^2
•/እ9۴۳	•/۴۱۵۷	•/•188	•/Y••A	١	١	۸۴/۵۹	22/10	B ²
• •••</th <td>•/•٧•٢</td> <td>30/94</td> <td>٣/٨٠</td> <td>١</td> <td>١</td> <td>۳۵/۳۱</td> <td>141/22</td> <td>\mathbf{C}^2</td>	•/•٧•٢	30/94	٣/٨٠	١	١	۳۵/۳۱	141/22	\mathbf{C}^2
۰/۰۰۰۵	۰/۰۵۰۸	۱٩/۲۰	۴/۵۱	١	١	40/19	174/00	\mathbf{D}^2

جدول ٣: نتايج تجزيه و تحليل واريانس مدل درجه دوم بهينه سازى الكتروريسي پليمر PAN/ZIF8

معادله (۲)

$$\begin{split} Y_1 = & 195.33 + 19.76A - 14.45B + 1.39C + 16.98D - \\ & 7.78AB - 0.228AC - 3.79AD - 0.831BC - 3.54BD - \\ & 0.135CD - 9.93A^2 + 3.24B^2 - 7.54C^2 + 8.21D^2 \end{split}$$

معادله (۳)

 $Y_{2} = 28.78 - 2.43A - 0.542B - 0.118C +$ 1.51D - 4.17AB - 0.242AC - 0.408AD + 0.250BC + 0.173BD - 0.406CD + 4.73A² -0.128B² - 5.71C² + 4.18D²

^{R²} ضریب همبستگی (r) و مقدار ضریب تعیین R² تغییرات مقادیر مشاهدهشده را نسبت به میانگین دادهها نشان میدهد؛ که هرچه مقدار ضریب تعیین R²، به یک نزدیکتر باشد، تأییدی بر برازش مناسبتر مدل با دادهها

دادههای موجود، نتایج تجزیهوتحلیل واریانس مدل درجه دوم مربوط به بهینهسازی پارامترهای الکتروریسی برای پیشبینی متغیرهای وابسته (میانگین قطر و یکنواختی نانوفیبرها) آورده شده است. در مدل پیشبینی ارائهشده A², BD, AD, AB, D, رمدل پیشبینی ارائهشده برای قطر نانوفیبرها، پارامترهای مانده و سایر پارامترها از مدل کنار گذاشته شدند. همچنین در ارتباط با متغیر A², AB, D, AB, D, معاداه و سایر پارامترها وابسته، یکنواختی نانوفیبرها پارامترهای A, D, AB, D, م وابسته، یکنواختی نانوفیبرها پارامترهای A, D, AB, C ز مدل کنار گذاشته شدند. همچنین در ارتباط با متغیر آن ما به ترتیب در مدل باقی ماندند؛ که معادله ی مربوط به قطر نانوفیبرها (nm) و یکنواختی قطر نانوفیبرها (./) آنها به ترتیب در معادله ی شماره ی (۱) و (۲) ذکر شده است. همچنین در جدول ۴، مقایسه ی بین مقادیر پیشبینیشده توسط مدل و مقادیر مشاهده شده، آورده

عادل جعفری فتع و همکاران

نانوفيبرها (٪)	يكنواختى قطر ا	فيبرها (nm)	میانگین قطر نانو	پارامترهای الکتروریسی				شماره
مقدار مشاهده شده	مقدار پیشبینی شدہ	مقدار مشاهده شده	مقدار پیش بینی شدہ	دبی تزریق(D)	فاصله (C)	ولتاژ (B)	غلظت (A)	آزمایش
۲۷	74	174	١٧٩	۰/۶۵	۱۳	۲۰	۵۰	١
۳۱	۲۹	۱۹۵	۱۹۰	۰/۶۵	۱۳	۱۵	۵۰	۲
۳۷	۳۵	۱۵۲	104	۰/٣	١٨	۲.	٣٠	۲۹

جدول ۴: مقایسه بین مقادیر پیش بینی شده و مقادیر مشاهده شده

عملکرد فیلتراسیونی بسترهای ساختهشده و مقایسه با ماسک جراحی سهلایه ی پزشکی

همانطور که در جدول ۵ آورده شده است، عملکرد فیلتراسیونی بسترهای PAN/ZIF8 که بر روی زیرلایه ی اسپان باند (پلیپروپیلن) ساخته شدهاند، در سرعت سطحی ۱۰ متر بر ثانیه و دامنه ی ذرات بین ۳۰۰ تا ۱۰۰۰ نانومتر مورد بررسی و مقایسه با ماسک سهلایه پزشکی قرار گرفتند.

با توجه به نتایج ذکرشده در جدول ۵، راندمان فیلتراسیون در رنج ۳۰۰ تا ۱۰۰۰ نانومتر ماسک /PAN و ماسک سهلایه ی ZIF8 در مقایسه با ماسک PAN و ماسک سهلایه ی پزشکی عملکرد فیلتراسیونی بهتر (به ترتیب ۵۸/۵۱ ۹۰/۲۱ و ۶۴/۵۳ درصد) و افت فشار کمتر (به ترتیب ۹۰/۲۱ ربه ۲۹/۸۲ و ۵۷/۷۵ پاسکال) را از خود نشان داد؛ که این نتایج، حاکی از این بود که فاکتور کیفیت داد؛ که این نتایج، حاکی از این بود که فاکتور کیفیت معمول این (۱۰۴۸۱ در مقابل ۲۹۰۱ در مقابل معمول است (۱۰۴۸۱ در مقابل ۲۰۵۰ ۲۹۰۱). همچنین معمول است (۱۰۲۰۱ در مقابل ۲۹۰۱ ماسک های ارتقایافته ی ضریب حفاظت محاسبهشده برای ماسکهای ارتقایافته ی معمولی با توجه به راندمان فیلتراسیون آنها، به ترتیب برابر با ۶۷/۱۱ (۶۰ (۲۰

🔳 بحث

در فرایند تولید بسترهای نانوفیبری با استفاده از روش الکتروریسی، عوامل زیادی ازجمله غلظت محلول

است. در مطالعه ی حاضر، مقدار ضریب تعیین و ضریب تعیین و ضریب تعیین تعدیل شده (R_{adj}²) برای متغیر قطر نانوفیبرها به ترتیب برابر با ۰/۸۴۶ ۹۰ و همین طور مقدار این پارامترها برای متغیر یکنواختی قطر نانوفیبرها، به ترتیب برابر با ۸۵۸ ۰۰ ۱۹۷۰ بوده که نشان از اعتبار بالا و مطلوبیت مدل است.

همچنین مقادیر پارامتر آماره F و Pvalue مدل برای متغیر قطر نانوفیبرها، به ترتیب برابر با ۳۳/۳۴ و ۰۰۰۰/> ۹ و برای متغیر یکنواختی نانوفیبرها به ترتیب برابر با ۱۹/۱۹ و ۰۰۰۰/> ۰ بوده که نشان از کفایت این مدل است. همین طور متغیرهای مستقل با بیشترین مقدار F است. همین مقدار G، بهعنوان مهم ترین متغیر تأثیر گذار بر روی متغیر وابسته در نظر گرفته می شود که در این بر روی متغیر وابسته در نظر گرفته می شود که در این آماره F برابر با ۱۸/۱۵۱ و مقدار P کمتر از ۲۰۰۰/۰ و برای متغیر یکنواختی نانوفیبرها با آماره F برابر با ۴۵/۲۲ و مقدار P کمتر از ۱۸۱/۵۱ بهعنوان مهم ترین متغیر در برای متغیر می می مود.

با توجه به نتایج بهدستآمده از نرمافزار آماری Design Expert و همچنین مشاهدات عینی حین بررسی آزمایشات، از میان ۳۰ راهحل پیشنهادی مدل، شرایط بهینه برای الکتروریسی پلیمر PAN/ZIF8، عبارت است: از غلظت محلول الکتروریسی (A) ۷۰ درصد وزنی-حجمی، ولتاژ الکتروریسی (B) ۲۰کیلوولت، فاصله ی سوزن تا جمعآوریکننده (C) ۱۸ سانتیمتر، دبی تزریق پلیمر (D) ۴/۰میلیلیتر در ساعت.

میانگین فاکتور کیفیت (Pa ⁻¹)	میانگین راندمان فیلتراسیون (۳۰۰ nm)	افت فشار اوليه (Pa)	قطر فيبر (nm)	وزن پایه بستر (gr/m²)	تعداد لايه ها	نوع بستر
·/14·1 ± ·/··10	۹۸/۵۱ ± ۰/۴۸	٣1/¥Y ± Y/XW	188/42	۲/۲۱	*SB-SBN-SB	ماسک ار تقاء یافته PAN/ZIF8
			۸۳۲۱	۱۷/۰۶		
•/• ۴ ٨) ± •/••)	9.171 ± .179	$fq/\lambda t \pm f/1q$ $\Delta V/1Y \pm f/f\lambda$	846/14	۲/۲۰	*SB-SBN-SB	ماسک ار تقاء یافته PAN بستر ماسک سه لایه
, , .			٨٢٩۵	۱۷/۱۰		
			٨١٧٨	14/17	زیر لایه اسپان باند زیر لایه ملت بلون (لایه میانی) زیر لایه اسپان باند	
•/• \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \	84/08 ± 8/81		۳۲۵۱	۲۴/۸۳		
			٨٣۵٩	۱۷/۰۷		پرستی
باند	باند– لابه سوم استان	بر روی زیر لایه استان	ترور سے شدہ	به دوم نانوفيير الک	لابه اول اسیان باند– لا	* ماسک با تر تیب

جدول ۵: عملکرد فیلتراسیونی، مشخصات و تعداد لایه ها بسترهای مورد بررسی

پلیمری، ولتاژ الکتروریسی، دبی تزریق، فاصله ی نوک سوزن تا جمعآوریکننده دخالت دارند؛ بنابراین، ضروری است که شرایط بهینه ی این فرایند از طریق آزمایشات و روش های آماری به دست آید.

همانطور که در جدول ۲ نشان داده شده است، بین غلظت پلیمر PAN/ZIF8 و قطر نانوفیبرهای تولیدی، یک ارتباط مستقیم و معنادار وجود دارد؛ که با افزایش در غلظت پلیمر، یک روند صعودی در قطر نانوفیبرهای الکتروریسیشده رخ میدهد. این روند افزایشی در قطر نانوفیبرهای تولیدی، با افزایش در غلظت پلیمر ناشی از افزایش در ویسکوزیته محلول پلیمر است (۲۲)؛ و هرچه میزان ویسکوزیته محلول بالاتر باشد، قدرت میدان مغناطیسی موجود در سرسرنگ برای به حرکت درآوردن سیال کاهش پیدا میکند و همین امر سبب افزایش مدتزمان ماندگاری پلیمر در سرنگ شده که در ادامه، منجر به تشکیل قطرات بزرگتری از پلیمر

در سرسرنگ شده و نهایتاً این قطرات درشتتر، سبب تشکیل نانوفیبرهای با قطر بالاتر می شوند. نتایج مطالعات گذشته نیز نشان داده که افزایش در غلظت پلیمر ناشی از افزایش ویسکوزیته، باعث افزایش قطر نانوفیبرهای تولید شده می شود (۲۴، ۲۴).

PAN/ همچنین کاهش معنادار قطر نانوفیبرهای /PAN ZIF8 با افزایش در ولتاژ الکتروریسی، میتواند ناشی از افزایش بار الکتریکی محلول پلیمری و افزایش سرعت مکش و حرکت پلیمر خارجشده از سرسرنگ به سمت جمعآوریکننده باشد؛ که این روند، باعث تولید نانوفیبرهای با قطر پایین تر میشود (۲۵، ۲۶).

درخصوص افزایش قطر نانوفیبرها در اثر افزایش نرخ تزریق پلیمر، میتوان بیان نمود که افزایش در نرخ تزریق، میتواند منجر به تجمع بیشتر پلیمر در سرسرنگ در یک فاصله ی زمانی مشخص شده و همین امر سبب میشود حجم بیشتری از پلیمر در یک قطاع زمانی مشخص، به

سمت جمع آوری کننده حرکت کند و نهایتاً سبب افزایش قطر نانوفیبرهای تولیدی شود (۱۷). نتایج کسب شده، یک رابطه ی مستقیم بین متغیر فاصله ی الکتروریسی را با قطر نانوفیبرهای نشان داد؛ اما این رابطه، از لحاظ آماری معنادار نبود و این روند افزایشی، در قطر نانوفیبرهای تولیدی با افزایش در فاصله ی الکتروریسی می تواند ناشی از کاهش قدرت میدان الکتریکی، با افزایش فاصله بین نوک سوزن تا جمع آوری کننده باشد. این نتیجه، با نتایج حاصل از مطالعه ی Dring و همکاران (۲۷) نیز هم خوانی دارد.

در ارتباط با رابطه ی بین متغیرهای تأثیرگذار در فرايند الكتروريسي و يكنواختي (درصد ضريب تغييرات قطر نانوفيبرها)، رابطه ی معنادار و غیرمستقیم بین غلظت پلیمر و درصد ضریب تغییرات مشاهده شد؛ که بر اساس مطالعات گذشته با تضعیف نیروی کششی پلیمر در مخروط تیلور، تولید نانو الیاف با قطر بیشتر و ساختار غیریکنواخت با درصد ضریب تغییرات بالاتر را منجر می شود. همچنین ارتباط معنادار و مستقیمی بین نرخ تزریق پلیمر و یکنواختی است که با افزایش در نرخ تزریق پلیمر، منجر به تولید نانوفیبرهای با درصد ضريب تغييرات بالاتر و يكنواختى كمتر مىشود كه می تواند به علت افزایش چگالی بار به دلیل کاهش نرخ تزریق پلیمر در سرسرنگ باشد؛ و منجر به تقویت نیروی الکترواستاتیک در سر نازل پلیمر و افزایش یکنواختی نانوفیبرهای الکتروریسی شده شود (۱۷، ۲۸). همچنین تجزيهوتحليل واريانس و مدلسازی تأثير پارامترهای الکتروریسی بر روی متغیرهای پاسخ، نشان داد که مدلهای درجه دوم (Quadratic) ایجادشده، نتایج مناسب و قابل تأییدی برای پیشبینی اثرات انفرادی و تعاملي پارامترهاي مختلف الكتروريسي (غلظت پليمر، ولتاژ الكتروريسي، دبي تزريق پليمر و فاصله الكتروريسي) بر روی متغیرهای پاسخ (میانگین قطر و یکنواختی نانوفيبرها) ارائه مىدهد. نتايج ارائه شده در جدول ۴ كه مقایسه ی مقادیر مشاهدهشده و مقادیر پیشبینی شده توسط مدل ها است نیز نشان دهنده ی این بود که تفاوت

در مقادیر مشاهده شده و پیش بینی شده توسط مدل، کمتر از ۵ درصد است که خود حاکی از اعتبار بالای مدل و توانایی آن در پیش بینی قطر و یکنواختی نانوفیبرهای PAN/ZIF8 و نزدیکی آن به مقادیر واقعی است.

مقایسه ی نتایج حاصل از عملکرد فیلتراسیون بسترهای PAN ،PAN/ZIF8 و ماسک سه لایه ی معمول، نشان داد که بسترهای PAN/ZIF8، بالاترین و ماسک سەلايە ى معمول، كمترين راندمان فيلتراسيونى را داشتهاند؛ که این یافته، میتواند ناشی از کمتر بودن قطر نانوفیبرهای بستر PAN/ZIF8 در مقایسه با بستر PAN باشد؛ زيرا وجود ZIF8 در محلول پليمر، باعث بالا رفتن کشش سطحی محلول الکتروریسی شده و سبب می شود تا حجم پلیمر کمتری در یک قطاع زمانی ثابت به سمت جمع آوری کننده حرکت کرده و نهایتاً منجر به کاهش قطر الیاف تولیدی و افزایش عملکرد فیلتراسیونی شود. همچنین نانوفیبرها از طریق ایجاد یک جریان لغزشی، باعث كاهش مقاومت جريان هوا شده؛ كه نهايتاً منجر به کاهش افت فشار نهایی ماسک می شود (۲۹). همچنین با توجه به این موضوع که یکی از مکانیسمهای جذب ذرات بر اساس برهمکنش الکترواستاتیک و اختلاف پتانسیل بین نانوفیبرها و ذرات است، عدم توانایی در فراهم كردن بار مثبت توسط ZIF8، مى تواند منجر به افزايش برهمكنش الكترواستاتيك و افزايش اختلاف يتانسيل بين نانوفيبرها و ذرات شده و نهايتاً مى تواند دليلى بر راندمان فیلتراسیونی بالاتر بستر حاوی ZIF8 باشد (۳۰، ۳۱).

مقایسه ی عملکرد فیلتراسیونی بسترهای نانوفیبری ساخته شده، نشان داد که این بسترها با وجود وزن پایه ی کمتر نسبت به ماسکهای سه لایه ی پزشکی، از راندمان فیلتراسیونی بالاتر، افت فشار کمتر و درنهایت فاکتور کیفیت بهتر برخوردار بودند. در مطالعه ی حاضر، با توجه به بهینه سازی فرایند الکتروریسی و دستیابی به نانوفیبرهای با قطر پایین تر نسبت به بسترهای معمول، راندمان فیلتراسیونی بالای ۹۸ درصد در سایز ذرات راندمان فیلتراسیونی بالای ۹۸ درصد در سایز درات راندمان فیلتراسیونی بالای ۹۸ درصد در سایز درات راندمان فیلتراسیونی بالای ۹۸ درصد در سایز درات راندمان فیلتراسیون بستر با افزایش در سایز ذرات، روند

صعودی دارد؛ تا جایی که در ذرات با قطر ۱۰۰۰ نانومتر، مقدار آن به بیش از ۹۹/۵ درصد رسید. این یافتهها، در انطباق با نتایج دیگر مطالعات انجامشده در گذشته است که عملکرد فیلتراسیونی بالاتر بسترهای نانوفیبری را علیرغم وزن پایه ی کمتر نسبت به تجهیزات حفاظت تنفسی موجود تأیید میکنند (۳۲)؛ بهعنوان نمونه، Shanshan و همکاران، دریافتند که با افزایش چارچوب آلی-فلزی نقره و نانو کریستالهای ZIF8 بر روی بسترهای سلولزی، میتوان به راندمان فیلتراسیونی بهمراتب بالاتر از بسترهای سلولزی خالص دست یافت (۳۲).

همچنین در مقایسه با ماسکهای سهلایه ی معمول مورد استفاده در بحث مقابله با اپیدمی کرونا، ماسک PAN/ZIF8، از ضریب حفاظت ۲۴ برابری نسبت به ماسکهای سهلایه برخوردار بوده و با توجه به این موضوع که سایز آئروسلهای ویروس کرونا در رنج ۳۰۰ نانومتر است، راندمان فیلتراسیونی بالای ۹۸ درصدی ماسکهای ارتقایافته در این رنج از سایز ذرات، میتواند دلیلی معتبر بر حفاظت مناسب این ماسکها باشد و استفاده از آنها برای بالا بردن سطح حفاظت افراد بهویژه کادر درمان و سلامت، در مقابله با اپیدمی کرونا میتواند کاربردی باشد.

🔳 نتيجه گيرى

با توجه به نتایج حاصل از این مطالعه، در ارتباط با بهینهسازی فرایند الکتروریسی بسترهای PAN/ZIF8،

chitosan Nanofiber Media. Journal of Occupational Hygiene Engineering. 2021;8(3):67-73.

- Cramariuc B, Cramariuc R, Scarlet R, Manea LR, Lupu IG, Cramariuc O. Fiber diameter in electrospinning process. J Electrostat. 2013;71(3):189-98.
- Eby DM, Luckarift HR, Johnson GR. Hybrid antimicrobial enzyme and silver nanoparticle coatings for medical instruments. ACS Appl Mater Interfaces. 2009;1(7):1553-60.
- Zhou H-C, Long JR, Yaghi OM. Introduction to metalorganic frameworks. ACS Publications; 2012. p. 673-4.
- 8. Farrusseng D. Metal-organic frameworks: applications

این قابلیت را به ما میدهد که با ایجاد تغییر در متغیرهای دخیل در فرایند الکتروریسی، بسترهای فیلتراسیونی با قابلیت دلخواه از نظر مورفولوژی تولید کرد؛ و مدلهای تجربی توسعهیافته در این مطالعه، میتوانند جهت گیری را برای آزمایشهای بعدی برای تشکیل و تولید نانوفیبرهای یکنواخت و پیوسته با قطر مورد نظر فراهم کنند. همچنین نتایج حاصل، نشان داد که بسترهای ساختهشده، از عملکرد فیلتراسیونی بالا جهت استفاده در تجهیزات حفاظت تنفسی برخوردار هستند و میتوانند حفاظت بسیار بالاتری را نسبت به ماسکهای معمول مورد استفاده در مقابله با اپیدمی کرونا ایجاد نمایند.

🔳 تشکر و قدردانی

این مقاله، برگرفته از پایاننامه ی کارشناسی ارشد مهندسی بهداشت حرفهای به شماره ی ۱۴۰۰۰۴۲۹۳۶۳۴ انجام شده است. بدینوسیله، نویسندگان این مقاله، از کارکنان و متخصصان محترم دانشگاه علوم پزشکی همدان، به دلیل همکاری ارزشمندشان در انجام این تحقیق، کمال تشکر و قدردانی را دارند.

🔳 تضاد منافع

بدینوسیله، نویسندگان تصریح مینمایند که هیچگونه تضاد منافعی درخصوص مطالعه ی حاضر وجود ندارد.

\equiv **REFERENCES**

- Khan I, Saeed K, Khan I. Nanoparticles: Properties, applications and toxicities. Arab J Chem. 2019;12(7):908-31.
- Saud B, Paudel G. The threat of ambient air pollution in Kathmandu, Nepal. J Environ Public Health. 2018;2018:1-9.
- Chua MH, Cheng W, Goh SS, Kong J, Li B, Lim JY, et al. Face masks in the new COVID-19 normal: materials, testing, and perspectives. Research. 2020;2020:1-31.
- 4. Habibi Mohraz M, Golbabaei F, Je Yu I. Evaluation of Antibacterial Properties of Electrospun Polyurethane-

from catalysis to gas storage: John Wiley & Sons; 2011.

- Wang C, Zheng T, Luo R, Liu C, Zhang M, Li J, et al. In situ growth of ZIF-8 on PAN fibrous filters for highly efficient U (VI) removal. ACS Appl Mater Interfaces. 2018;10(28):24164-71.
- Li N, Zhou L, Jin X, Owens G, Chen Z. Simultaneous removal of tetracycline and oxytetracycline antibiotics from wastewater using a ZIF-8 metal organicframework. J Hazard Mater. 2019;366:563-72.
- Zhou L, Li N, Owens G, Chen Z. Simultaneous removal of mixed contaminants, copper and norfloxacin, from aqueous solution by ZIF-8. Chem Eng J. 2019;362:628-37.
- Zhang L, Aboagye A, Kelkar A, Lai C, Fong H. A review: carbon nanofibers from electrospun polyacrylonitrile and their applications. J Mater Sci. 2014;49(2):463-80.
- Sundarrajan S, Tan KL, Lim SH, Ramakrishna S. Electrospun nanofibers for air filtration applications. Procedia Eng. 2014;75:159-63.
- Podgórski A, Bałazy A, Gradoń L. Application of nanofibers to improve the filtration efficiency of the most penetrating aerosol particles in fibrous filters. Chem Eng Sci. 2006;61(20):6804-15.
- He M, Yao J, Liu Q, Wang K, Chen F, Wang H. Facile synthesis of zeolitic imidazolate framework-8 from a concentrated aqueous solution. Microporous Mesoporous Mater. 2014;184:55-60.
- Yang Y, Jia Z, LiuJ, Li Q, Hou L, Wang L, et al. Effect of electric field distribution uniformity on electrospinning. J Appl Phys. 2008;103(10):104307.
- Mohraz M, Golbabaei F, Yu I, Mansournia M, Zadeh A, Dehghan S. Preparation and optimization of multifunctional electrospun polyurethane/chitosan nanofibers for air pollution control applications. International Journal of Environmental Science and Technology. 2019;16(2):681-94.
- Nasouri K, Shoushtari AM, Mojtahedi MRM. Evaluation of effective electrospinning parameters controlling polyvinylpyrrolidone nanofibers surface morphology via response surface methodology. Fibers Polymers. 2015;16(9):1941-54.
- 19. Jung H, Kim J, Lee S, Lee J, Kim J, Tsai P, et al. Comparison of filtration efficiency and pressure drop in anti-yellow sand masks, quarantine masks, medical masks, general masks, and handkerchiefs. Aerosol Air

Qual Res. 2014;14(3):991-1002.

- Duncan S, Bodurtha P, Naqvi S. The protective performance of reusable cloth face masks, disposable procedure masks, KN95 masks and N95 respirators: Filtration and total inward leakage. PLoS One. 2021;16(10):e0258191.
- Clayton M, Bancroft B, Rajan B. A review of assigned protection factors of various types and classes of respiratory protective equipment with reference to their measured breathing resistances. Ann Occup Hyg. 2002;46(6):537-47.
- 22. Fallahiarezoudar E, Ahmadipourroudposht M, Idris A, Yusof NM. Optimization and development of Maghemite (γ-Fe2O3) filled poly-L-lactic acid (PLLA)/ thermoplastic polyurethane (TPU) electrospun nanofibers using Taguchi orthogonal array for tissue engineering heart valve. Materials Science and Engineering: C. 2017;76:616-27.
- Srivastava Y, Marquez M, Thorsen T. Multijet electrospinning of conducting nanofibers from microfluidic manifolds. J Appl Polym Sci. 2007;106(5):3171-8.
- Abdelhady SS, Zoalfakar SH, Agwa M, Ali AA. Electrospinning process optimization for Nylon 6, 6/ Epoxy hybrid nanofibers by using Taguchi method. Mater Res Express. 2019;6(9):095314.
- 25. Hasanzadeh M, Hadavi Moghadam B, Moghadam Abatari M, Haghi A. On the production optimization of polyacrylonitrile electrospun nanofiber. Bulgarian Chemical Communications. 2013;45:178-90.
- 26. Keranov IL, Michel M, Kostadinova A, Toniazzo V, Ruch D, Vladkova T. Poly (N-Vinyl Pyrrolidone-b-Dimethylsiloxane) electrospun nanofibers: preparation, characterization and biological response. 2013.
- Ding B, Wang M, Wang X, Yu J, Sun G. Electrospun nanomaterials for ultrasensitive sensors. Materials Today. 2010;13(11):16-27.
- Pillay V, Dott C, Choonara YE, Tyagi C, Tomar L, Kumar P, et al. A review of the effect of processing variables on the fabrication of electrospun nanofibers for drug delivery applications. J Nanomater. 2013;2013.
- Mei Y, Wang Z, Li X. Improving filtration performance of electrospun nanofiber mats by a bimodal method. J Appl Polym Sci. 2013;128(2):1089-94.
- 30. Mohamed AM, Moncho S, Krokidas P, Kakosimos

بهينه سازى فرايند الكتروريسى بسترهاى نانوفيبرى چند منظوره PAN/ZIF8 ...

K, Brothers EN, Economou IG. Computational investigation of the performance of ZIF-8 with encapsulated ionic liquids towards CO2 capture. Mol Phys. 2019;117(23-24):3791-805.

- Yang C-F, Tian D, He J-H. Preparation of a Cu-Btc/Pan electrospun film with a good air filtration performance. Thermal Science. 2021;25:1469-75.
- 32. Kang HK, Oh HJ, Kim JY, Kim HY, Choi YO. Effect

of Process Control Parameters on the Filtration Performance of PAN–CTAB Nanofiber/Nanonet Web Combined with Meltblown Nonwoven. Polymers (Basel). 2021;13(20):3591.

33. Ma S, Zhang M, Nie J, Tan J, Yang B, Song S. Design of double-component metal–organic framework air filters with PM2. 5 capture, gas adsorption and antibacterial capacities. Carbohydr Polym. 2019;203:415-22.