

ORIGINAL RESEARCH PAPER

Feasibility Study of Using PDLLA Polymer in the Production of Biodegradable Nanofibrous Media for Capturing Particulate Air Pollutants

Azam Biabani¹, Roohollah Bagherzadeh², Saba Kalantary¹, Abbas Rahimi Foroushani³, Farideh Golbabaei^{1*}

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

²Advanced Fibrous Materials Lab (AFM-LAB), Institute for Advanced Textile Materials and Technology, Amirkabir University of Technology (Tehran Polytechnic), Tehran, Iran.

³Department of Epidemiology and Biostatistics, School of Public Health, Tehran University of Medical Sciences, Tehran, Iran.

Received: 31-8-2025

Accepted: 3-5-2026

ABSTRACT

Introduction: Air filters are often made from non-biodegradable substrates, which can lead to significant environmental pollution. Therefore, the use of biodegradable polymers in the development of filtration media is of particular importance. The aim of the present study was to fabricate and evaluate a PDLLA nanofibrous substrate for the adsorption of airborne particulate matter.

Material and Methods: This experimental research was conducted in the Occupational Health Laboratory, School of Public Health, Tehran University of Medical Sciences. The optimal electrospinning conditions for the PDLLA nanofibrous substrate were determined based on a review of previous literature. Subsequently, its filtration efficiency in removing PM0.3, PM0.5, PM1, and PM3 particles was investigated. Tests were performed at three airflow rates: 1.67, 5.3, and 14.16 cm/s, using an FT200PS device. Furthermore, to assess performance stability in humid environments, samples were exposed to relative humidity levels of 75±5% and 55±5% for 30 minutes. The data were analyzed using the Bonferroni post-hoc test within a one-way ANOVA framework.

Results: The optimal electrospinning conditions were obtained at a concentration of 16%, a voltage of 20 kV, an injection rate of 0.5 ml/h, and a tip-to-collector distance of 17 cm. The results showed that the filtration efficiency for PM0.5, PM1, and PM3 particles was consistently above 98%. For PM0.3 particles, the efficiency was over 99% at a velocity of 1.67 cm/s, but it decreased to approximately 96% with an increase in flow velocity to 14.16 cm/s. The quality factor for PM1 and PM3 decreased from 0.529 pa⁻¹ to 0.038 pa⁻¹, and for PM0.3, it decreased from 0.22 pa⁻¹ to 0.011 pa⁻¹. Also, humidity had a slight effect on the filtration of PM0.5, but for PM0.3, a decrease in efficiency was evident.

Conclusion: The PDLLA nanofibrous substrate, under optimal conditions, demonstrated very high efficiency in filtering fine particles, particularly PM1 and PM3. However, increasing the airflow velocity led to a decrease in the quality factor, and the substrate's performance was more limited when encountering very fine PM0.3 particles and high humidity.

Keywords: Nanofibers, Biodegradable, Filtration, Poly-D-L-Lactic Acid

HOW TO CITE THIS ARTICLE

Biabani A., Bagherzadeh R., Kalantary S., Rahimi Foroushani A., Golbabaei F. Feasibility Study of Using PDLLA Polymer in the Production of Biodegradable Nanofibrous Media for Capturing Particulate Air Pollutants. *J Health Saf Work*. 2026; 16(1): 23-42.

* Corresponding Author Email: fgolbabaei@tums.ac.ir

Copyright © 2026 The Authors.

Published by Tehran University of Medical Sciences

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

1. INTRODUCTION

Air pollution, particularly particulate matter (PM) such as PM_{2.5} and PM₁, poses a severe threat to public health, ecosystems, and economies. These fine particles can enter the bloodstream, increasing the risk of serious diseases such as lung cancer and cardiovascular conditions. Consequently, controlling air pollution and managing air quality is a critical necessity. Air filtration, especially using fibrous and nanofiber filters, is a key solution. Nanofiber filters offer superior performance due to their unique properties. A major challenge with conventional filters is their non-biodegradability and the resulting waste. In contrast, biodegradable nanofiber filters, made from materials such as polylactic acid (PLA), are environmentally friendly and provide excellent filtration. Electrospinning is a common technique for producing these nanofibers. Accordingly, this study focuses on optimizing biodegradable nanofiber filters made from PDLLA (a type of PLA) by evaluating their particle capture efficiency and pressure drop under various conditions, paving the way for sustainable air filters.

2. MATERIAL AND METHODS

This study is an in-lab experimental investigation conducted to fabricate and evaluate the performance of a biodegradable Nano fibrous scaffold made of the polymer PDLLA, with the aim of capturing fine particles. First, polymer solutions were prepared using different weight percentages, and then nanofibers were produced

via the electrospinning process. The optimal electrospinning conditions were determined, and the various device parameters were optimized. Table 1 presents the optimized electrospinning conditions used in this study.

Next, the morphological and chemical characteristics of the nanofibers were examined using scanning electron microscopy (SEM) and FTIR spectroscopy. Finally, the performance of the scaffolds in terms of filtration efficiency, pressure drop, and quality factor under different conditions (particle size, airflow velocity, and humidity) was evaluated, and the data were statistically analyzed using SPSS software. The layout and components of the experimental setup used in this study to assess the filtration performance of PDLLA nanofibers under different airflow and humidity conditions are schematically shown in Figure 1.

3. RESULTS AND DISCUSSION

The experimental results provide a comprehensive understanding of the relationship between polymer concentration, fiber morphology, environmental conditions, and filtration efficiency of the electrospun PDLLA nanofiber media. The optimization of electrospinning parameters led to the successful fabrication of uniform fibers, which directly influenced the performance of the filter media in capturing airborne particulate matter.

Fiber morphology and structure: SEM analysis (Figure 2) revealed that at lower polymer concentrations (4% and 8%), fibers exhibited bead-on-string morphologies, which are typically

Table 1: Electrospinning process parameters

Electrospinning time	Collector rotation speed	Tip-to-collector distance	Rate injection	voltage	Electrospinning temperature	Polymer concentration
2 h	100RPM	17 cm	0.5 ml/h	20 KV	22°C	16%

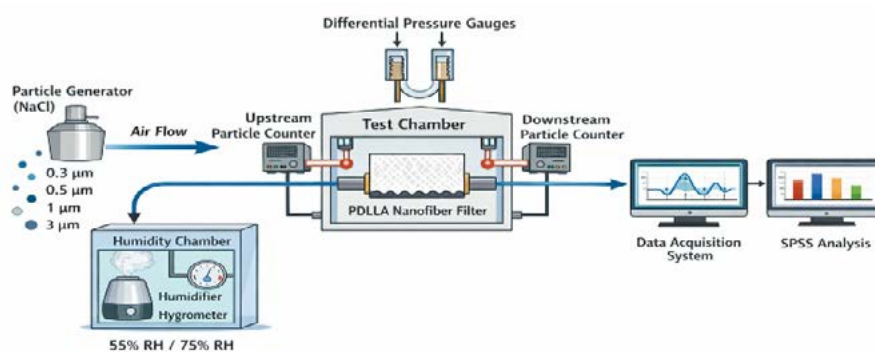


Fig. 1: Schematic of the experimental setup used for evaluating the filtration performance of PDLLA nanofibers.

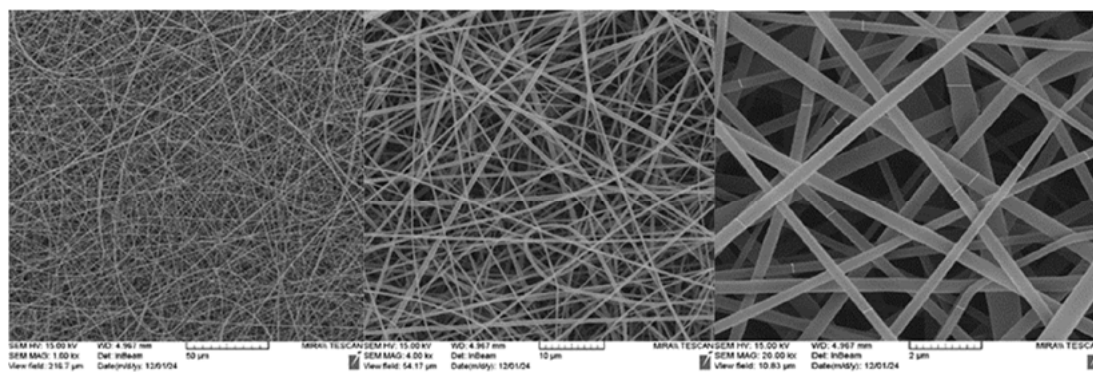


Fig. 2: SEM images obtained from electrospun PDLLA media under optimal conditions.

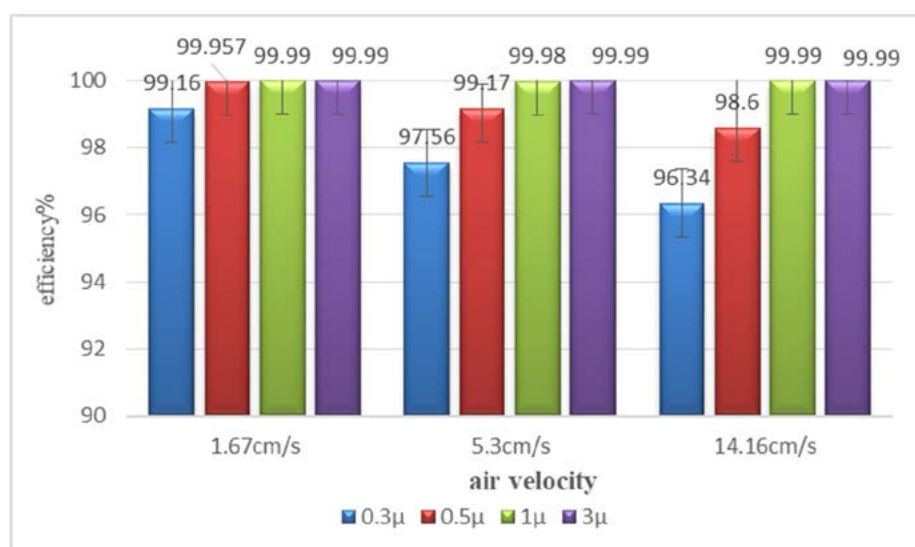


Fig. 3: Efficiency of particle capture of 0.3, 0.5, 1 and 3 μm size at three air velocity levels by PDLLA polymer media

associated with insufficient chain entanglement. Such structures decrease effective filtration performance due to the presence of large voids. At concentrations above 20%, however, fiber merging and irregular shapes were observed, leading to reduced porosity and increased resistance to airflow. The optimized concentration of 16% produced defect-free nanofibers with an average diameter of 375 ± 126 nm. The uniformity of these fibers created a high surface-to-volume ratio and fine pore structure, which are critical for efficient particle capture.

Filtration efficiency and dependence on particle size and air flow rate: Filtration efficiency was tested against different particle sizes, including PM0.3, PM0.5, PM1 and PM3. The nanofiber media achieved efficiencies of over 99% for PM1

and PM3, while PM0.3 showed lower efficiencies, especially at higher flow rates. This phenomenon is consistent with theoretical filtration mechanisms, as PM0.3 particles fall within the “most permeable particle size” (MPPS) range, where neither inertial deposition nor diffusion mechanisms dominate. For larger particles (PM1 and PM3), inertial deposition and adsorption remained effective, ensuring consistently high efficiencies. In addition, it was found that air flow rate significantly affected the filtration efficiency of submicron particles. At lower air flows (10 L/min), particles had longer residence times in the filter, enabling higher adsorption efficiencies. Conversely, at higher airflow (85 l/min), the efficiency for PM0.3 and PM0.5 decreased by 8%, as shown in Fig. 3. However, the efficiency for PM1 and PM3 remained constant above 99%. This

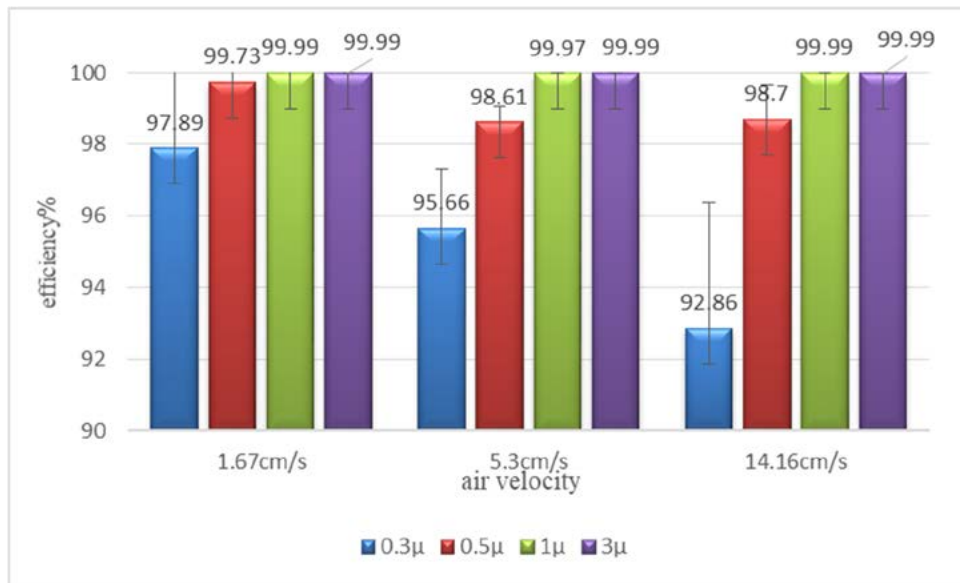


Fig. 4: Efficiency of particle removal of 0.3, 0.5, 1 and 3 μm size at three air flow velocity levels at 55% humidity by PDLLA polymer media

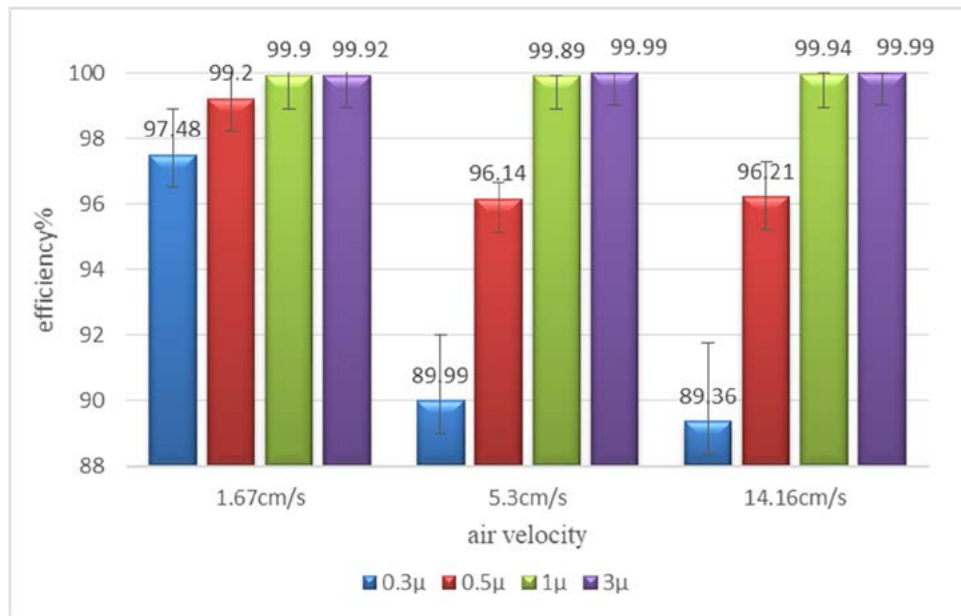


Fig. 5: Efficiency of particle removal of 0.3, 0.5, 1 and 3 μm size at three air flow velocity levels at 75% humidity by PDLLA polymer media

indicates that optimization of the filter medium is particularly important for situations where fine particle capture is required under high flow, such as high-capacity air purification systems.

Humidity effects: The effect of humidity on particle capture efficiency at different air flow

velocity levels was also investigated, and the results are shown in Figs. 4 and 5. Under humid conditions, the media was able to maintain its high efficiency for larger PM1 and PM3 particles, but for very fine particles (PM0.3), a significant decrease in efficiency was observed with increasing humidity.

Overall performance and quality factor: When combining efficiency and pressure drop into a single parameter, the quality factor (QF), the PDLLA nanofiber media showed superior performance for particles larger than 0.5 μm under both dry and humid conditions. However, for PM0.3 particles, QF decreased under high humidity and airflow, highlighting the necessity for material modifications or hybrid structures (e.g., multilayer filters or incorporation of functional nanoparticles) to further enhance performance.

4. CONCLUSIONS

This study was conducted with the aim of preparing a biodegradable PDLLA-based nanofiber mat for the capture of airborne particulate matter. The results showed that the fabricated mat, under optimal electrospinning process conditions, has high efficiency in collecting particles of various sizes. In particular, it exhibited excellent performance for PM1 and PM3 particles and was able to maintain its desirable performance even under humid conditions. The filtration efficiency of sub-micron particles, especially PM0.3

and PM0.5, is affected by airflow velocity and humidity; thus, increasing the speed or humidity leads to a decrease in efficiency and an increase in pressure drop. These findings indicate that the design and optimization of nanofiber mats should be carried out considering the environmental conditions and the target particle size. Overall, the PDLLA mat can be considered a suitable option for particulate filtration under diverse environmental conditions; however, for very fine particles, further investigations are needed to ensure optimal performance across the entire particle size range.

5. ETHICAL CODE

This research was approved by Tehran University of Medical Sciences (ethics code: IR.TUMS.SPH.REC.1402.250).

6. FUNDING

This work was financially supported by Tehran University of medical science, which provided laboratory facilities, materials, and technical assistance.

امکان سنجی استفاده از پلیمر PDLLA در تولید بستر نانولیفی زیست تخریب پذیر جهت ربایش آلاینده های ذره ای هوا

اعظم بیابانی^۱، روح اله باقرزاده^۲، صبا کلانتری^۱، عباس رحیمی فروشانی^۲، فریده گلبابایی^{۳*}

^۱گروه مهندسی بهداشت حرفه ای و ایمنی کار، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی تهران، تهران، ایران
^۲پژوهشکده مواد و فناوری پیشرفته نساجی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)، ایران
^۳گروه اپیدمیولوژی و آمار حیاتی، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی تهران، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۶/۹، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۲/۱۳

چکیده

مقدمه: فیلترهای هوا در بسیاری از موارد از بسترهای غیر قابل تجزیه زیستی ساخته می شوند که منجر به آلودگی های محیطی گسترده می گردد. لذا استفاده از پلیمرهای زیست تخریب پذیر در توسعه بستر فیلتراسیون اهمیت ویژه ای دارد. هدف مطالعه حاضر، تولید و ارزیابی بستر نانولیفی PDLLA برای ربایش ذرات معلق موجود در هوا بود.

روش کار: این پژوهش تجربی در آزمایشگاه بهداشت حرفه ای دانشکده بهداشت دانشگاه علوم پزشکی تهران انجام شد. شرایط بهینه الکتروریسی بستر نانولیفی PDLLA با مرور مقالات پیشین تعیین و سپس کارایی فیلتراسیون آن در حذف ذرات $PM_{0.3}$ ، $PM_{0.5}$ ، PM_1 و $PM_{2.5}$ بررسی شد. آزمون ها در سه سرعت جریان هوا برابر ۱،۶۷، ۵،۳ و ۱۴،۱۶ cm/s با استفاده از دستگاه FT۲۰۰PS انجام گرفت. همچنین، جهت بررسی پایداری عملکرد در محیط مرطوب، نمونه ها به مدت ۳۰ دقیقه در شرایط رطوبت نسبی $5 \pm 75\%$ و $5 \pm 55\%$ قرار داده شدند. داده ها با آزمون آماری ANOVA Bonferroni تحلیل شدند.

یافته ها: شرایط بهینه الکتروریسی شامل غلظت ۱۶٪، ولتاژ ۲۰ kV، نرخ تزریق ۰.۵ ml/h و فاصله سوزن تا جمع کننده ۱۷ cm به دست آمد. نتایج نشان داد که کارایی فیلتراسیون برای ذرات $PM_{0.5}$ ، PM_1 و $PM_{2.5}$ همواره بالاتر از ۹۸٪ بود. برای ذرات $PM_{0.3}$ ، کارایی در سرعت ۱۶،۶۷ cm/s بیش از ۹۹٪ بود، اما با افزایش سرعت جریان تا ۱۴،۱۶ cm/s این مقدار به حدود ۹۶٪ کاهش یافت. فاکتور کیفیت برای PM_1 و $PM_{2.5}$ از 5.29×10^{-1} به 0.38×10^{-1} و برای $PM_{0.3}$ از 0.22×10^{-1} به 0.11×10^{-1} کاهش نشان داد. همچنین، رطوبت اثر اندکی بر فیلتراسیون $PM_{0.5}$ داشت، ولی در مورد $PM_{0.3}$ کاهش کارایی مشهود بود.

نتیجه گیری: بستر نانولیفی PDLLA در شرایط بهینه توانست کارایی بسیار بالایی در فیلتراسیون ذرات ریز، به ویژه PM_1 و $PM_{2.5}$ ، نشان دهد. با این حال، افزایش سرعت جریان هوا موجب کاهش فاکتور کیفیت گردید و عملکرد بستر در مواجهه با ذرات بسیار ریز $PM_{0.3}$ و رطوبت بالا محدودتر بود.

کلمات کلیدی: نانولیف، زیست تخریب پذیر، فیلتراسیون، پلی دی ال لاکتیک / اسید

* پست الکترونیکی نویسنده مسئول مکاتبه: fgolbabaei@tums.ac.ir

مقدمه

آلودگی هوا یک موضوع مهم زیستی است که اکوسیستم، اقتصاد و سلامت عمومی را به خطر می اندازد (۲، ۱). درمیان آلاینده های هوا ذرات معلق (PM) یکی از مهم ترین نگرانی های زیست محیطی در نظر گرفته شده است (۳). ذرات معلق ناشی از صنعتی شدن و شهرنشینی تأثیر شدیدی بر طبیعت و سلامت انسان دارند مخصوصاً، ذرات کوچکی مانند $PM_{2.5}$ و PM_{10} که هر ساله با مرگ میلیون ها انسان همراه هستند زیرا می توانند به عمق ریه ها نفوذ کنند و حتی به جریان خون بروند و میزان بالاتری از خطر ابتلا به سرطان ریه و بیماری های قلبی عروقی را تحمیل کنند (۴). بنابراین با توجه به افزایش نگرانی های جهانی در مورد سطوح هشداردهنده آلودگی ذرات معلق و همچنین آسیب جدی ناشی از آلودگی هوا به بدن انسان موضوع کنترل آلودگی هوا و مدیریت کیفیت هوای پایدار به یک نیاز ضروری تبدیل شده که باید حل گردد. (۵)، یکی از بهترین راه حل ها برای کاهش مواجهه انسان با آلاینده ها فیلتراسیون و تصفیه هوا می باشد (۷). به طور کلی، بسترهای فیلتراسیون هوا را می توان بر اساس ساختار و مکانیزم عملکرد به دسته های مختلفی طبقه بندی کرد؛ با این حال، فیلترهای لیفی منسوج به عنوان رایج ترین و پرکاربردترین بسترهای فیلتراسیون در تصفیه آلاینده های هوا شناخته می شوند و سهم عمده ای از کاربردهای فیلتراسیون هوایی در بخش های تهویه مطبوع، صنعتی و مصرفی را به خود اختصاص داده اند (۸). فیلترهای لیفی به دلیل مقرون به صرفه بودن، وزن کم و استفاده آسان به طور گسترده در دستگاه های مختلف فیلتر هوا نظیر سیستم های تصفیه هوای داخلی، فیلترهای اگزوز خودرو و ماسک ها بکار می روند (۹). ویژگی های منحصر به فرد فیلترهای نانولیفی در مقایسه با فیلترهای میکرو لیفی، مانند مورفولوژی قابل کنترل، تخلخل قابل تنظیم و نسبت سطح به حجم زیاد، آن ها را قادر می سازد تا عملکرد فوق العاده ای در فیلتراسیون داشته باشند (۱). در بحث فیلتراسیون هوا چندین پارامتر حائز اهمیت

می باشد که مهم ترین آن ها شامل کارایی، افت فشار و فاکتور کیفیت می باشند ولیکن علاوه بر اینها با توجه به نوع کاربرد فیلتر پارامترهای دیگری نیز در طراحی آن ها حائز اهمیت می باشد که می توان به زیست تجزیه پذیری اشاره نمود (۱، ۱۰). مطالعات نشان داده است ترکیبات استفاده شده در ساخت فیلترهای هوای معمول و سنتی تهیه شده از پلیمرهای تجزیه ناپذیر یا الیاف شیشه ای چالش های بزرگی را برای حفاظت از محیط زیست ایجاد می کنند؛ علاوه براین ماسک های پزشکی نیز غالباً یکبار مصرف بوده و درعین حال از مواد غیرقابل تجزیه ساخته شده اند که باعث نگرانی جدی زیست محیطی و تولید زباله های پلاستیکی می شوند (۴، ۱۱، ۱۲). لذا می توان در تهیه فیلترهای هوا از موادی با خاصیت زیست تخریب پذیری بالا استفاده نمود تا در طبیعت تجزیه پذیر باشند. فیلترهای نانو لیفی تجزیه پذیر که توجه زیادی را به خود جلب کرده اند می توانند شامل الیاف طبیعی مانند کیتوزان و سلولز، الیاف مصنوعی مانند پلی وینیل الکل و پلی لاکتیک اسید و همچنین ترکیبی از آن ها باشند (۱). پلی لاکتیک اسید یک پلی استر آلیفاتیک معروف، زیست سازگار و زیست تخریب پذیر است که قابلیت پردازش و تجدید پذیری دارد و در سالیان متمادی، به دلیل خواص برجسته آن نسبت به سایر پلیمرهای رایج، در زمینه زیست پزشکی و فیلتراسیون هوا مورد استفاده قرار گرفته است (۴، ۱۳-۱۵). چهار ماکرومولکول متمایز و کایرال را می توان از دو ایزومر اسید لاکتیک، یعنی اسیدهای L-لاکتیک و D-لاکتیک تهیه کرد که در این میان دو ماکرو مولکول PLLA و PDLLA توجه ویژه ای را در کاربردهای زیست پزشکی بخود اختصاص داده اند. با این وجود PDLLA به دلیل ماهیت آمورف خود مشخصات تخریب درون تنی سریع تر و قابل کنترل تری نسبت به PLLA، که معمولاً نیمه بلوری است، نشان می دهد (۱۶). یکی از کاربردهای این نوع پلیمر تهیه بسترهای نانو لیف می باشد که توسط روش الکتروریسی قابل پردازش می باشد (۴، ۱۷). روش الکتروریسی بهترین و پذیرفته ترین

مدنظر گردید. شرایط مناسب دستگاهی الکترورسی نیز با استفاده از انجام آزمون و خطاهای متعدد و بررسی ویژگیها و شرایط فیزیکی و ظاهری نانوالیاف تولیدی در حین الکترورسی

مشخص گردید. در نهایت عملکرد بستر تولیدی تحت شرایط محیطی مختلف مورد بررسی قرار گرفته و با استفاده از نرم افزار SPSS مورد آزمون آماری قرار گرفت.

مطالعه پلیمرهای مختلف با قابلیت تجزیه زیستی و انتخاب پلیمر هدف

مطالعات نشان داد محبوبترین و مهمترین پلیمرهای زیست تخریب پذیر، پلی استرهای آلیفاتیک مانند پلی لاکتیک اسید (PLA)، پلی کاپرولاکتون (PCL)، پلی (۳-هیدروکسی بوتیرات) (PHB) و همچنین پلی دی ال لاکتیک اسید (PDLLA) هستند (۱۹) که برخی از خصوصیات آنها در جدول ۱ ارائه گردیده است. با توجه به بررسی صورت گرفته در رابطه با پلیمرهای مذکور در نهایت پلیمر PDLLA به دلیل زیست تخریب پذیری مناسب، فرآیندپذیری مطلوب در الکترورسی، انعطاف پذیری بالاتر از PLA و خواص مکانیکی متعادل تر نسبت به سایر پلیمرهای زیست تخریب پذیر، به عنوان گزینه ی بهینه برای بستر نانولیفی انتخاب گردید.

آماده سازی محلول پلیمری و انجام فرآیند الکترورسی

پلیمر PDLLA (poly DL-lactic acid) با وزن مولکولی ۷۲/۰۶ و فرمول شیمیایی $(C_3H_4O_2)_n$ ، حلال شیمیایی دی کلرومتان (Dichloromethane) با جرم مولکولی ۸۴/۹۳ g/mol و دی متیل فرمامید (Dimethylformamide) با وزن مولکولی ۷۳/۰۹ g/mol با درصد خلوص ۹۹/۹۹ انتخاب گردیدند. تمام مواد مورد نیاز از شرکت مرک خریداری گردید.

به منظور تهیه محلول الکترورسی PDLLA، درصدهای وزنی مختلفی (۵، ۱۰، ۱۴، ۱۹ و ۲۳) از پلیمر پلی دی ال لاکتیک اسید به مخلوطی از حلال های DMF و DCM به نسبت ۴ به ۱ اضافه گردید. سپس این مخلوط

روش برای تولید الیاف نانومتریکی بوده که با قرار دادن سائز الیاف در رنج نانو می تواند منجر به افزایش عملکرد و اثربخشی بهتر فیلترهای لیفی شود (۱۸). همچنین می توان با استفاده از این روش و با تغییر محلول های پلیمری، پارامترهای عملیاتی و محیطی از جمله دما و رطوبت، مورفولوژی و ساختار نانو الیاف را تنظیم نمود (۱۰). با وجود پژوهش های گسترده بر روی فیلترهای نانولیفی مبتنی بر پلی لاکتیک اسید، اغلب مطالعات بر پلیمرهای نیمه بلوری مانند PLLA و ارزیابی عملکرد فیلتراسیون در شرایط محیطی ثابت متمرکز بوده اند. در مقابل، بررسی نظام مند نقش ساختار آمورف PDLLA در عملکرد فیلتراسیون هوا، به ویژه تحت شرایط مختلف رطوبت و سرعت جریان هوا، کمتر مورد توجه قرار گرفته و همچنان به عنوان یک شکاف دانشی باقی مانده است. در این راستا، نوآوری مطالعه حاضر در امکان سنجی و بهینه سازی بسترهای نانولیفی الکترورسی شده از جنس PDLLA به عنوان یک بستر فیلتراسیون زیست تخریب پذیر نهفته است. در این پژوهش، عملکرد جذب ذرات میکرونی و زیر میکرونی همراه با افت فشار و فاکتور کیفیت در شرایط مختلف محیطی مورد ارزیابی قرار گرفته و چشم اندازی برای توسعه فیلترهای هوای پایدار با عملکرد بالا ارائه شده است.

روش کار

پژوهش حاضر که با هدف ساخت بستر نانولیفی زیست تخریب پذیر جهت ربایش ذرات ریز طراحی گردید یک مطالعه تجربی بوده که در شرایط آزمایشگاهی انجام شده و روش جمع آوری داده ها از طریق انجام فرایندها و آزمون های آزمایشگاهی و دستگاهی بوده است. ابتدا با جستجو در مقالات مرتبط به علوم پزشکی و نساجی خصوصیات چندین پلیمر زیست تخریب پذیر مطالعه گردید که در جدول ۱ اشاره شده است. سپس از میان آنها پلیمر مطلوب انتخاب گردیده و با بررسی مطالعات مشابه و طی یک مطالعه پایلوت اقدام به ساخت محلول الکترورسی مناسب با درصدهای وزنی مختلف از پلیمر

جدول ۱: خصوصیات چندین پلیمر زیست تخریب پذیر

پلیمر	زیست تخریب پذیری	خواص مکانیکی	فرآیندپذیری (الکتروریسی)	مزایا و معایب	رفرنس
PLA	بالا	استحکام کششی خوب اما شکننده	خوب	زیست سازگار، شفافیت، در دسترس بودن، شکنندگی، کریستالیت بالا، سرعت تخریب کند	(۲۰)
PDLLA	بالا	استحکام متوسط، انعطاف پذیرتر از PLA	بسیار خوب	الیاف یکنواخت تر، کاهش شکنندگی، دمای ذوب پایین، انعطاف بالا، خواص مکانیکی کمتر از PLA بلوری	(۲۲، ۲۱)
PLC	بالا (کند)	انعطاف پذیری زیاد، استحکام کمتر از PLA	عالی	دمای ذوب پایین، انعطاف بالا، استحکام مکانیکی پایین تر، تخریب خیلی آهسته	(۲۳)
PHB	بالا	ماهیت سخت و شکننده	متنوع (بسته به مونومرها)	درجه بلورینگی بالا، پایداری حرارتی کم، هزینه تولید بالا، پیچیدگی فناوری، حساسیت به تخریب	(۲۴)

جدول ۲: پارامترهای فرایند الکتروریسی

غلظت پلیمر	دمای الکتروریسی	ولتاژ	نرخ تزریق	فاصله نوک سوزن تا کلکتور	سرعت چرخش کلکتور	زمان الکتروریسی
۱۶٪	۲۲ °C	۲۰ KV	۰.۵ ml/h	۱۷ cm	۱۰۰ RPM	۲ ساعت

نیز SEM با استفاده از نرم افزار ImageJ بررسی گردید. علاوه بر این بمنظور بررسی ساختار شیمیایی و گروه های عاملی نانوالیاف PDLLA آزمون FTIR نیز انجام گردید.

ارزیابی عملکرد بستر تولیدی

در بررسی پارامترهای مهم در عملکرد فیلتراسیون میزان کارایی، افت فشار و فاکتور کیفیت به عنوان فاکتورهای مهم مطرح می گردند (۱۹). عملکرد بسترهای نانو لیفی شامل آزمون کارایی جمع آوری ذرات و نیز تعیین افت فشار با استفاده از دستگاه آزمون فیلتر مدل FT200PS ساخت شرکت فناوران نانومقیاس (FNM Co) در آزمایشگاه مهندسی بهداشت حرفه ای دانشکده بهداشت دانشگاه علوم پزشکی تهران تعیین شد. این دستگاه توانایی تولید ذرات NaCl را در چهار سایز مختلف ۱، ۰.۵، ۰.۳، ۰.۱ میکرومتر دارا می باشد. پس از اینکه این ذرات توسط ژنراتور تولید گردید تعداد آن در بالادست و پایین دست بستر توسط شمارنده ذرات لیزری که بخشی از دستگاه تست می باشد مشخص شده و در نهایت میزان کارایی آن توسط دستگاه محاسبه گردید. همچنین این دستگاه قابلیت تعیین افت فشار را از طریق مقایسه فشار

با همزن مغناطیسی و در دمای محیط به مدت ۲ ساعت هم زده شد تا محلول یکنواختی حاصل گردد.

فرآیند الکتروریسی بسترهای نانوالیافی با استفاده از دستگاه الکتروریسی دو پمپ/ دوطرفه مدل (ESDP 30) ساخت شرکت فناوران نانومقیاس ایران انجام گرفت. به منظور ساخت بسترهای نانولیفی PDLLA پس از انتقال محلول های پلیمری به داخل سرنگ پلاستیکی با قطر نیدل شماره ۲۱ پارامترهای مختلف مورد نیاز برای فرآیند الکتروریسی، بررسی و بر اساس نتایج کسب شده از مطالعه پایلوت، شرایط بهینه مطابق جدول ۲ به دست آمد. کلیه آزمون ها در شرایط بهینه مندرج در جدول ۱ انجام شد.

تعیین مشخصات بسترهای الکتروریسی شده

بمنظور ریخت شناسی و تعیین قطر نانوالیاف موجود در ساختار بسترهای الکتروریسی شده، ابتدا فرایند الکتروریسی بر روی لایه ای از فویل آلومینیوم انجام شده و سپس با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی در آزمایشگاه مرکزی سازمان پژوهش های علمی و صنعتی ایران مورد بررسی قرار گرفته و تصاویر آنها در بزرگنمایی های مختلف تهیه شد. قطر نانوالیاف از تصاویر



شکل ۱: تصویر اتاقک طراحی شده جهت تولید محیط مرطوب متصل به دستگاه بخور

رطوبت‌سنج تعبیه‌شده در اتاقک کنترل گردید. در این مطالعه دو شرایط رطوبتی $55 \pm 5\%$ و $75 \pm 5\%$ فراهم گردید و نمونه‌ها به مدت ۳۰ دقیقه در این محیط‌ها نگهداری شدند. بلافاصله پس از تیمار، عملکرد بسترها توسط دستگاه آزمون فیلتر مورد بررسی قرار گرفت و کارایی و افت فشار آنها اندازه‌گیری شد.

در نهایت بمنظور بررسی تاثیرگذاری متغیرهای مستقل شامل سایز ذره، سرعت جریان هوا و همچنین شرایط رطوبتی مختلف بر کارایی به دام اندازی ذرات، آزمون آنالیز واریانس تکی و آنالیز واریانس متقابل دوتایی bonferroni و سطح معناداری ۰/۰۵ با استفاده از نرم افزار SPSS انجام گردید.

چیدمان و اجزای ست‌آپ آزمایشی مورد استفاده در این مطالعه برای ارزیابی عملکرد فیلتراسیون نانوالیاف PDLLA در شرایط مختلف جریان هوا و رطوبت، به صورت شماتیک در شکل ۲ ارائه شده است.

یافته‌ها

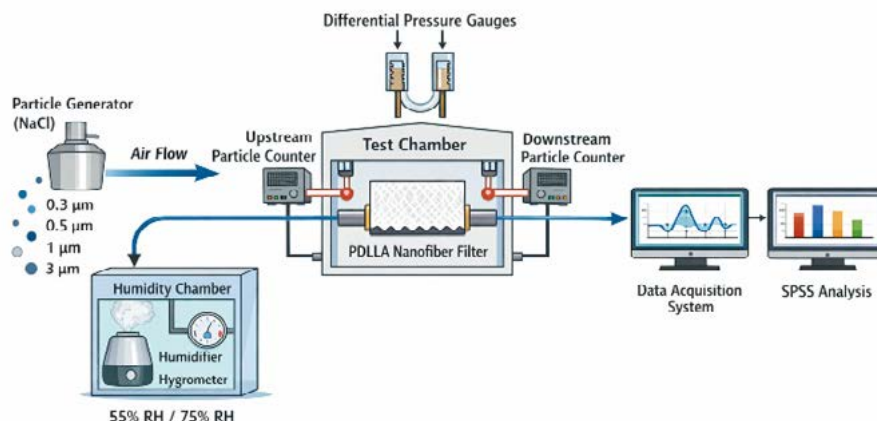
با تغییر در غلظت‌های مختلف محلول پلیمری و همچنین پارامترهای الکتریکی، محلول با غلظت ۱۶٪ با پارامترهای الکتریکی شامل ولتاژ ۲۰ KV، نرخ تزریق ۰/۵ ml/h فاصله سوزن تا کلکتور ۱۷ سانتی متر بهینه گردید. در شکل ۳ تصاویر SEM تهیه شده از بستر PDLLA

در بالا دست و پایین دست بستر دارد. طبق مطالعات قبلی، بهترین فیلتر باید دارای بالاترین کارایی فیلتراسیون (E) با کمترین افت فشار ممکن باشد (۲۴). فاکتور کیفیت (QF) نیز به عنوان یک پارامتر حیاتی با ادغام کارایی و افت فشار برای تعیین وضعیت فیلتراسیون استفاده گردید که به صورت زیر محاسبه می شود که در آن QF برحسب pa^{-1} ، E و ΔP افت فشار برحسب پاسکال می باشد (۲۵):

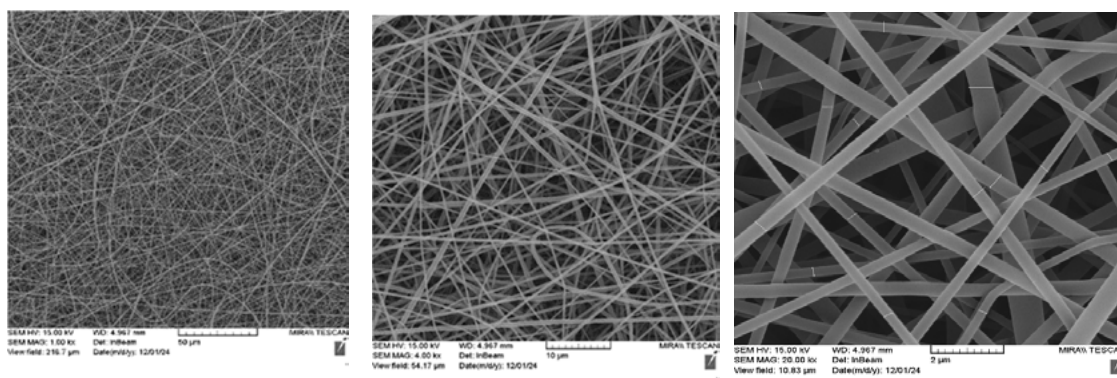
$$QF = \frac{-\ln(1-E)}{\Delta P}$$

در این فاز نمونه های بستر ریسندگی شده در مقابل ذرات در چهار سایز ۰/۳، ۰/۵، ۱، ۳ و ۳ میکرون و در ۳ سطح سرعت جریان هوای ۵، ۳ و ۱، ۶۷ cm/s و ۱۴، ۱۶ مطابق استاندارد ASTM F2101 و ASTM F2299 مورد آزمون قرار گرفتند (۲۶-۲۸). لازم بذکر است که آزمایشات اشاره شده در شرایط محیطی $T = 23 \pm 3^\circ\text{C}$ و $RH = 30 \pm 5\%$ انجام گردیده است.

علاوه بر این، در مطالعه حاضر اثر رطوبت بر عملکرد بسترهای تولیدی ارزیابی شد. بدین منظور از دستگاه بخور برای ایجاد محیط مرطوب استفاده گردید و بسترهای تولیدی درون اتاقک متصل به بخور که مجهز به رطوبت سنج بود قرار داده شدند (شکل ۱) و میزان رطوبت توسط



شکل ۲: شماتیک ست‌آپ آزمایشی مورد استفاده برای ارزیابی عملکرد فیلتراسیون نانوالیاف PDLLA



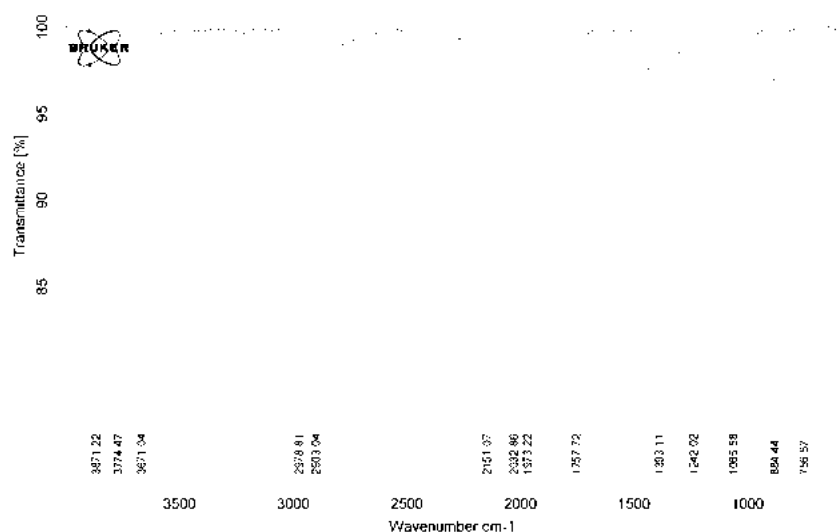
شکل ۳: تصاویر SEM تهیه شده از بسترهای PDLLA الکترونیسی شده در شرایط بهینه

الکترونیسی شده در شرایط بهینه با دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی ارائه شده است. تصاویر ذخیره شده در نرم افزار ImageJ باز شده و بر اساس نوار مقیاس تصویر، کالیبراسیون مقیاس انجام شد. سپس ۲۰ تصویر تصادفی انتخاب و قطرشان اندازه گیری شد. بر اساس بررسی های انجام شده، میانگین قطر الیاف تولیدی در مطالعه حاضر برابر با 375 ± 126 نانومتر بود. علاوه بر این برای بررسی ساختار شیمیایی و شناسایی گروه های عاملی PDLLA، طیف FTIR در بازه $4000-400 \text{ cm}^{-1}$ ثبت شد که در شکل ۴ ارائه گردیده است. باندهای مشخصه C-H ، C=O و C-O-C/C-O مشاهده شد که نشان دهنده حفظ ساختار پلی استری و آمورف نانوالیاف PDLLA بود و هیچ تغییر قابل توجهی در گروه های عاملی اصلی رخ نداده است.

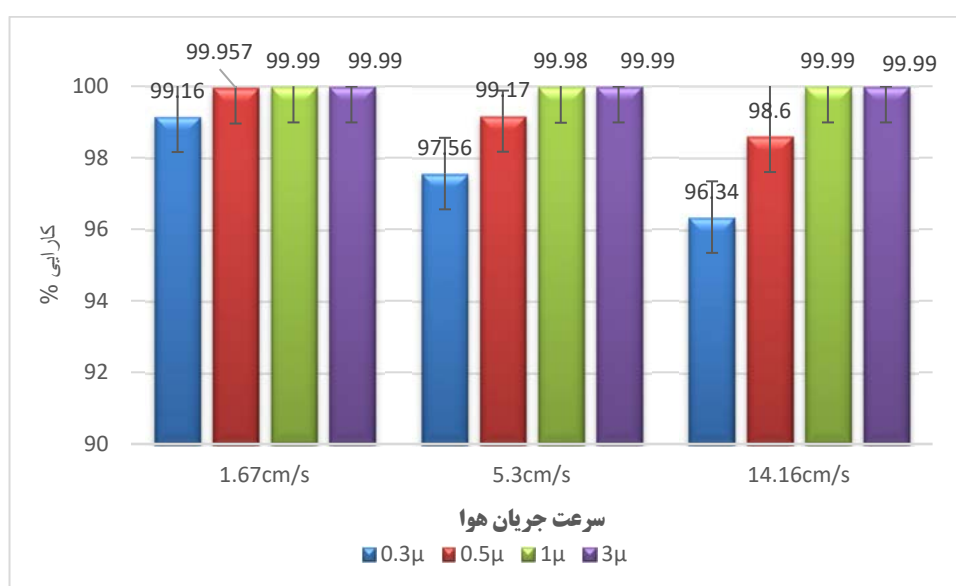
به منظور بررسی تاثیر سرعت جریان هوا بر کارایی ربایش ذرات با سایزهای مختلف، آزمایشات در سه سطح سرعت صورت گرفت. همانگونه که در نمودار ۱ مشخص است با تغییر سرعت جریان هوا کارایی ذرات $0.3 \mu\text{m}$ بیشترین تاثیرپذیری را نشان داده است، بگونه ای که در این سایز از ذرات با افزایش سرعت هوا کارایی ربایش آنها کاهش یافته است.

علاوه بر این میزان تاثیر گذاری رطوبت بر کارایی ربایش ذرات در سطوح مختلف سرعت جریان هوا نیز مورد بررسی قرار گرفت و نتایج آن در نمودار های ۲ و ۳ نشان داده شده است. بستر تحت شرایط رطوبتی توانست کارایی بالای خود را برای ذرات بزرگتر PM_{10} و

الکترونیسی شده در شرایط بهینه با دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی ارائه شده است. تصاویر ذخیره شده در نرم افزار ImageJ باز شده و بر اساس نوار مقیاس تصویر، کالیبراسیون مقیاس انجام شد. سپس ۲۰ تصویر تصادفی انتخاب و قطرشان اندازه گیری شد. بر اساس بررسی های انجام شده، میانگین قطر الیاف تولیدی در مطالعه حاضر برابر با 375 ± 126 نانومتر بود. علاوه بر این برای بررسی ساختار شیمیایی و شناسایی گروه های عاملی PDLLA، طیف FTIR در بازه $4000-400 \text{ cm}^{-1}$ ثبت شد که در شکل ۴ ارائه گردیده است. باندهای مشخصه C-H ، C=O و C-O-C/C-O مشاهده شد که نشان دهنده حفظ ساختار پلی استری و آمورف نانوالیاف PDLLA بود و هیچ تغییر قابل توجهی در گروه های عاملی اصلی رخ نداده است.



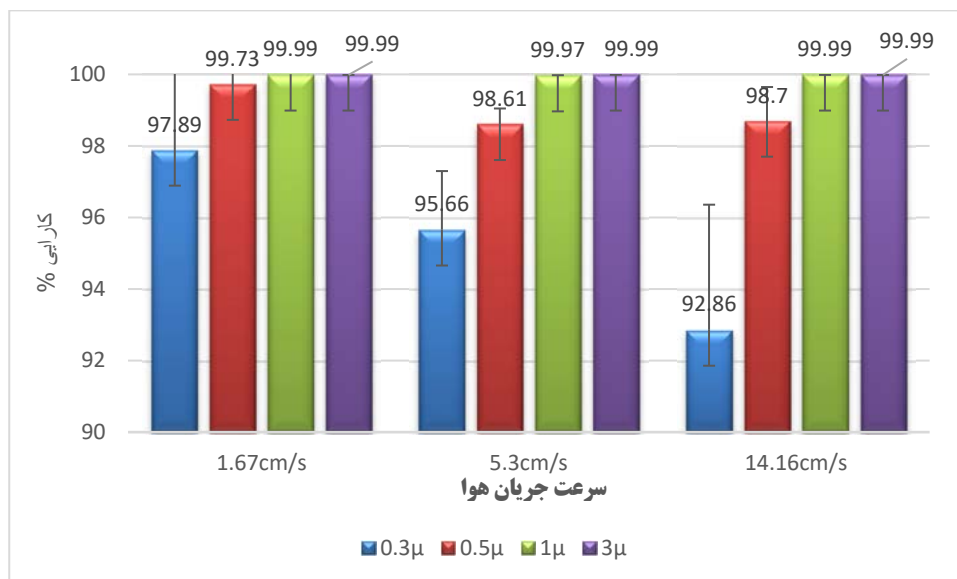
شکل ۴: طیف FTIR نانوالیاف PDLLA تولیدشده در شرایط بهینه الکترورسی



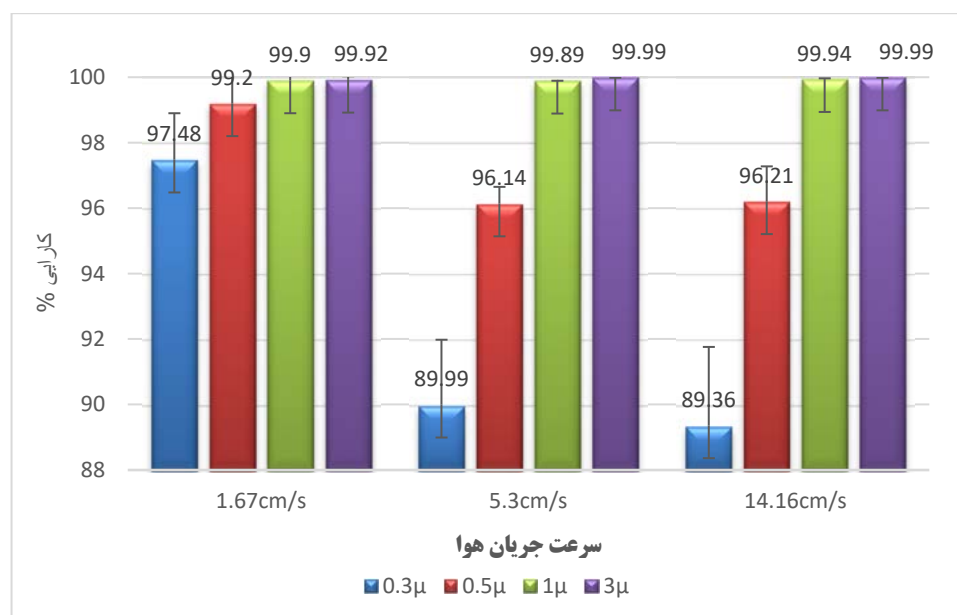
شکل ۵: کارایی ربایش ذرات سایز ۰.۳، ۰.۵، ۱، ۳ μm در سه سطح سرعت جریان هوا توسط بستر پلیمری PDLLA در شرایط دما و رطوبت محیط

و آنالیز واریانس متقابل دوتایی bonferroni انجام گردید که نتایج آن در جدول ۳ ارائه گردیده است. همانگونه که مشخص است هر سه متغیر به تنهایی تاثیر معناداری بر کارایی دارند علاوه براین اثرات متقابل دوتایی متغیرهای مذکور نیز معنادار می باشد ($P < 0.05$).

PM3 حفظ کند، اما در مورد ذرات بسیار ریز (PM0.3) با افزایش رطوبت، کاهش معناداری در کارایی مشاهده شد. بمنظور بررسی تاثیرگذاری متغیرهای سایز ذره، سرعت جریان هوا و همچنین شرایط رطوبتی مختلف بر کارایی به دام اندازی ذرات، آزمون آنالیز واریانس تکی



شکل ۶: کارایی ربایش ذرات سایز ۰.۳، ۰.۵، ۱ و ۳ μm در سه سطح سرعت جریان هوا در رطوبت ۵۵٪ توسط بستر پلیمری PDLLA



شکل ۷: کارایی ربایش ذرات سایز ۰.۳، ۰.۵، ۱ و ۳ μm در سه سطح سرعت جریان هوا در رطوبت ۷۵٪ توسط بستر پلیمری PDLLA

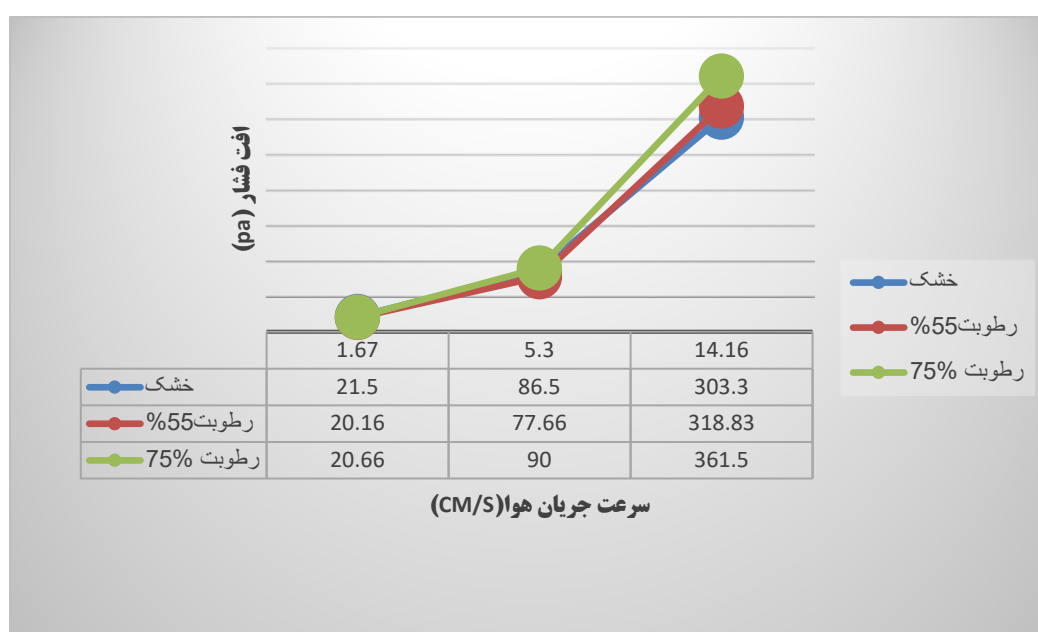
افزایش رطوبت شیب افت فشار نیز تغییر نموده که نشان دهنده افزایش محسوس آن می باشد. با استفاده از یافته های حاصل از افت فشار و کارایی ربایش ذرات در سه سطح سرعت جریان هوا، میزان فاکتور کیفیت فیلتر برای ذرات مختلف نیز محاسبه

در نمودار ۴ نتایج حاصل از تغییرات افت فشار در شرایط رطوبی مختلف بر حسب سرعت های مختلف جریان هوا ارائه شده است. همانطور که نشان داده شده است افزایش رطوبت در سرعت های پایین هوا تاثیر چندانی بر افت فشار نداشته اما در سرعت ۱۴.۱۶ cm/s با

جدول ۳: آنالیز واریانس سائز ذره، سرعت جریان هوا و شرایط رطوبی و اثرات متقابل دوتایی بین آنها بر کارایی به دام اندازی ذرات

متغیر	مجموع مربعات	df	F	sig
سائز ذره	۷۹۸.۲۶۱	۳	۱۳۵.۰۸۵	*P< ۰/۰۰۱
سرعت جریان هوا	۱۳۴.۸۷۷	۲	۶۷.۴۳۸	P< ۰/۰۰۱
شرایط رطوبی	۱۲۱.۴۶۴	۲	۳۰.۸۳۲	P< ۰/۰۰۱
سائز ذره* سرعت جریان هوا	۲۰۵.۶۰۳	۶	۱۷.۳۹۶	P< ۰/۰۰۱
سائز ذره* شرایط رطوبی	۱۵۷.۱۴۴	۶	۱۳.۲۹۶	P< ۰/۰۰۱
سرعت جریان هوا* شرایط رطوبی	۴۳.۰۲۰	۴	۵.۴۶۰	P< ۰/۰۰۱

*سطح معناداری ۰/۰۵



شکل ۸: افت فشار فیلتر در رطوبت های مختلف بر حسب سرعت جریان هوا

جدول ۴: مقادیر فاکتور کیفیت بستر نانولیفی بر حسب سرعت جریان هوا برای ذرات با سائزهای مختلف و شرایط رطوبی متفاوت

فاکتور کیفیت (pa ⁻¹)				شرایط رطوبی	سرعت جریان هوا
۳ μ	۱ μ	۰/۵ μ	۰/۳ μ		
۰/۰±۵۲۸۸/۰۰۸	۰/۰±۵۲۹۰/۰۰۶	۰/۰±۳۵۶۸/۰۰۶	۰/۰±۲۲/۰۳۴	شرایط محیطی	۱/۶۷cm/s
۰/۰±۵۷۰۸/۰۰۵	۰/۰±۵۷۰۷/۰۰۹	۰/۰±۲۹۳۷/۰۰۶	۰/۰±۱۹۱۳/۰۱۱	RH55%	
۰/۰±۲۹۹۷/۰۰۷۰	۰/۰±۲۷۲۸/۰۰۸	۰/۰±۱۹۷۰/۰۰۷	۰/۰±۱۶۸۵/۰۰۱	RH75%	
۰/۰±۱۳۲۸/۰۰۴	۰/۰±۱۰۱۲/۰۰۶	۰/۰±۵۰۲/۰۰۵	۰/۰±۰۴۳۳/۰۰۶	شرایط محیطی	۵/۲cm/s
۰/۰±۱۲۶۸/۰۰۵	۰/۰±۱۰۴۸/۰۰۹	۰/۰±۰۵۴۵/۰۰۸	۰/۰±۰۴۰/۰۰۶	RH55%	
۰/۰±۱۲۷۷/۰۰۸	۰/۰±۰۷۶۲/۰۰۵	۰/۰±۰۳۵۸/۰۰۶	۰/۰±۰۲۴۸/۰۰۷	RH75%	
۰/۰±۰۳۸۲/۰۰۴	۰/۰±۰۳۸۰/۰۰۶	۰/۰±۰۲۰۳/۰۰۳	۰/۰±۰۱۱۳/۰۰۳	شرایط محیطی	۱۴/۱۶cm/s
۰/۰±۰۳۵۵/۰۰۴	۰/۰±۰۳۶۲/۰۰۶	۰/۰±۰۱۳۷/۰۰۵	۰/۰±۰۰۸/۰۰۳	RH55%	
۰/۰±۰۳۲۳/۰۰۶	۰/۰±۰۲۱۱/۰۰۸	۰/۰±۰۰۸۸/۰۰۳	۰/۰±۰۰۵۸/۰۰۲	RH75%	

بسیار بالایی در به دام انداختن ذرات با اندازه‌های مختلف دارد؛ به‌طوری که برای ذرات PM3 و PM1 کارایی بیش از ۹۹.۹۹٪ و برای ذرات PM0.5 کارایی بالاتر از ۹۸٪ در شرایط محیطی خشک و در سه سطح متفاوت سرعت جریان هوا مشاهده شد. ارزیابی عملکرد بستر در جمع‌آوری ذرات PM۰.۳ مشخص کرد که در سرعت پایین ۱/۶۷ cm/s، کارایی به ۹۹.۱۶±۰.۶۳٪ می‌رسد، که این بالا بودن راندمان می‌تواند به فعالیت مکانیسم ربایش الکترواستاتیکی برای ذرات زیرمیکرون مرتبط باشد. با افزایش سرعت جریان هوا، به ویژه برای ذرات زیرمیکرون، کارایی فیلتر کاهش یافت و در سرعت ۱۴/۱۶ cm/s به ۹۶.۳۴±۳.۷٪ رسید؛ این کاهش کارایی احتمالاً با کاهش

اثر مکانیسم ربایش الکترواستاتیکی همراه است این یافته‌ها نشان می‌دهند که ویژگی ذرات و سرعت جریان هوا با هم تعامل دارند و مستقیماً بر راندمان فیلتراسیون تأثیر می‌گذارند. ذرات کوچک‌تر به دلیل کاهش اثربخشی مکانیسم‌های برخورد اینرسی (Impaction) و ربایش (Interception) بیشترین افت راندمان را تجربه می‌کنند، در حالی که ذرات بزرگ‌تر نسبت به افزایش سرعت جریان کمتر تحت تأثیر قرار می‌گیرند؛ زیرا نسبت پایین قطر الیاف به ذرات و وجود جریان لغزشی در نانوالیاف باعث می‌شود مکانیسم‌های ته‌نشینی گرانشی و برخورد اینرسی همچنان مؤثر باقی بمانند. مطالعات پیشین نیز نشان داده‌اند که نفوذ آئروسول‌ها به درون فیلتر به شدت به اندازه ذرات وابسته است، زیرا مکانیسم‌های مختلف به دام‌اندازی شامل ته‌نشینی گرانشی، برخورد اینرسی و ربایش، انتشار و ربایش الکترواستاتیکی همگی تحت تأثیر ابعاد ذرات قرار دارند (۳۳).

رطوبت یکی دیگر از عوامل مؤثر بر ساختار، عملکرد فیلتراسیون و در نهایت ربایش ذرات معلق در نانوفیلترهای هوا به‌شمار می‌رود (۳۴). شواهد متعددی از کاربردهای عملی نشان می‌دهد که بسترهای فیلتر هوا در شرایطی نظیر رطوبت بالا، مه، باران و برف به‌راحتی دچار افت عملکرد یا تخریب می‌شوند. علاوه بر پیامدهای

گردید که نتایج آن در جدول ۴ ارائه گردیده است. همانطور که مشخص است در رابطه با ذرات بزرگ‌تر فیلتر دارای فاکتور کیفیت بالاتری می‌باشد ولیکن بطور کلی صرف نظر از سائز ذرات با افزایش سرعت جریان هوا فاکتور کیفیت کاهش پیدا می‌کند.

بحث

نانوالیاف تک‌بعدی به دلیل قطر بسیار کوچک، تخلخل قابل تنظیم و سطح ویژه بالا، کاربرد گسترده‌ای در فیلترهای هوا یافته‌اند (۲۹). تکنیک الکترورسی امکان تولید نانوالیاف از پلیمرهای طبیعی و مصنوعی، به ویژه پلیمرهای زیست‌تخریب‌پذیر مانند PDLLA، PLA و PCL را فراهم می‌کند که PDLLA به دلیل ترکیب مناسب زیست‌تخریب‌پذیری، فرآیندپذیری و استحکام مکانیکی، گزینه‌ای برجسته برای بسترهای فیلتراسیون است (۳۰، ۳۱). مطالعه حاضر با هدف تهیه بستر نانولیفی از جنس PDLLA و ارزیابی عملکرد آن در ربایش ذرات ریز معلق در سرعت‌های مختلف جریان هوا و شرایط رطوبتی متفاوت انجام شد. پارامترهای فرایند الکترورسی مانند ولتاژ اعمالی، فاصله سوزن تا کلکتور، نرخ تزریق و مدت زمان فرآیند، به همراه ویژگی‌های محلول پلیمری (نوع حلال و غلظت)، اثر قابل توجهی بر قطر، یکنواختی و کیفیت بستر داشتند. در این پژوهش مشاهده شد که غلظت‌های پایین‌تر (۴، ۸ و ۱۲ درصد) موجب ایجاد عیوبی مانند گره در نانوالیاف شدند، در حالی که غلظت بهینه ۱۶ درصد منجر به تولید الیاف یکنواخت با قطر مناسب شد درحالی‌که عبور از این مقدار می‌تواند منجر به افزایش قطر الیاف گردد. این نتایج با یافته‌های Jinxi Zhang و همکاران هم‌خوانی دارد که نشان می‌دهد غلظت محلول و زمان فرآیند، تأثیر معناداری بر کارایی جداسازی و افت فشار بسترهای نانولیفی دارند (۳۲). بنابراین، بهینه‌سازی پارامترهای فرآیند و محلول پلیمری برای دستیابی به بسترهایی با عملکرد مطلوب ضروری است. در این مطالعه، بستر بهینه‌شده نشان داد که توانایی

زیست‌محیطی، ماسک‌های N95 و جراحی نیز با چالش مهمی مواجه هستند که آن، حساسیت بالا به رطوبت است. این ماسک‌ها در شرایط هوای مرطوب تنفس انسان به سرعت بخش زیادی از کارایی فیلتراسیون خود را از دست می‌دهند (۲۷). از این‌رو، بررسی اثر رطوبت نسبی بر کارایی فیلترهای هوا در ربایش گرد و غبار و ذرات معلق ضروری است (۳۵). بر این اساس، در مطالعه حاضر عملکرد فیلتراسیون بستر تولیدی پس از تماس با هوای مرطوب نیز مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان دادند که در شرایط محیطی مرطوب و در سرعت‌های مختلف جریان هوا، کارایی فیلتر برای ذرات PM1 و PM3 کاهش قابل توجهی نداشت و همچنان بالاتر از ۹۹٪ باقی ماند، زیرا ذرات بزرگ‌تر تحت تأثیر مکانیسم‌های ته‌نشینی گرانشی و برخورد اینرسی قرار دارند که در سرعت‌های مختلف جریان هوا همچنان مؤثر باقی می‌مانند. در مقابل، ذرات PM0.5 کاهش جزئی و ذرات PM0.3 بیشترین افت کارایی را نشان دادند؛ به‌ویژه در رطوبت نسبی ۷۵٪ و سرعت‌های ۵/۳ cm/s و ۱۴/۱۶ cm/s، کارایی ربایش این ذرات به کمتر از ۹۰٪ کاهش یافت. این کاهش عملکرد نشان می‌دهد که رطوبت اثر مستقیم بر مکانیسم‌های ربایش ذرات زیرمیکرون، به ویژه مکانیسم الکترواستاتیکی، دارد؛ بگونه‌ای که بارهای سطحی در شرایط مرطوب تضعیف شده و فرصت جذب ذرات ریز کاهش می‌یابد. بنابراین، با توجه به نقش تعیین‌کننده عوامل محیطی بر عملکرد فیلتراسیون، شناخت و تحلیل مکانیسم‌های مختلف فیلتراسیون اهمیت بالایی دارد و تنها با درک دقیق این مکانیسم‌ها می‌توان طراحی و عملکرد بستر فیلتراسیون را بهبود بخشید (۳۶).

بررسی مکانیسم‌ها نشان داده است که برای ذرات بزرگ‌تر (۱ تا ۱۰ میکرومتر)، ته‌نشینی گرانشی و برخورد اینرسی همچنان نقش غالب دارند، زیرا نیروهای گرانشی و انرژی بالستیک ذرات بزرگ را به سطح فیلتر هدایت می‌کنند (۳۷). در این حالت، برخورد اینرسی زمانی رخ می‌دهد که اینرسی ذرات آن‌قدر زیاد شود که مسیر حرکت آن‌ها در جریان هوا تغییر کند. در نتیجه، ذرات

بزرگ‌تر که دارای سرعت سطحی و چگالی بالاتری هستند، اینرسی بیشتری داشته و راحت‌تر به سطح فیلتر ربایش می‌شوند (۳۳).

اما برای ذرات زیرمیکرون، مکانیسم غالب به دام‌اندازی به انتشار و ربایش الکترواستاتیکی متکی است؛ در سرعت‌های پایین جریان هوا، بارهای سطحی فعال بوده و ذرات ۰.۳ و ۰.۵ میکرومتر به خوبی به دام می‌افتند. با افزایش سرعت جریان، زمان ماند ذرات کاهش یافته و اثر مکانیسم الکترواستاتیکی برای ذرات ریز کاهش می‌یابد، که علت اصلی افت راندمان در این اندازه ذرات است (۳۷، ۳۸). علاوه بر این در مطالعات اخیر فیلتراسیون هوا مشخص شده است که ذرات با بیشترین احتمال نفوذ (MPPS) در فیلترهای لیفی و نانولیفی معمولاً در بازه بسیار کوچک ۰.۲-۰.۴ μm قرار دارند و این محدوده یکی از چالش‌برانگیزترین اندازه‌ها برای جداسازی ذرات است (۳۹). این ذرات MPPS به دلیل کاهش اثر برخی مکانیسم‌های مکانیکی و نیاز به مشارکت قوی‌تر مکانیسم‌های ترکیبی مانند ربایش الکترواستاتیکی و انتشار، بیشترین نفوذ را از بسترهای فیلتری دارند (۴۰). با توجه به یافته‌های این مطالعه که نشان داد کارایی فیلتراسیون برای ذرات زیرمیکرون با افزایش سرعت جریان کاهش می‌یابد، می‌توان انتظار داشت که عملکرد بستر نانولیفی PDLLA تولید شده در این مطالعه نسبت به ذرات نزدیک به MPPS، مانند ذرات زیر ۰.۳ میکرومتر، نیز مشابه باشد.

همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، اندازه ذرات و سرعت جریان هوا نقش کلیدی در عملکرد فیلتراسیون دارند. ذرات کوچک‌تر به دلیل کاهش اثربخشی مکانیسم‌های برخورد اینرسی (Impaction) و ربایش (Interception) بیشترین افت راندمان را تجربه می‌کنند، در حالی که ذرات بزرگ‌تر به دلیل نسبت پایین قطر الیاف به ذرات و وجود جریان لغزشی در نانوالیاف تغییر چندانی در کارایی فیلتراسیون نشان نمی‌دهند (۴۱). مکانیسم ربایش الکترواستاتیکی به‌ویژه برای ذرات ۰/۳-۰/۵ میکرومتر اهمیت دارد و نقش مکمل کلیدی برای فیلتراسیون

افزایش می‌یابد. با این حال، نرخ افزایش افت فشار در شرایط رطوبت نسبی ۷۵٪ نسبت به سایر شرایط محیطی بیشتر است، که این موضوع نشان‌دهنده تأثیر قابل توجه رطوبت موجود در هوا بر افزایش افت فشار در سیستم فیلتراسیون می‌باشد. در واقع، هوای مرطوب به دلیل افت دما و فشار موجب ایجاد قطرات متراکم می‌شود و در صورتی که این قطرات توسط فیلتر ربایش شوند، یک لایه مایع تشکیل می‌گردد که موجب افزایش افت فشار می‌شود (۱). این پدیده با نتایج مطالعه Segovia نیز همخوانی دارد؛ او در پژوهش خود نشان داد که الیاف فیلتر در شرایط مرطوب دچار تورم شده و این موضوع موجب تغییر در تخلخل و در نتیجه، افت فشار فیلتر می‌شود (۴۵).

به طور کلی، در ارزیابی عملکرد فیلترها و مواد فیلتراسیون، لازم است دو پارامتر کلیدی یعنی کارایی فیلتراسیون و افت فشار به صورت همزمان مورد بررسی قرار گیرند؛ چرا که تحلیل جداگانه هر یک از این عوامل نمی‌تواند به تنهایی بیانگر عملکرد جامع و مناسب یک فیلتر در فرآیند فیلتراسیون باشد (۴۶). از این رو، در مطالعه حاضر فاکتور کیفیت (Quality Factor) که ترکیبی از دو پارامتر مذکور است نیز محاسبه گردید. نتایج حاصل نشان دادند که فیلتر تولیدی دارای مقدار فاکتور کیفیت $QF = 0.529 \text{ Pa}^{-1}$ برای ذرات PM_{10} و PM_3 در سرعت 1.67 cm/s می‌باشد. با این حال، کاهش اندازه ذرات و افزایش سرعت جریان هوا منجر به افت قابل توجهی در مقدار فاکتور کیفیت شده است؛ به طوری که این شاخص برای ذرات $\text{PM}_{0.3}$ به $QF = 0.22 \text{ Pa}^{-1}$ و در سرعت 1.67 cm/s به $QF = 0.011 \text{ Pa}^{-1}$ و به 14.16 cm/s کاهش یافته است. این نتایج به خوبی یافته‌های پیشین در خصوص تأثیر اندازه ذرات و سرعت جریان هوا بر عملکرد فیلتراسیون را تأیید می‌نمایند.

نتیجه گیری

مطالعه حاضر با هدف تهیه بستر نانوالیاف زیست‌تخریب‌پذیر از جنس PDLLA جهت ربایش ذرات معلق انجام شد. نتایج نشان داد که بستر تولیدی، تحت

مکانیکی در فیلترهای با کارایی بالا ایفا می‌کند (۴۲)؛ با این حال، رطوبت بالا می‌تواند بار الکترواستاتیک سطح فیلتر و ذرات را کاهش داده و عملکرد فیلتراسیون را تحت تأثیر قرار دهد (۴۳). این یافته‌ها نشان می‌دهند که کنترل شرایط محیطی مانند رطوبت و سرعت جریان هوا برای بهینه‌سازی کارایی فیلترهای نانولیفی اهمیت بالایی دارد.

درحقیقت فیلترها برای ربایش مؤثر ذرات باردار، مانند قطرات حاوی ویروس‌ها و باکتری‌ها، به بارهای الکترواستاتیکی القا شده در سطح فیلتر متکی هستند، زیرا این بارها موجب ایجاد برهم‌کنش‌های قوی میان ذرات و سطح فیلتر می‌شوند و احتمال به دام افتادن آن‌ها را افزایش می‌دهند. با این حال، در شرایط هوای مرطوب، این بارهای سطحی به سرعت تضعیف یا خنثی می‌شوند، که باعث کاهش برهم‌کنش‌های الکترواستاتیکی میان ذرات و فیلتر می‌شود. این کاهش اثر مستقیم، افت کارایی فیلتراسیون ذرات $\text{PM}_{0.3}$ و دیگر ذرات زیرمیکرونی را به دنبال دارد. (۲۷). بنابراین، کاهش عملکرد فیلتر در شرایط مرطوب به طور مستقیم ناشی از ضعف مکانیسم ربایش الکترواستاتیکی و کاهش فرصت تماس ذرات با سطح فیلتر است.

این یافته با نتایج مطالعه Lee و همکاران که عملکرد ماسک‌ها را در مواجهه با رطوبت هوای تنفسی انسان و پس از استفاده طولانی مدت بررسی کرده بودند، مطابقت دارد (۲۷). همچنین، Givchchi در پژوهش خود نشان داد که اثربخشی ربایش الکترواستاتیکی به مرور زمان و به ویژه در محیط‌های مرطوب (مانند رطوبت ناشی از تنفس) کاهش می‌یابد (۴۳). این نتایج حاکی از آن است که برهم‌کنش‌های الکترواستاتیکی و بین‌مولکولی مستقیماً عملکرد ربایش ذرات PM_{10} را در شرایط بسیار مرطوب تحت تأثیر قرار می‌دهند (۴۴).

در بحث فیلتراسیون هوا علاوه بر کارایی، پارامترهای افت فشار و فاکتور کیفیت نیز حائز اهمیت می‌باشند (۱). در مطالعه حاضر مشخص گردید با افزایش سرعت جریان هوا در شرایط محیطی مختلف، افت فشار به طور مداوم

افزایش افت فشار می‌شود. این یافته‌ها نشان می‌دهند که طراحی و بهینه‌سازی بسترهای نانولیفی باید با توجه به شرایط محیطی و اندازه ذرات هدف صورت گیرد. به‌طور کلی، بستر PDLLA گزینه‌ای مناسب برای فیلتراسیون ذرات معلق در شرایط متنوع محیطی به‌شمار می‌رود، با این حال برای ذرات بسیار ریز نیاز به بررسی‌های بیشتر وجود دارد تا اطمینان از عملکرد بهینه در تمام محدوده اندازه ذرات حاصل شود.

شرایط بهینه فرآیند الکتروریسی، دارای کارایی بالایی در جمع‌آوری ذرات با اندازه‌های مختلف است. این بستر به‌ویژه برای ذرات PM1 و PM3 عملکرد بسیار خوبی از خود نشان داد و حتی در شرایط مرطوب نیز توانست عملکرد مطلوب خود را حفظ کند. کارایی فیلتراسیون ذرات زیرمیکرون به ویژه PM0.3 و PM0.5، تحت تأثیر سرعت جریان هوا و رطوبت قرار دارد؛ به‌گونه‌ای که افزایش سرعت یا رطوبت منجر به کاهش کارایی و

REFERENCES

- Bian Y, Zhang C, Wang H, Cao Q. Degradable nanofiber for eco-friendly air filtration: Progress and perspectives. *Sep Purif Technol.* 2023;306:122642.
- Kalantary S, Khadem M. Occupation groups and Covid-19. *J Health Saf Work.* 2020;10(2). [Page numbers missing]
- Chen Z, Wang JN, Ma GX, Zhang YS. China tackles the health effects of air pollution. *Lancet.* 2013;382(9909):1959-60.
- Le TT, Curry EJ, Vinikoor T, Das R, Liu Y, Sheets D, et al. Piezoelectric nanofiber membrane for reusable, stable, and highly functional face mask filter with long-term biodegradability. *Adv Funct Mater.* 2022;32(20):2113040.
- Ravi SK, Singh VK, Suresh L, Ku C, Sanjairaj V, Nandakumar DK, et al. Hydro-assisted self-regenerating brominated N-alkylated thiophene diketopyrrolopyrrole dye nanofibers—a sustainable synthesis route for renewable air filter materials. *Small.* 2020;16(14):1906319.
- Kalantary S, Pourbabaki R, Jahani A, Sadeghi Yarandi M, Samiei S, Jahani R. Development of a decision support system tool to predict the pulmonary function using artificial neural network approach. *Concurr Comput.* 2021;33(16):e6258.
- Zhou Y, Liu Y, Zhang M, Feng Z, Yu DG, Wang K. Electrospun nanofiber membranes for air filtration: A review. *Nanomaterials (Basel).* 2022;12(7):1077.
- Mao N. Nonwoven fabric filters. In: *Fibrous filter media.* Elsevier; 2017. p. 133-71.
- Lee M, Ojha GP, Oh HJ, Kim T, Kim HY. Copper/terbium dual metal organic frameworks incorporated side-by-side electrospun nanofibrous membrane: A novel tactic for an efficient adsorption of particulate matter and luminescence property. *J Colloid Interface Sci.* 2020;578:155-63.
- Shen R, Guo Y, Wang S, Tuerxun A, He J, Bian Y. Biodegradable electrospun nanofiber membranes as promising candidates for the development of face masks. *Int J Environ Res Public Health.* 2023;20(2):1306.
- Deng Y, Lu T, Cui J, Samal SK, Xiong R, Huang C. Bio-based electrospun nanofiber as building blocks for a novel eco-friendly air filtration membrane: A review. *Sep Purif Technol.* 2021;277:119623.
- Levine C, Grady C, Block T, Hurley H, Russo R, Peixoto B, et al. Use, reuse or discard: quantitatively defined variance in N95 respirator integrity following vaporized hydrogen peroxide decontamination during the COVID-19 pandemic. *medRxiv.* 2020;2020.08.18.20177071.
- Tawakkal IS, Cran MJ, Miltz J, Bigger SW. A review of poly(lactic acid)-based materials for antimicrobial packaging. *J Food Sci.* 2014;79(8):R1477-90.
- Hamad K, Kaseem M, Yang H, Deri F, Ko Y. Properties and medical applications of polylactic acid: A review. *Express Polym Lett.* 2015;9(5).
- Anderson JM, Shive MS. Biodegradation and biocompatibility of PLA and PLGA microspheres. *Adv Drug Deliv Rev.* 1997;28(1):5-24.
- Silva E, de Vasconcellos LMR, Rodrigues BV, Dos Santos DM, Campana-Filho SP, Marciano FR, et al. PDLLA honeycomb-like scaffolds with a high loading of superhydrophilic graphene/multi-walled carbon nanotubes promote osteoblast in vitro functions and guided in vivo bone regeneration. *Mater Sci Eng C.* 2017;73:31-9.

17. Koozekonan AG, Esmailpour MR, Kalantary S, Karimi A, Azam K, Golbabaei F. Fabrication and characterization of TiO₂ and MWCNT coated electrospinning nanofibers for UV protection properties. *MethodsX*. 2021;8:101354.
18. Kazemi M, Kalantari S, Abbasi A, Foroushani AR, Mowlavi H, Montazemi AH, et al. Fabrication of PET nanofibers media by electrospinning method and determining its efficiency in removing submicron and micron particle contaminants from air. *J Health Saf Work*. 2023;13(1).
19. Chen CC, Chueh JY, Tseng H, Huang HM, Lee SY. Preparation and characterization of biodegradable PLA polymeric blends. *Biomaterials*. 2003;24(7):1167-73.
20. Garlotta D. A literature review of poly(lactic acid). *J Polym Environ*. 2001;9(2):63-84.
21. Nair LS, Laurencin CT. Biodegradable polymers as biomaterials. *Prog Polym Sci*. 2007;32(8-9):762-98.
22. Fukushima K, Feijoo JL, Yang MC. Comparison of abiotic and biotic degradation of PDLLA, PCL and partially miscible PDLLA/PCL blend. *Eur Polym J*. 2013;49(3):706-17.
23. McAdam B, Brennan Fournet M, McDonald P, Mojicevic M. Production of polyhydroxybutyrate (PHB) and factors impacting its chemical and mechanical characteristics. *Polymers (Basel)*. 2020;12(12):2908.
24. Wang N, Wang X, Ding B, Yu J, Sun G. Tunable fabrication of three-dimensional polyamide-66 nano-fiber/nets for high efficiency fine particulate filtration. *J Mater Chem*. 2012;22(4):1445-52.
25. Farhang Dehghan S, Golbabaei F, Maddah B, Yarahmadi R, Sadigh Zadeh A. Fabrication and optimization of electrospun polyacrylonitrile nanofiber for application in air filtration. *Iran Occup Health*. 2016;13(5):11-23.
26. Yu YH, Huang Y, Zhang JF, Lin WT, Li WL, Ye XY, et al. Self-powered, biodegradable, and antibacterial air filters based on piezoelectric poly(L-lactic acid) nanofibrous membranes. *ACS Appl Polym Mater*. 2023;5(12):10426-37.
27. Le TT, Curry EJ, Vinikoor T, Das R, Liu Y, Sheets D, et al. Piezoelectric nanofiber membrane for reusable, stable, and highly functional face mask filter with long-term biodegradability. *Adv Funct Mater*. 2022;32(20).
28. Shao Z, Jiang J, Wang X, Li W, Fang L, Zheng G. Self-powered electrospun composite nanofiber membrane for highly efficient air filtration. *Nanomaterials (Basel)*. 2020;10(9).
29. Parham S, Kharazi AZ, Bakhsheshi-Rad HR, Ghayour H, Ismail AF, Nur H, et al. Electrospun nano-fibers for biomedical and tissue engineering applications: A comprehensive review. *Materials (Basel)*. 2020;13(9):2153.
30. Yoo HS, Kim TG, Park TG. Surface-functionalized electrospun nanofibers for tissue engineering and drug delivery. *Adv Drug Deliv Rev*. 2009;61(12):1033-42.
31. Cheng ML, Chen PY, Lan CH, Sun YM. Structure, mechanical properties and degradation behaviors of the electrospun fibrous blends of PHBHHx/PDLLA. *Polymer*. 2011;52(6):1391-401.
32. Zhang J, Gong S, Wang C, Jeong DY, Wang ZL, Ren K. Biodegradable electrospun poly(lactic acid) nanofibers for effective PM_{2.5} removal. *Macromol Mater Eng*. 2019;304(10):1900259.
33. Tcharkhtchi A, Abbasnezhad N, Seydani MZ, Zirak N, Farzaneh S, Shirinbayan M. An overview of filtration efficiency through the masks: Mechanisms of the aerosols penetration. *Bioact Mater*. 2021;6(1):106-22.
34. Sepahvand S, Jonoobi M, Ashori A, Rabie D, Gauvin F, Brouwers HJH, et al. Modified cellulose nanofibers aerogels as a novel air filters; Synthesis and performance evaluation. *Int J Biol Macromol*. 2022;203:601-9.
35. Zhang T, Fu Z, Zhou H. Experimental study of the effect of humidity on air filter material performance. *Energies*. 2023;16(9):3626.
36. Yi L, Fengzhi L, Qingyong Z. Numerical simulation of virus diffusion in facemask during breathing cycles. *Int J Heat Mass Transf*. 2005;48(19-20):4229-42.
37. Konda A, Prakash A, Moss GA, Schmoldt M, Grant GD, Guha S. Aerosol filtration efficiency of common fabrics used in respiratory cloth masks. *ACS Nano*. 2020;14(5):6339-47.
38. Janssen L. Principles of physiology and respirator performance. *Occup Health Saf*. 2003;72(6):73-81.
39. Salkovskiy Y, Fadeev A. High-efficiency retention of ultrafine aerosols by electrospun nanofibers. *Sci Rep*. 2022;12(1):20850.
40. Eninger RM, Honda T, Adhikari A, Heinonen-Tanski H, Reponen T, Grinshpun SA. Filter performance of N99 and N95 facepiece respirators against viruses and ultrafine particles. *Ann Occup Hyg*. 2008;52(5):385-96.

41. Habibi Mohraz M, Golbabaie F, Je Yu I, Sedigh Zadeh A, Mansournia MA, Farhang Dehghan S. Investigating effective parameters on the nanoparticles air filtration using polyurethane nanofiber mats. *J Health Saf Work*. 2018;8(1):29-42.
42. Peng Z, Shi J, Xiao X, Hong Y, Li X, Zhang W, et al. Self-charging electrostatic face masks leveraging triboelectrification for prolonged air filtration. *Nat Commun*. 2022;13(1):7835.
43. Givchchi R, Tan Z. The effect of capillary force on airborne nanoparticle filtration. *J Aerosol Sci*. 2015;83:12-24.
44. Lakshmanan A, Gavali DS, Venkataprasanna KS, Thapa R, Sarkar D. Low-basis weight polyacrylonitrile/polyvinylpyrrolidone blend nanofiber membranes for efficient particulate matter capture. *ACS Appl Polym Mater*. 2022;4(5):3971-81.
45. Segovia JM, Huang CH, Mamishev M, Yuan N, He J, Novosselov I. Performance of textile mask materials in varied humidity: filtration efficiency, breathability, and quality factor. *Appl Sci*. 2022;12(18):9360.
46. Farhang Dehghan S, Maddah B, Golbabaie F. The development of nanofibrous media filter containing nanoparticles for removing particles from air stream. *Iran J Health Environ*. 2016;8(4):509-24.