

ORIGINAL RESEARCH PAPER

Design, Construction, and Evaluation of an Air Filtration System Based on a Nanofiber Filter Containing a Metal-Organic Framework for the Removal of Aerosols Emitted from CNC Machining Operations

Mehrdad Helmi Kohnehsahri¹, Farideh Golbabaie², Somayeh Farhang Dehghan^{1,3*}, Rezvan Zendehe³, Alireza Abbasi⁴, Zahra Yadegar¹

¹School of Public Health and Safety, Shahid Beheshti University of Medical Sciences, Tehran, Iran.

²School of Public Health, Tehran University of Medical Sciences, Tehran, Iran.

³Environmental and Occupational Hazards Control Research Center, Research Institute for Health Sciences and Environment, Shahid Beheshti University of Medical Sciences, Tehran, Iran.

⁴School of Chemistry, College of Science, University of Tehran, Tehran, Iran.

Received: 16 - 12 - 2024

Accepted: 25 - 6 - 2025

ABSTRACT

Introduction: With the advancement of industries and increased use of metalworking fluids, controlling pollutants generated by machining operations has become increasingly challenging. This study aimed to address these challenges by designing an air filtration system designed specifically for this purpose.

Material and Methods: A local exhaust ventilation system was developed based on the VS-80-12 ACGIH standard, tailored to the working conditions and air sampling of the environment. The filtration system includes an aluminum pre-filter, an E11 class filter, and a nanofiber filter incorporating a metal-organic framework. The performance of the system was evaluated by measuring the numerical concentration of particles and the mass concentration of oil mist at both the inlet and outlet. The results were then compared to those obtained from an E1 class filter.

Results: The results obtained from XRD and FTIR analyses showed that ZIF-8 had high crystallinity and was successfully incorporated into the structure of the fibrous media filter containing metal-organic framework. The evaluation revealed that the filtration system effectively removed pollutant particles at their source. Notably, the initial efficiency for larger particles reached 100%, while the average removal efficiency for particles smaller than 2.5 microns was 99%.

Conclusion: In conclusion, the combination of nanofiber filters with a metal-organic framework and aluminum pre-filters presents an effective solution for controlling particulate pollutants from machining operations. However, further research is necessary to comprehensively assess the system's performance, particularly regarding dust loading capacity. Future studies should also explore the effects of various factors, such as airflow rate and the type of metalworking fluid, on the system's efficacy.

Keywords: Local exhaust ventilation system, Filtration, CNC, Metalworking fluids, Nanofiber filter, Metal-organic framework

HOW TO CITE THIS ARTICLE

Helmi Kohnehsahri M., Golbabaie F., Farhang Dehghan S., Zendehe R., Abbasi A., Yadegar Z. Design, Construction, and Evaluation of an Air Filtration System Based on a Nanofiber Filter Containing a Metal-Organic Framework for the Removal of Aerosols Emitted from CNC Machining Operations. *J Health Saf Work*. 2025; 15(2): 385-411.

* Corresponding Author Email: Somayeh.farhang@gmail.com

Copyright © 2025 The Authors.

Published by Tehran University of Medical Sciences

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

1. INTRODUCTION

Today, industries are seeking advancements in all aspects of production, with the economic environment playing a crucial role in realizing this objective. One of the most important industrial processes for producing equipment, tools, parts, and structures is machining, whose efficiency depends on several factors, including processing conditions and feed rate. To reduce damage to equipment, increase their lifespan, and absorb generated heat while decreasing friction between the tool and the workpiece, the use of metalworking fluids has been proposed as an effective solution. These fluids are used in various metalworking and machining processes for lubrication, cooling contact surfaces, and removing metal particles. Given the rapid growth of industries, the consumption of these fluids has also increased significantly, with global annual consumption estimated to exceed two billion liters.

In the United States, approximately 155 million gallons of these fluids are produced annually, and about 1.2 million workers are exposed to pollutants resulting from them. Although there are no accurate statistics on production and consumption in Iran, field studies indicate that in just one industry producing engines, gearboxes, and axles, the annual consumption is around 200,000 liters. This increased consumption can pose serious health risks to workers. Metalworking fluids are produced in three main types: pure oils (mineral oils, anhydrous), solutions (mineral oils emulsified in water), and synthetic fluids (water with soluble compounds, without mineral oils). A key component of the first two types is mineral oil, a complex mixture of various chemicals. Depending on refining quality, mineral oils may contain toxic compounds such as N-Nitroso, triethanolamine, diethanolamine, formaldehyde, and polycyclic aromatic hydrocarbons, which can be harmful to health.

In industrial processes, especially when in contact with high temperatures and rapidly moving surfaces, small droplets of these oils are produced as aerosols or mists and released into the air. Oil mists, mainly containing particles with diameters of 0.1 to 1 micron, can remain suspended in the air and enter the body through inhalation or ingestion. These particles can irritate the eyes, nose, and throat, and smaller particles can penetrate deeper into the lungs. Long-term inhalation of these mists can lead to diseases such as occupational asthma,

pulmonary fibrosis, hypersensitivity pneumonitis, and even lipid pneumonia. Research by the IARC indicates that mineral oils used in metalworking can cause skin cancer.

To control the harmful effects of metalworking fluids, several measures can be implemented, including preventing aerosol generation, improving machining equipment design, replacing hazardous materials, and using air purification and personal protective equipment. However, due to economic and technological limitations, implementing these solutions is often infeasible. Currently, the most common control method is using air purification systems to remove aerosols and pollutants from metalworking fluids. These systems operate based on mechanisms such as filtration, adsorption, or electrostatic methods, each with its advantages and disadvantages. For example, electrostatic filters are effective in removing airborne particles but may not perform well in high-humidity environments, have high costs, consume a lot of electricity, and pose safety hazards when removing water and soap mists. Other methods, such as scrubber systems and adsorption, do not adequately remove pollutants from machining operations.

Filtration is one of the most common methods for removing particles from air streams, widely used across industries. In this method, particles are separated from the air stream using physical mechanisms such as gravitational settling, inertial impaction, and diffusion. Recently, nanofiber technology has gained attention as an effective method for particle filtration due to its high collection surface area and low airflow resistance. In filtration, molecular mechanisms also allow for the chemical absorption of particles, gases, and vapors alongside physical mechanisms. Adding organic or inorganic compounds to filter fibers has gained significant attention, allowing for the production of hybrid fibers with special functional properties. The use of metal-organic frameworks (MOFs) has enabled the production of hybrid filters with optimal performance due to their high adsorption capabilities. Studies show that integrating MOFs with polymer fibers forms fibrous composite materials that offer more advantages than single-component polymer films and mixed-matrix membranes. This combination can enhance molecular transport and facilitate easier access to active sites of the MOFs, making fibrous composites attractive for applications in textiles, personal protective equipment, air

purification, and filtration.

Accordingly, this study aims to design, construct, and evaluate an air filtration system for removing aerosols emitted from CNC machining operations using nanofiber filters containing metal-organic frameworks. The air filtration system refers to a collection consisting of a cartridge filter, nanofiber containing MOFs, an aluminum filter, and other accessories. It is anticipated that the filtration system utilizing nanofibers containing metal-organic frameworks could have a lower pressure drop compared to existing air purification systems due to its high porosity and ease of airflow passage, thereby reducing energy consumption in machining industries. The design aims to significantly reduce the dimensions of the air purifier for use in the outlet channel of the ventilation system, as air purification systems are typically large devices occupying significant workshop space.

2. MATERIAL AND METHODS

The study was conducted in an industrial setting that utilized various machining equipment, including CNC and milling machines, and grinders. The facility employed water-based coolants during machining processes, which contributed to the generation of oil mist. The steps were carried out in the following order:

- Analysis of the performance of the existing ventilation system and its design challenges
- Pre-design phase of the local exhaust ventilation system
- Synthesis of the metal-organic framework ZIF-8 and construction of the nanofiber media filter
- Evaluation of the structural properties of the nanofiber filter containing the metal-organic framework
 - Design calculations.
 - Construction of the filtration system
 - Construction of the local exhaust ventilation system
- Evaluation of the air filtration system's performance

The first step in the study was a detailed analysis of the existing ventilation system to identify potential challenges and areas for improvement. A site survey was conducted to gather critical information about the pollutant sources, workplace layout, and equipment locations.

In the design phase, the following considerations

were taken into account:

- Pollutant reactivity, flammability, explosiveness, and toxicity
- The workflow of the machining process, including raw materials, secondary compounds, and main products
- Ergonomic factors and the movement of workers in relation to the machinery
- The positioning of ducts and ventilation fans to optimize pollutant capture while minimizing interference with production processes

This study focuses on the synthesis of the ZIF-8 framework, chosen for its ease of synthesis, durability, and lower production costs, making it suitable for commercialization. The synthesis involved using six-hydrate zinc nitrate (Merck-Germany) and 2-methylimidazole (Merck-Germany). Specifically, 4 grams of zinc nitrate was dissolved in 150 milliliters of methanol, while 8 grams of 2-methylimidazole was also dissolved in 150 milliliters of methanol. The mixtures were stirred for 3 hours, after which the zinc nitrate was added to the 2-methylimidazole solution and mixed at 50 degrees Celsius for 140 minutes. The resulting solution underwent centrifugation at 6000 rpm for 30 minutes, was washed twice with methanol, and dried in an oven at 50 degrees for 24 hours.

For nanofiber production, polyamide 6 (PA6) from Sigma Aldrich was selected due to its excellent mechanical properties, thermal and chemical stability, and capability to form thin fibers, making it ideal for electrospinning. Formic acid served as the solvent, and the electrospinning solution was prepared at a 20% weight concentration, maintaining a weight ratio of 1:10 between ZIF-8 and PA6. The solution was stirred for 20 hours to achieve homogeneity and then placed in an ultrasonic bath for 2 hours to prevent agglomeration of nanoparticles. The electrospinning process was conducted under optimal conditions: an applied voltage of 10 kV, a 10 cm distance between the needle and collector, an air temperature of 25 degrees Celsius, and a duration of 120 minutes.

Structural characteristics of the nanofiber filter were analyzed using Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR), scanning electron microscopy (SEM), and BET testing. The hood design for the ventilation system was based on equipment specifications and pollutant generation mechanisms. Due to space constraints for worker access, a standard non-enclosing hood (VS-80-12) was used, as recommended in the ACGIH

industrial ventilation manual. To calculate the ventilation system specifications, psychometric data, airflow rates, channel velocities, pressure drop coefficients, and channel dimensions were required. The pressure-velocity method, which accounts for pressure drops due to velocity changes and friction, was employed for these calculations.

The filtration system comprised two main sections: an aluminum pre-filter and an E11 class filter with a nanofiber layer. The pre-filter was designed to capture larger pollutants such as metal chips and lubricating liquid droplets, chosen for its mechanical strength, corrosion resistance, and washability. This pre-filter reduces the overall pollutant load and protects the exhaust fan, thus enhancing system efficiency. The second section, the E11 class filter, targets finer particles ($PM_{2.5}$) and aerosols from lubricating liquids used in grinding.

The nanofiber filter was laminated onto the E11 filter in collaboration with a filter manufacturing company. The lamination process involved applying special adhesives between layers, ensuring strong bonding without compromising filtration efficiency. The layers were pressed at 70 degrees Celsius to enhance adhesion and then stabilized in a controlled environment. The pleating process created uniform pleats in the filter layers, which were held in place by special molds to ensure the final shape.

In this study, a centrifugal fan with radial blades was utilized, known for its stability against pollutants and efficiency in gas transfer. The fan's performance was evaluated based on airflow rate, static and total pressure, motor speed, suction inlet diameter, mechanical efficiency, and power.

To assess the filtration system's performance,

an E11 class filter was tested against the nanofiber-enhanced filter. Particle concentrations were measured before and after airflow passed through the system, focusing on various aerodynamic diameters. The ventilation system operated under standard conditions, with contaminated air introduced for testing.

3. RESULTS AND DISCUSSION

During visits to the industrial unit under study, various factors were assessed, including the dimensions and coordinates of pollutant sources, existing devices, personnel movement paths, working methods, access limits, and design obstacles. Due to the inefficiency of the installed ventilation system, a redesign was necessary, focusing solely on the ventilation system while disregarding other pollution sources.

The extraction hood was designed to be as close as possible to the CNC machine's grinding wheel. A flexible (accordion) duct was utilized to transfer contaminated air to the filters, allowing for high aerosol removal efficiency without the need for ducting to discharge extracted air, as the purified air is returned to the environment. The local ventilation system comprises several components: a local extraction hood, a flexible duct, a filtration chamber, an aluminum filter, a centrifugal fan, a tube sheet, and a cartridge filter module (Figure 1).

To avoid obstructing the operator's view during grinding, the extraction hood was mounted on the multi-axis arm of the device, allowing it to move with the grinding wheel. The optimal installation distance for the hood was determined to be 25 centimeters from the operation point. The hood's dimensions were based on guidelines from "Industrial Ventilation," ensuring the width was

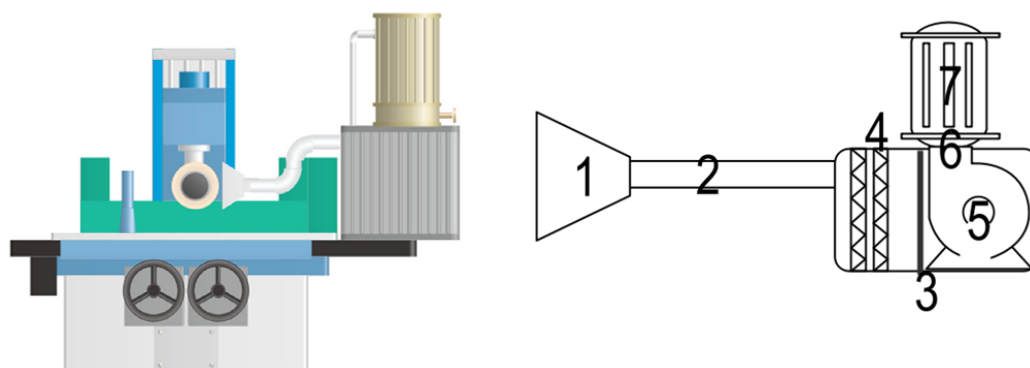


Fig. 1: Schematic of the designed local exhaust ventilation system (1 - Local extraction hood, 2 - Flexible accordion duct, 3 - Filtration chamber, 4 - Aluminum filter, 5 - Centrifugal fan with radial blades, 6 - Tube sheet, and 7 - Cartridge filter containing a metal-organic framework nanofiber)

Table 1: Performance results of the filtration system based on the mass concentration of particles

Filtration system	Pressure Difference (Pa)	Hood Face Velocity (m/s)	Inlet Concentration (mg/m ³)			Outlet Concentration (mg/m ³)			System Efficiency (%)
Filtration System with E11 Filter	124	18.72	12.57	9.42	11.17	0.82	1.93	0.57	92.88±2.44
E11 with a Nanofiber Layer Containing a Metal-Organic Framework	143	17.32	9.23	8.95	10.33	0	0	0	100

at least 50% greater than the estimated pollution plume diameter. The final dimensions were set at 10 × 25 centimeters, with a 45-degree entrance angle and a throat loss coefficient of 0.25, ensuring effective pollutant capture.

For optimal operation, the ventilation system requires a fan with the following specifications:

Inlet Diameter: 13 inches

Motor Speed: 1191 rpm

Motor Power: 1.51 horsepower

Airflow Rate: 1273 acfm

An aluminum pre-filter was installed as the first stage of purification in the airflow path before the fan, effectively capturing metal chips and lubricant particles. Following this, an E11 cartridge filter combined with a nanofiber filter containing a metal-organic framework was used as the second purification stage. This filter can withstand a maximum surface velocity of 0.2 m/s under specified pressure differentials, with three square meters of filter area sufficient for the system's airflow.

Performance tests indicated varying efficiencies for different particle sizes. The E11 filter demonstrated a removal efficiency of 92.64% for 0.3 micron particles and 94.27% for 0.5 micron particles. As particle size increased, removal efficiency improved, reaching 95.96% for 1 micron and 96.68% for 2.5 micron particles. The filtration system achieved 100% efficiency for particles sized 5 microns and above.

These results confirm that the filtration system effectively reduces secondary pollutant concentrations, particularly for larger particles. While the designed filter shows acceptable efficiency for submicron particles compared to the E11 filter, a reduction in efficiency for smaller sizes is expected due to limitations in particle capture mechanisms.

To evaluate the filtration system's performance, mass concentration was assessed in two scenarios: using an E11 filter and using the E11 filter with a nanofiber layer. Results indicated a pressure

differential of 124 Pascal and an efficiency of 92.88% for the first scenario. In the second scenario, the pressure differential was 143 Pascal, achieving 100% efficiency (Table 1).

This study marks a significant advancement in improving workplace air quality and mitigating the harmful effects of machining-related pollutants. However, it has limitations, notably concerning filter dust capacity and saturation. As operating time increases, filters clog, reducing efficiency and necessitating periodic replacements, which raises maintenance costs.

Oil recovery from metalworking fluids remains a challenge not addressed in this study. While coagulating filters could enhance oil-water separation, further investigation is needed. The initial costs of advanced filtration systems, particularly those using nanofibers, may be high, along with ongoing maintenance and replacement expenses. The long-term environmental and health impacts of these systems are not fully understood, warranting further research to evaluate these effects comprehensively. This study primarily focused on nanofiber filters with a metal-organic framework, which, while promising for pollutant removal, may not be suitable for all metalworking fluids or specific operational conditions.

4. CONCLUSIONS

The system developed in this study demonstrated effective performance in controlling pollutants from machining operations, successfully removing contaminant particles at the source. Results indicate a removal efficiency of 100% for larger particles, while the average for particles smaller than 2.5 microns was 99.88%.

These findings suggest that using nanofiber filters combined with a metal-organic framework and aluminum pre-filters is a highly effective solution for managing pollutants in machining operations. This advancement could significantly enhance working conditions across various

industries and mitigate the harmful effects of air pollution on worker health and the environment.

However, to fully evaluate the system's performance, further studies are needed to assess

its dust capacity and saturation. Future research should also investigate the impact of factors such as airflow rate and the type of metalworking fluid on system performance.

طراحی، ساخت و ارزیابی سامانه فیلتراسیون هوا مبتنی بر فیلتر نانولیفی حاوی چارچوب فلزی - آلی به منظور حذف آئروسول های منتشر شده از عملیات تراشکاری CNC

مهرداد حلمی کهنه شهری^۱، فریده گلبابایی^۲، سمیه فرهنگ دهقان^{۳،۱*}، رضوان زنده دل^۲، علیرضا عباسی^۳،
زهرایادگار^۱

^۱دانشکده بهداشت و ایمنی، دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی، تهران، ایران

^۲گروه مهندسی بهداشت حرفه‌ای، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی تهران، تهران، ایران

^۳مرکز تحقیقات کنترل عوامل زیان آور محیط و کار، پژوهشکده علوم بهداشتی و محیط زیست، دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی، تهران، ایران

^۴گروه شیمی معدنی، دانشکده شیمی، پردیس علوم، دانشگاه تهران، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۹/۲۶، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۴/۴

چکیده

مقدمه: امروزه با پیشرفت صنایع و افزایش استفاده از مایعات فلزکاری، کنترل آلاینده‌های ناشی از این مایعات با چالش‌های بسیاری روبه‌رو است. این مطالعه، با هدف ارائه راهکاری برای کنترل آلاینده‌های ناشی از عملیات ماشین‌کاری از طریق طراحی یک سامانه فیلتراسیون هوا اجرا گردید.

روش کار: با توجه به شرایط ایستگاه کار و نمونه برداری‌های انجام گرفته از هوای محیط کار، طراحی سامانه تهویه مکنده موضعی جهت جمع‌آوری آلاینده‌های انتشاری دستگاه سنگ محور CNC با اقتباس از استاندارد VS-۸۰-۱۲ ACGIH انجام شد. بخش فیلتراسیون سامانه متشکل از پیش‌فیلتر آلومینیومی و فیلتر کلاس E۱۱ همراه با فیلتر نانولیفی حاوی چارچوب فلزی-آلی طراحی و ساخته شد. ارزیابی عملکرد سامانه با اندازه‌گیری غلظت عددی ذرات و غلظت جرمی میست روغنی در ورودی و خروجی سامانه انجام شد و با یک نمونه فیلتر کلاس E۱۱، نتایج مورد مقایسه و تجزیه و تحلیل قرار گرفت.

یافته‌ها: نتایج حاصل از آنالیز XRD و FTIR نشان داد که ZIF-۸ کریستالیتی بالایی دارد و به‌طور موفقیت‌آمیزی در ساختار فیلتر مدبای لیفی حاوی چارچوب فلزی-آلی جایگزین شده است. نتایج ارزیابی عملکرد سامانه نشان داد که این سامانه قادر است ذرات آلاینده را به‌طور مؤثر در منبع تولید آن حذف کند. به‌ویژه در ذرات بزرگ‌تر، کارایی اولیه به ۱۰۰٪ رسید و در خصوص ذرات کوچک‌تر از ۲/۵ میکرون، موفق به حذف میانگین ۹۹٪ از ذرات آلاینده‌ها شد.

نتیجه‌گیری: استفاده از فیلترهای نانولیفی با چارچوب فلزی-آلی در کنار پیش‌فیلترهای آلومینیومی، یک راهکار مؤثر و کارآمد برای کنترل آلاینده‌های ذره‌ای ناشی از عملیات ماشین‌کاری است. با این حال، برای ارزیابی جامع‌تر عملکرد این سامانه، نیاز به مطالعات بیشتری در زمینه ظرفیت غبارگیری است. پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده، تاثیر عوامل مختلفی مانند دبی هوا و نوع مایع فلزکاری بر عملکرد این سامانه مورد بررسی قرار گیرد.

کلمات کلیدی: تهویه مکنده موضعی، فیلتراسیون، CNC، مایعات فلزکاری، فیلتر نانولیفی، چارچوب فلزی-آلی

مقدمه

امروزه صنایع مختلف به دنبال پیشرفت در تمامی ابعاد تولید بوده و وضعیت اقتصادی نقش مهمی در دستیابی به این هدف ایفا می‌کند (۱). یکی از مهم‌ترین فرآیندهای صنعتی برای تولید تجهیزات، ابزارها، قطعات و سازه‌ها، عملیات ماشین‌کاری است که راندمان آن به عوامل متعددی از جمله شرایط فرآیندی و نرخ تغذیه وابسته است. برای کاهش آسیب به تجهیزات، افزایش طول عمر آنها و همچنین جذب حرارت تولیدشده و کاهش اصطکاک میان ابزار و قطعه، استفاده از مایعات فلزکاری به‌عنوان راهکاری مؤثر مطرح شده است (۲). این مایعات در فرآیندهای مختلف فلزکاری و ماشین‌کاری به منظور روان‌کاری، خنک‌سازی سطوح تماس و همچنین حذف ذرات فلزی به کار گرفته می‌شوند. با توجه به رشد روزافزون صنایع، مصرف این مایعات نیز به‌طور گسترده افزایش یافته است، به‌طوری‌که مصرف سالانه جهانی مایعات فلزکاری بیش از دو میلیارد لیتر تخمین زده می‌شود (۳).

در ایالات متحده آمریکا سالانه حدود ۱۵۵ میلیون گالن از این مایعات تولید می‌شود و حدود ۱/۲ میلیون کارگران با آلاینده‌های منتج از این مایعات مواجهه دارند (۴). هرچند در ایران آمار دقیقی از میزان تولید و مصرف این مایعات وجود ندارد. اما بررسی‌های میدانی نشان می‌دهد که تنها در یکی از صنایع تولید موتور، گیربکس و اکسل، میزان مصرف سالانه مایعات فلزکاری حدود ۲۰۰,۰۰۰ لیتر است. این افزایش مصرف در محیط‌های کاری می‌تواند عوارض جدی سلامتی برای کارگران ایجاد کند (۵). مایعات فلزکاری در سه نوع اصلی شامل روغن خالص (روغن‌های معدنی، بدون آب)، محلول (روغن‌های معدنی امولسیون شده در آب) و سنتزی (آب با ترکیبات محلول، بدون روغن‌های معدنی) تولید و عرضه می‌شوند. یکی از مهمترین اجزای مایعات فلزکاری نوع اول و دوم، روغن معدنی (Mineral oil) می‌باشد که مخلوط پیچیده‌ای از مواد شیمیایی مختلف است (۶). بسته به کیفیت پالایش، روغن‌های

معدنی ممکن است حاوی ترکیبات شیمیایی سمی مانند N-Nitroso، تری‌اتانول‌آمین، دی‌اتانول‌آمین، فرمالدئید و هیدروکربن‌های پلی‌آروماتیک باشند که می‌توانند برای سلامت افراد مضر باشند (۷). در فرآیندهای صنعتی، به‌ویژه در تماس با دمای بالا و سطوح در حال حرکت سریع، قطرات کوچکی از این روغن‌ها به شکل آئروسول یا میست تولید و در هوا آزاد می‌شوند. میست‌های روغنی که عمدتاً شامل ذراتی با قطر ۰/۱ تا ۱ میکرون هستند، می‌توانند در هوا معلق مانده و از طریق استنشاق یا بلعیدن وارد بدن شوند. این ذرات می‌توانند برای چشم، بینی و گلو تحریک‌کننده بوده و ذرات کوچکتر نیز به نواحی عمقی‌تر ریه نفوذ کرده و رسوب کنند. استنشاق این میست‌ها در طولانی‌مدت می‌تواند منجر به بیماری‌هایی مانند آسم شغلی، فیبروز ریوی، پنومونیت ناشی از افزایش حساسیت و حتی ذات‌الریه لیپوئیدی شود (۸). بر اساس تحقیقات صورت‌گرفته توسط سازمان جهانی تحقیقات سرطان^۱، شواهد کافی وجود دارد که نشان می‌دهد روغن‌های معدنی مورد استفاده در صنایع فلزکاری می‌توانند عامل ایجاد سرطان پوست باشند (۹).

برای کنترل اثرات مضر مایعات فلزکاری، اقدامات متعددی از جمله جلوگیری از تولید آئروسول، بهبود طراحی تجهیزات ماشین‌کاری، جایگزینی مواد بی‌خطر و استفاده از تجهیزات تصفیه هوا و حفاظت فردی قابل اجرا هستند. با این حال، به دلیل محدودیت‌های اقتصادی و فناوری، اجرای این راهکارها در بسیاری از موارد عملی نیست (۱۰). در شرایط کنونی، رایج‌ترین روش کنترل، استفاده از سیستم‌های تصفیه هوا برای حذف آئروسول‌های مایعات فلزکاری و آلودگی‌های ناشی از آن است. این سیستم‌ها بر اساس مکانیسم‌هایی مانند فیلتراسیون، جذب سطحی یا الکترواستاتیک عمل می‌کنند و هرکدام دارای مزایا و معایب مخصوص به خود هستند. به عنوان مثال، فیلترهای الکترواستاتیک در حذف ذرات هوا کارایی بالایی دارند اما بدلیل کاهش عملکرد در محیط‌هایی با رطوبت بالا (با توجه به ماهیت آب و صابون)، قیمت بالا، مصرف بالای

1. International agency for research on cancer(IARC)

فرآیندهای فیلتراسیون توجیه اقتصادی قابل توجهی دارد. فیلترهای هیبریدی حاوی ماف‌ها به دلیل عملکرد بهینه خود در جذب ذرات و گازها، می‌توانند هزینه‌های عملیاتی را در طولانی‌مدت به طور قابل توجهی کاهش دهند. این فیلترها نیاز به تعویض مکرر را کاهش داده و در نتیجه هزینه‌های نگهداری را به حداقل می‌رسانند. علاوه بر این، افزایش کارایی در تصفیه هوا و کاهش آلودگی می‌تواند منجر به بهبود سلامت عمومی و کاهش هزینه‌های بهداشتی و درمانی مرتبط با بیماری‌های ناشی از آلودگی هوا شود. همچنین، پتانسیل بازار برای این فیلترها در صنایع مختلف، از جمله نساجی و تجهیزات حفاظت فردی، به دلیل ویژگی‌های منحصر به فرد آن‌ها، می‌تواند به جذب سرمایه‌گذاری‌های بیشتر و توسعه فناوری‌های نوین کمک کند. در نهایت، سرمایه‌گذاری در تحقیق و توسعه بیشتر در زمینه تولید ماف‌ها می‌تواند به کاهش هزینه‌ها و افزایش دسترسی به این فناوری‌های پیشرفته منجر شود (۲۰).

مطالعه حاضر با هدف طراحی، ساخت و ارزیابی سامانه فیلتراسیون هوا جهت حذف آئروسول‌های منتشر شده از عملیات تراشکاری CNC² با استفاده از فیلترهای نانولیفی حاوی چارچوب فلزی-آلی انجام گردید. در مطالعه حاضر منظور از سامانه فیلتراسیون هوا، مجموعه‌ای متشکل از فیلتر کارتریجی، نانوالیف حاوی ماف و فیلتر آلومینیومی و سایر ملحقات است. در طراحی این سامانه سعی شد تا ابعاد تصفیه‌کننده هوا به طور چشم‌گیری کاهش یافته، به‌طوری‌که بتوان در مسیر کانال خروجی تهویه هوا نیز استفاده کرد. این درحالی است سیستم‌های تصفیه هوا معمولاً به‌صورت یک دستگاه بزرگ در کنار دستگاه ماشین‌کاری مورد استفاده قرار می‌گیرند و فضای بسیار زیادی را در کارگاه اشغال می‌کنند (۱۸).

روش کار

صنعت مورد مطالعه

صنعت مورد مطالعه یکی از صنایع فعال در حوزه ماشین‌کاری می‌باشد. طی بازدیدهای انجام شده از

2. Computer numerical control

انرژی برق و احتمال ایجاد حوادث ایمنی در محیط کار عملکرد مطلوبی برای حذف میست‌های آب و صابون ارائه نمی‌دهند (۱۱). از سایر روش‌های مورد استفاده در صنایع بکارگیری سامانه‌های پاک‌کننده اسکرابر و جذب سطحی می‌باشد که مقبولیت لازم را برای حذف آلودگی‌های ناشی از عملیات تراشکاری ندارند (۱۲).

فیلتراسیون یکی از متداول‌ترین روش‌ها برای حذف ذرات از جریان هوا است که در صنایع مختلف کاربرد گسترده‌ای دارد. در این روش، ذرات با استفاده از مکانیسم‌های فیزیکی مانند ته‌نشست گرانشی، برخورد اینرسی و انتشار از جریان هوا جدا می‌شوند (۱۳). در سال‌های اخیر، فناوری نانوالیف به دلیل سطح جمع‌آوری بالا و مقاومت پایین در برابر عبور هوا، به‌عنوان روشی مؤثر در فیلتراسیون ذرات مورد توجه قرار گرفته است (۱۴). در فیلتراسیون، از طریق مکانیسم فیلتراسیون مولکولی، امکان جذب شیمیایی ذرات و گازها و بخارات نیز در کنار مکانیسم‌های فیزیکی فراهم است. امروزه افزودن ترکیبات آلی یا معدنی به الیف فیلتر مورد توجه زیادی قرار گرفته است. زیرا اجازه تولید الیف ترکیبی (هیبریدی) با خواص عملکردی ویژه را فراهم می‌نماید (۱۵). استفاده از چارچوب‌های فلزی-آلی (ماف‌ها-MOFs) نیز به دلیل توانایی بالای آنها در جذب فیزیکی و شیمیایی، امکان تولید فیلترهای هیبریدی با عملکرد بهینه را فراهم کرده است (۱۶). مطالعات نشان داده‌اند که ادغام ماف با الیف (پلیمری)، مواد کامپوزیتی لیفی را تشکیل می‌دهد که مزایایی بیشتری نسبت به فیلم‌های پلیمری تک جزئی و غشاهای ماتریس مخلوط دارند. این ترکیب می‌تواند انتقال مولکولی را بهبود بخشد و باعث دسترسی راحت‌تر مواد به سایت‌های فعال ماف‌ها شود. این ویژگی، کامپوزیت‌های لیفی را برای کاربرد در صنعت نساجی، تجهیزات حفاظت فردی، تصفیه و فیلتراسیون هوا جذاب می‌کند (۱۷). نانوالیف حاوی چارچوب فلزی-آلی پتانسیل بالایی برای تصفیه هوا دارند و خاصیت ضد میکروبی آنها نیز به اثبات رسیده است (۱۹، ۱۸). با وجود چالش‌های مرتبط با تولید و سنتز ماف‌ها در مقادیر زیاد و هزینه‌های اقتصادی آن‌ها، استفاده از این ترکیبات در

1. Metal-organic frameworks

واحد صنعتی مورد مطالعه، منابع مولد آلاینده در محیط شامل ۵ دستگاه فرز دستی، ۶ دستگاه تراش دستی، یک دستگاه تراش CNC و دو دستگاه سنگ تراش CNC شناسایی گردید. در همه این دستگاه‌ها از محلول آب و صابون به عنوان مایع روانکار در عملیات ماشین‌کاری استفاده می‌شد. **شکل ۱ پیوست** جانمایی دستگاه‌های مذکور در کارگاه را نشان می‌دهد. در نهایت دستگاه سنگ تراش CNC مدل SK20 جهت طراحی و نصب سامانه فیلتراسیون طراحی شده انتخاب گردید. این دستگاه یک دستگاه سنگ تراش CNC می‌باشد که قطعات جهت لایه‌برداری بر روی آن قرار گرفته و دستگاه با استفاده از سنگ و آب و صابون لایه برداری انجام می‌دهد.

تحلیل عملکرد سامانه تهویه موجود و چالش‌های طراحی آن

در واحد مذکور به منظور جلوگیری از انتشار آلاینده‌های حاصل از تراش CNC، سامانه تهویه موضعی در کنار دستگاه مربوطه تعبیه گردیده بود. این سامانه از طریق دو ورودی، هوای آلوده مجاور دستگاه را مکش کرده و جریان هوای آلوده را به واسطه دو کانال مجاور هم به بیرون از محیط کارگاه هدایت می‌نمود. نمای شماتیک سامانه مذکور در **شکل ۲ پیوست** آمده شده است. این سامانه فاقد تجهیز تصفیه کننده هوا بود که همین امر موجب شد با وجود فاصله زیاد محل تخلیه هوای آلوده از محیط کار، به دلیل طراحی غیراصولی سامانه تهویه، بخارات آب-صابون در محیط اطراف پخش شوند. در واقع، میست آب-صابون مکش شده در کانال، پس از خاموش شدن سامانه تهویه، مجدداً وارد محیط کارگاه می‌گردید. مراحل انجام مطالعه به ترتیب در ادامه ذکر شده است

طراحی سامانه تهویه مکنده موضعی

الف) مرحله پیش طراحی

قبل از ورود به مرحله طراحی، بازدید اولیه‌ای از محیط کار صورت گرفت و اطلاعات دقیقی در زمینه‌های زیر جمع‌آوری شد؛

- بررسی واکنش‌پذیری آلاینده‌ها با یکدیگر و با مواد محیط طراحی، قابلیت اشتعال و انفجار، سمیت و ...
- تعیین فرآیند کاری، مواد اولیه مصرفی، ترکیبات ثانویه و محصولات اصلی
- نحوه تولید و انتشار آلاینده‌ها (شناسایی منابع تولید آلودگی)
- توجه به ملاحظات ارگونومیکی و نحوه کار کارکنان
- تعیین مسیر کانال‌کشی و موقعیت قرارگیری هواکش و تصفیه‌کننده در خارج از محیط
- بررسی احتمال تداخل سامانه تهویه صنعتی با مسیر تردد افراد و سایر سیستم‌ها
- بررسی احتمال تداخل جریان هوای تهویه با فرآیند تولید
- اندازه‌گیری دمای خشک و رطوبت نسبی مجاور منبع انتشار آلاینده و خارج از محیط
- تعیین ارتفاع از سطح دریا در موقعیت طراحی

ب) ساخت فیلترمدیای نانولیفی

ساخت فیلتر نانوالیاف پلی آمید ۶ (PA6) حاوی چارچوب فلزی-آلی در دو مرحله انجام شد. در مرحله اول چارچوب فلزی-آلی مدنظر سنتز، سپس از طریق روش الکتروریسی محلول، فیلتر نانوالیاف حاوی چارچوب فلزی-آلی تولید شدند.

• سنتز چارچوب فلزی-آلی ZIF-8²

ماف ZIF-8 یک ساختار فلزی-آلی است که توسط یون‌های روی ساخته شده است و توسط چهار حلقه ایمیدازولات متصل شده‌اند، به همان نحوی که اتم‌های Si و Al به صورت کووالانسی توسط پل‌های اکسیژن در زئولیت‌ها به هم متصل می‌شوند. از آنجاکه زاویه فلز-ایمیدازول-فلز در زئولیت‌ها با زاویه ۱۴۵ درجه Si-O-Si مشابه است، ZIFs دارای توپولوژی‌های زئولیت مانند هستند برای سنتز ZIF-8، نیترا ت روی شش آب

1. Polyamide 6

2. Zeolitic imidazolate framework-8

قرار داده شد (۱۹). پس از آماده‌سازی محلول، فرآیند الکتروریسی با شرایط بهینه حاصل از مطالعه پایلوت به شرح زیر انجام گرفت (شکل ۴ پیوست): برای این کار دستگاه الکتروریسی محلول شرکت فناوران نانومقیاس مدل آزمایشگاهی ES1000 استفاده گردید که شرایط الکتروریسی آن شامل موارد زیر می باشد:

ولتاژ اعمال شده: ۱۵ کیلوولت؛ این ولتاژ جهت ایجاد میدان الکتریکی قوی برای کشیدن الیاف از سوزن به سمت جمع‌کننده ضروری است.

فاصله بین سوزن و جمع‌کننده: ۱۴ سانتی‌متر؛ این فاصله به دقت تنظیم شده تا امکان کشش و تشکیل مناسب الیاف فراهم شود.

دمای هوا: ۲۵ درجه سانتی‌گراد؛ دمای محیط فرآیند به‌گونه‌ای انتخاب شد که تبخیر حلال به‌صورت یکنواخت و بدون نوسانات دمایی صورت گیرد.

مدت زمان الکتروریسی: ۱۲۰ دقیقه؛ این زمان کافی بود تا مقدار مناسبی از الیاف تولیدشده و روی جمع‌کننده قرار گیرد.

نرخ تزریق محلول: ۰/۸ میلی‌لیتر در ساعت؛ این نرخ تزریق تنظیم شده تا جریان مداوم و یکنواخت محلول پلیمری به سمت سوزن تضمین گردد.

قطر سوزن: ۲۱ گیج؛ انتخاب این قطر سوزن به کاهش احتمال تشکیل قطرات بزرگ و بهبود کشش الیاف کمک می‌کند.

سرعت چرخش درام جمع‌کننده: ۵۰۰ دور در دقیقه؛ سرعت چرخش درام برای ایجاد یک الگوی یکنواخت و متراکم از نانوالیاف روی سطح جمع‌کننده تنظیم شد.

سرعت حرکت نازل: ۳۰۷ میلی‌متر در دقیقه؛ این سرعت نازل بهینه‌سازی شده تا پوشش یکنواخت و متقارن الیاف روی سطح جمع‌کننده تضمین شود (۱۹، ۲۳، ۲۴).

• ارزیابی ویژگی‌های ساختاری فیلتر نانولیفی حاوی چارچوب فلزی-آلی

نوع و ساختار چارچوب فلزی-آلی سنتز شده

(مرک-آلمان) به مقدار ۴ گرم در ۱۵۰ میلی‌لیتر متانول (مرک-آلمان) و ۲-میتیل ایمیدازول (مرک-آلمان) به مقدار ۸ گرم در ۱۵۰ میلی‌لیتر برای زمانی برابر ۳ ساعت هم زده شدند، پس از انحلال کامل، نیترات روی شش آبه به ۲-میتیل ایمیدازول اضافه گردید و در دمای ۵۰ درجه سلسیوس و برای زمانی برابر ۱۴۰ دقیقه درهم‌آمیخته شدند، محلول ایجادشده از طریق سانتریفیوژ با سرعت ۶۰۰۰ دور بر دقیقه و برای زمانی برابر ۳۰ دقیقه دیس پرس شد و دو بار با متانول به‌وسیله سانتریفیوژ شسته و داخل دستگاه آون در دمای ۵۰ درجه و برای زمانی برابر ۲۴ ساعت خشک گردید (شکل ۳ پیوست را ببیند) (۲۱).

• ساخت فیلتر نانوالیاف پلی آمیدی

برای تولید نانوالیاف، از پلی‌آمید ۶ (PA6) با وزن مولکولی g/mol ۱۳۶/۲ (شرکت سیگما آلد ریچ، آمریکا، با درصد خلوص $\geq 98\%$) به عنوان پلیمر پایه استفاده شد. این پلیمر به دلیل خواص مکانیکی مناسب، پایداری حرارتی (دمای ذوب $220^{\circ}C \sim$) و شیمیایی و همچنین قابلیت تشکیل الیاف نازک، انتخاب مناسبی برای الکتروریسی است. اسید فرمیک با وزن مولکولی g/mol ۴۶/۰۳ (شرکت سیگما آلد ریچ، آمریکا، درصد خلوص $\geq 98\%$) به عنوان حلال در تهیه محلول الکتروریسی تهیه شد. محلول الکتروریسی با غلظت ۲۰ درصد وزنی (wt./20) تهیه شد و نسبت وزنی ۱:۱۰ بین نانوذرات ZIF-8 و پلی‌آمید ۶ رعایت شد. این نسبت وزنی بر اساس مطالعات پایلوت و پیشین بهینه‌سازی شد (۲۲) تا پراکندگی یکنواخت ZIF-8 در ماتریس پلیمری تضمین شود و در عین حال مانع از تجمع بیش از حد نانوذرات در طول فرآیند الکتروریسی گردد.

محلول الکتروریسی به مدت ۲۰ ساعت توسط همزن مغناطیسی با دمای ۴۰ درجه سلسیوس در دمای اتاق هم زده شد تا از تشکیل یک محلول کاملاً همگن و پایدار اطمینان حاصل شود. به‌منظور بهبود بیشتر پراکندگی و جلوگیری از تشکیل تجمعات نانوذرات ZIF-8، محلول پس از هم‌زدن به مدت ۲ ساعت در یک حمام اولتراسونیک

طیف‌سنجی مادون قرمز تبدیل فوریه (USA-FTIR¹-Nicolet 2700) و پراش اشعه ایکس (Japan-XRD²-Shimadzu 7000) همچنین، قطر الیاف فیلتر خالص و بعد از پوشش دهی با چارچوب فلزی-آلی با کمک تهیه تصاویر (SEM-TEScan Vega model-) و پورسایز (قطر منافذ)، مساحت سطحی چارچوب فلزی-آلی‌های سنتز شده با کمک آزمون BET³ (Microtrac Bel- Belsorp mini II-Japan) تعیین شد (۲۳-۲۵). در مطالعه حاضر نیز، برای برآورد قطرالیاف فیلتر از الگوریتم‌های تجزیه و تحلیل تصاویر SEM⁴ و نرم‌افزار Wayne Rosband, National Image J institutes of health, USA, Java 1-6-0-20 (1.50i) استفاده شد.

پ) مرحله طراحی

در این مرحله اقدامات زیر مطابق با استاندارد انجمن متخصصین بهداشت صنعتی آمریکا^۵ (ACGIH) (۲۶) انجام شد.

• مشخصات فنی دستگاه سنگ محور CNC

دستگاه سنگ‌محور CNC یکی از ابزارهای پیشرفته ماشین‌کاری است که برای سنگ‌زنی دقیق سطوح خارجی یا داخلی قطعات استوانه‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد. این دستگاه با کنترل کامپیوتری، مواد اضافی را از سطح قطعه کار حذف می‌کند. در این فرآیند، قطعه کار معمولاً بین دو نقطه تکیه‌گاهی ثابت شده و ابزار سنگ با حرکت دقیق سطوح را پردازش می‌کند. بازوی اهرمی دستگاه در سه محور X، Y و Z قابلیت حرکت دارد. مشخصات فنی این دستگاه به‌عنوان داده‌های ضروری برای انجام محاسبات مقدماتی، که مبنای ورود به محاسبات اصلی طراحی سامانه تهویه می‌باشند، در جدول ۱ پیوست ارائه شده است.

1. Fourier transform infrared spectroscopy
2. X-ray diffractometer
3. Brunauer-Emmett-Teller
4. Scanning electron microscopy
5. American conference of governmental industrial hygienists

• انتخاب هود استاندارد متناسب با منبع تولید آلاینده

نوع هود بکار رفته به مشخصات فیزیکی تجهیزات مورد استفاده در فرآیند، سازوکار تولید آلاینده و رابطه راهبر-ماشین بستگی دارد. در این مطالعه، به دلیل عدم امکان طراحی هودهای محصورکننده به واسطه نیاز به فضای دسترسی کارکنان، از هود غیرمحصور استاندارد VS-80 (SURFACE GRINDER) 12 که در کتابچه راهنمای طراحی سیستم‌های تهویه صنعتی ACGIH⁶ معرفی شده است (شکل ۵ پیوست)، برای طراحی سامانه تهویه مذکور استفاده شد (۲۶، ۲۷). هود مکنده باید به گونه‌ای طراحی و نصب شود که از ایجاد مزاحمت در دید و عملکرد اپراتور حین عملیات سنگ‌زنی جلوگیری کند. فاصله بهینه برای نصب هود با توجه به محدودیت‌های دستگاه و جلوگیری از اختلالات، ۲۵ سانتی‌متر از نقطه عملیات تا ورودی هود تعیین شد. ابعاد هود بر اساس اصول ارائه‌شده در کتاب Industrial Ventilation تعیین گردید. با توجه به توصیه این کتاب، عرض هود باید حداقل ۵۰ درصد بیشتر از قطر تخمینی ابر آلودگی باشد (۲۸).

• انتخاب جنس و شکل کانال

در طراحی این مطالعه، با توجه به ملاحظات عملکرد دستگاه، محدودیت فضای موجود و چالش‌های اجرایی-اقتصادی در صنعت، استفاده از کانال انعطاف‌پذیر آکاردئونی متناسب با منبع انتشار پیشنهاد شد. علاوه بر این، با در نظر گرفتن مزایای کانال‌های گرد نسبت به کانال‌های چهارگوش از جمله کاهش رسوب آلاینده، افت فشار، صدا و ارتعاش، در سامانه تهویه طراحی‌شده این مطالعه، کانال‌های گرد انتخاب شدند (۲۶، ۲۷).

• محاسبه میزان هواگذر و سرعت جریان هوا در سامانه بر اساس روش‌های استاندارد

جهت ورود به مرحله محاسبات سامانه تهویه و تعیین کلیه مشخصات آن نیاز به مشخصات سایکرومتری محل، نقشه سامانه تهویه طراحی شده، مقادیر هواگذر از هر

6. American conference of governmental industrial hygienists

مورد استفاده در این پژوهش، چسب پلیمری حلال پایه (Solvent-based Polyurethane Adhesive) بوده است

(۲۹). این چسب به دلیل ویژگی‌های زیر انتخاب شد:

- ساختار شیمیایی این چسب با مواد پایه فیلتر (پلی‌آمید و چارچوب فلزی-آلی ZIF-8) سازگاری مولکولی دارد و واکنش‌پذیری آن‌ها را کاهش می‌دهد.
- چسب با ویسکوزیته کنترل شده حدود ۵۰۰-۸۰۰ cP اعمال شد تا به لایه‌های عمقی نفوذ نکند و مسیرهای فیلتراسیون را مسدود نکند.

• تحمل دمایی تا 120°C بدون تخریب ساختاری. پس از اعمال چسب، لایه‌ها تحت فشار قرار گرفتند تا کاملاً به یکدیگر بچسبند. این مرحله در دماهای 70°C درجه سلسیوس انجام شد که باعث افزایش استحکام پیوند بین لایه‌ها می‌شود. در این دما، زنجیره‌های پلیمری چسب به حالت نیمه‌ذوب می‌رسند و پیوند بین لایه‌ها را بدون تخریب ساختار ZIF-8 تقویت می‌کنند. دمای انتقال شیشه‌ای (Tg) پلی‌آمید $\approx 80^{\circ}\text{C}$ و پایداری حرارتی ZIF-8 تا 150°C است. بنابراین 70°C در محدوده ایمن قرار دارد (۳۰). نهایتاً برای تثبیت پیوند بین لایه‌ها، فیلتر به مدت زمان ۱۰ دقیقه در دمای کنترل شده قرار گرفت. مراحل پیسه دار کردن فیلترمدیا نیز به این ترتیب انجام شد: لایه‌های فیلتر از طریق یک ماشین مخصوص پلیسه‌زنی عبور داده شدند. این ماشین به‌طور دقیق چین‌های یکنواختی را در سراسر فیلتر ایجاد کرد. تعداد و اندازه چین‌ها بستگی به طراحی فیلتر و نیازهای کاربردی دارد. برای اطمینان از یکنواختی چین‌ها و جلوگیری از باز شدن آنها، از قالب‌ها یا فیکسچرهای مخصوص استفاده شد. این قالب‌ها چین‌ها را در جای خود نگه می‌دارند تا فیلتر شکل نهایی خود را بگیرد. پس از انجام فرآیند پلیسه‌کردن، فیلتر به ابعاد و شکل نهایی برش داده می‌شود و در قالب یا ساختار نهایی کارتریج HEPA² نصب گشت.

• انتخاب نوع هواکش

در مطالعه حاضر، از هواکش گریز از مرکز با پره‌های

شاخه، سرعت‌های استاندارد انتخابی کانال‌ها، ضرایب افت فشار موضعی، طول کانال‌ها و ابعاد سامانه می‌باشد. چهار روش به منظور انجام محاسبات سامانه‌های تهویه صنعتی بر اساس استاندارد ACGIH وجود دارد که در این مطالعه از روش فشار سرعت بر پایه طراحی سامانه متعادل استفاده گردید. جهت انجام محاسبات با روش مذکور از برگه محاسباتی استفاده شد. (۲۶، ۲۷).

• سامانه فیلتراسیون

سامانه فیلتراسیون طراحی شده برای این مطالعه، شامل دو بخش اصلی است که هر یک با هدف خاصی انتخاب و نصب شده‌اند. این ساختار به گونه‌ای طراحی شده است که ضمن بهینه‌سازی عملکرد تهویه، از ورود آلاینده‌های جامد و آئروسول‌های مضر به محیط کار جلوگیری کند. بخش اول، پیش‌فیلتر آلومینیومی، به منظور جداسازی آلاینده‌های درشت‌تر مانند تراشه‌های فلزی و قطرات بزرگ مایعات روانکاری طراحی شده است. این فیلتر به دلیل ویژگی‌هایی نظیر استحکام مکانیکی، مقاومت در برابر خوردگی، قابلیت شست‌وشو و کاهش بار آلودگی برای بخش ثانویه، انتخاب شد. این پیش‌فیلتر، ضمن کاهش بار آلاینده‌ها، از آسیب‌های احتمالی به هواکش جلوگیری کرده و کارایی کلی سامانه را افزایش می‌دهد (۲۶، ۲۷). بخش دوم، فیلتر کلاس E11 همراه با یک لایه نانولیفی حاوی چارچوب فلزی-آلی برای حذف ذرات ریزتر ($\text{PM}_{10} < 2.5$) و آئروسول‌های تولیدشده به واسطه استفاده از مایعات روانکاری در فرآیند سنگ‌زنی تعبیه شده است. پس از ساخت فیلترنانو لیفی حاوی ماف، با همیاری یک شرکت فیلترساز، فیلترنانولیفی بر روی فیلتر کلاس E11 با فرایند لمینت کردن نشانداده شد. ابتدا لایه‌های مورد استفاده، و لایه‌های محافظ آماده شدند. سپس چسب‌های مخصوصی که با مواد مختلف سازگارند، بین لایه‌ها اعمال شدند. نوع چسب انتخابی باید به گونه‌ای باشد که بدون تاثیر منفی بر قابلیت فیلترسازی، چسبندگی مناسبی را فراهم کند. چسب

1. Particulate matter

2. High efficiency particulate air

S_{pi} فشار استاتیک در دهانه ورودی هواکش (علامت منفی)
in wg

• فشار کل معادل هواکش

با توجه به توضیحات ذکر شده برای فشار استاتیک معادل هواکش، فشار کل معادل هواکش نیز به صورت زیر محاسبه گردید (۲۶، ۲۷)؛

$$EFTP = \frac{FTP}{KP_{in}} \quad \text{فرمول ۳}$$

• توان هواکش

جریان هوایی که وارد دهانه ورودی هواکش می شود دارای فشار، نیرو، انرژی و توان است. میزان توان ورودی هواکش های پیشنهادی به شرح زیر محاسبه گردید (۲۶، ۲۷).

$$AHP = \frac{Q_{inlet} \times EFTP}{6356} \quad \text{فرمول ۴}$$

Q هواگذر
AHP توان هواگذر
EFTP فشار کل معادل هواکش
cfm
Hp
in wg

• راندمان مکانیکی هواکش

راندمان مکانیکی هواکش با تعداد پره ها و زاویه خروج جریان هوا، رابطه مستقیم دارد. به این ترتیب با افزایش تعداد پره ها راندمان مکانیکی نیز افزایش می یابد. به طور کل تعداد پره های ۶ تا ۹ عدد مناسب می باشند که این تعداد راندمانی بین ۰/۵ تا ۰/۶۵ ایجاد می نماید. برای اساس، راندمان مکانیکی هواکش گریز از مرکز با پره های شعاعی که زاویه خروج هوا برابر با ۹۰ درجه است، با نظر به تعداد حداکثری پره ها (۹ عدد)، راندمانی در حدود ۰/۶۵ در نظر گرفته شد (۲۶، ۲۷).

• توان پره هواکش

توانی که پره هواکش در هنگام چرخش نیاز دارد و یا

شعاعی، در طراحی استفاده گردید. چراکه در تهویه صنعتی، این هواکش ها دارای بیشترین پایداری در برابر آلاینده ها و مناسب ترین جهت انتقال گازها، بخارات، مه، میست، آلاینده های جامد و ساینده به ویژه نوع چسبناک و روغنی بوده و در مقایسه با نوع بکواردر در شرایط مشابه می تواند فشار بیشتری ایجاد نماید (۲۶، ۲۷).
هواکش پیشنهادی این مطالعه براساس شش مشخصه زیر تعیین شدند:

۱) میزان هواگذر (Q_{inlet})

۲) فشار استاتیک و فشار کل معادل هواکش

(EFTP / EFSP)

۳) دور موتور (RPM)

۴) قطر دهانه ی مکش

۵) کارایی مکانیکی هواکش (ME)

۶) قدرت هواکش (توان پره و الکتروموتور هواکش)
در ادامه به روابط کاربردی در محاسبات هواکش پرداخته می شود.

• فشار استاتیک معادل هواکش

جهت تأمین فشار استاتیک مناسب در شرایط کاری به منظور جمع آوری آلاینده ها، فشار استاتیک معادل از رابطه زیر محاسبه گردید و در تعیین هواکش در نظر گرفته شد (۲۶، ۲۷)؛

$$EFSP = \frac{FSP}{KP_{in}} \quad \text{فرمول ۱}$$

$$KP_{in} = \frac{KP}{\frac{p_a + \Delta p}{p_a + \Delta p + \frac{SPi}{13.6}}} \quad \text{فرمول ۲}$$

FSP فشار استاتیک هواکش
KP ضریب تصحیح فشار
 P_a فشار هوا در سطح دریا
اختلاف فشار سطح دریا با ارتفاع مورد محاسبه
 Δp
in wg
in Hg
in Hg

عددی ذرات موجود در جریان هوا قبل و بعد از عبور از سامانه اندازه گیری شد. این اندازه گیری ها در قطرهای آئرو دینامیکی ۰/۳، ۰/۵، ۱، ۲/۵، ۵ و ۱۰ میکرون صورت گرفت. جهت انجام این آزمایش ها، سامانه تهویه با دبی محاسبه شده (۹۳۰ CFM) در شرایط استاندارد راه اندازی شد و جریان هوای آلوده به سامانه وارد گردید (۱۲). کارایی سامانه طراحی شده برای حذف ذرات با قطر آئرو دینامیکی متفاوت در دو حالتی که فیلتر کارتریجی E11 و فیلتر هیبریدی، جداگانه بر روی سامانه تصفیه هوا نصب شده بودند با توجه به استاندارد NRC-54013 سنجش گردید (۳۲). این پروتکل توسط شورای ملی تحقیقات کانادا (NRC) برای ارزیابی عملکرد اولیه پاک کننده های هوای قابل حمل با هر فناوری توسعه یافته است. در این روش جهت ارزیابی کارایی پاک کننده های قابل حمل از شمارنده ذرات استفاده می شود به گونه ای که در فواصل مختلف غلظت عددی ذرات با قطر آئرو دینامیکی ۰/۳، ۰/۵، ۱، ۲/۵، ۵ و ۱۰ میکرومتر در دو حالت خاموش و روشن دستگاه پرتابل شمارش شده و کارایی سامانه بر اساس داده های قبل و بعد سنجیده می شود. لذا در این مطالعه جهت شمارش ذرات برای قطرهای آئرو دینامیکی ۰/۳، ۰/۵، ۱، ۲/۵، ۵ و ۱۰ میکرومتر توسط دستگاه پارتیکل کانتر PCE-PCO 1 (شرکت PCE انگلیس) در مجاورت خروجی سامانه طراحی شده در دو حالت خاموش و روشن انجام گردید و نهایتاً با توجه به فرمول شماره ۷ کارایی سامانه بر اساس غلظت عددی آلاینده های محیط کار برای هر کدام از قطر های آئرو دینامیکی ذکر شده محاسبه گردید. دستگاه PCE-PCO 1 ابزار یک شمارش ذرات برای تشخیص غلظت ذرات در هوا است. شمارنده ذرات می تواند شش اندازه ذره مختلف را اندازه گیری کند. علاوه بر این، دستگاه دارای سنسورهای دما و رطوبت نسبی است. این آن را به یک دستگاه واقعا همه کاره تبدیل می کند. این ذرات شمارنده برای تعیین دقیق میزان آلودگی هوا طراحی شده است. علاوه بر آن جهت بررسی میزان کارایی در حذف میست های آب و

به عبارت دیگر؛ توان جریان خروجی از هواکش می باشد و مقدار آن به شرح زیر تعیین گردید (۲۶، ۲۷).

$$\text{فرمول ۵} \quad \text{BHP} = \frac{\text{AHP}}{\text{ME}} \Rightarrow \text{BHP} = \frac{Q_{\text{inlet}} \times \text{EFTP}}{6356 \times \text{ME}}$$

BHP	توان پره هواکش	(اسب بخار) HP
AHP	توان جریان هوا	(اسب بخار) HP
EFTP	فشار کل معادل هواکش	in wg
Q_{inlet}	هواگذر در دهانه هواکش	$\frac{\text{ft}^3}{\text{min}}$
ME	ضریب راندمان مکانیکی	

• توان الکتروموتور هواکش

الکتروموتور هواکش علاوه بر تأمین توان چرخش پره باید توان چرخش شفت، پولی و تسمه را نیز تأمین نماید. همچنین باید توان تلف شده ناشی از اصطکاک تسمه با پولی و اصطکاک شفت با رول بیرینگ ها و به علاوه چهار افت فشار داخلی هوا را تأمین نماید. بنابراین توان الکتروموتور هواکش (HP)، با اعمال ضریبی به نام X از رابطه زیر محاسبه گردید (۲۶، ۲۷).

$$\text{فرمول ۶} \quad \text{HP} = \frac{\text{BHP}}{1 - \frac{X}{100}}$$

HP	توان الکتروموتور هواکش (اسب بخار)
X	ضریبی که از منحنی شکل (IP) 7-15 کتابچه راهنمای تهویه صنعتی ACGIH تعیین گردید (۳۱).

ارزیابی عملکرد سامانه فیلتراسیون هوا

برای ارزیابی عملکرد سامانه فیلتراسیون، یک فیلتر کلاس E11 به عنوان فیلتر شاهد و یک فیلتر کلاس E11 همراه با یک لایه نانولیفی حاوی چارچوب فلزی-آلی مورد ارزیابی قرار گرفت. برای این کار غلظت

1. National research council canada

استاندارد VS-80-12، ابتدا باید سرعت سطحی سنگ محاسبه شد. سرعت سطحی سنگ (V_s) معیاری از سرعت حرکت سطح خارجی سنگ سمباده در حین عملیات سنگ‌زنی است و از رابطه زیر محاسبه شد: فرمول ۷:

$$V_s = \left(\pi \frac{d}{12} \right) N \left(3.14 \frac{3.937}{12} \right) 3000 = 3090.54 \text{ SFPM}$$

که در آن:

V_s : سرعت سطحی سنگ (surface ft/min)

D : قطر سنگ (inch)

N : سرعت چرخش سنگ (RPM)

• مشخصات طراحی هود مکنده موضعی انتخابی

در این مطالعه، عرض هود برابر با فاصله محور بازو تعیین و مقدار آن ۱۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. همچنین ارتفاع هود (H) با نسبت عرض به ارتفاع حداقل ۰/۲ تنظیم گردید که مقدار نهایی ابعاد هود ۱۰×۲۵ سانتی‌متر تعیین شد. زاویه ورودی هود ۴۵ درجه و ضریب افت گلوگاهی ۰/۲۵ با استناد به استاندارد VS-80-12 تنظیم شده است. این مقادیر تضمین‌کننده عملکرد مناسب هود در جذب آلودگی و انتقال آن به سامانه تهویه است.

• محاسبات روش فشار سرعت

پیش از ورود به مرحله محاسبات تعادل فشارسامانه تهویه، لازم است مقدار هواگذر (Q) مطابق با استاندارد طراحی مربوطه برابر ۹۳۰ CFM بدست آمد. پس از تکمیل طراحی اولیه سامانه تهویه مکنده موضعی، محاسبات نهایی سامانه براساس مقادیر ورودی حاصل از مراحل پیشین انجام شد. این اطلاعات به صورت بخش به بخش در **جدول ۳ تا ۸ پیوست** نشان داده شده است. این محاسبات با هدف توازن فشار استاتیک در کل سیستم، از دورترین نقطه سامانه تا هواکش آغاز گردید (**شکل ۶ پیوست**). محاسبات برای هر قطعه از سامانه به ترتیب از دورترین المان (هود مکنده) به سمت هواکش انجام شده

صابون نیز نمونه برداری از میست‌های آب و صابون به روش نمونه‌برداری استاندارد NIOSH5026 انجام شد. در این روش با استفاده از پمپ نمونه‌برداری با دبی ۲ لیتر بر دقیقه و فیلتر ممبران MCE به مدت ۳۰ دقیقه در پایین دست و بالا دست سامانه انجام شد و آنالیز نمونه توسط دستگاه طیف‌سنج مادون‌قرمز انجام گردید (۳۳، ۳۴). افت فشار سامانه توسط مانومتر تفاضلی PCE HVAC 2-ICA کشور آلمان صورت گرفت.

فرمول شماره ۷: کارایی جمع‌آوری فیلتر

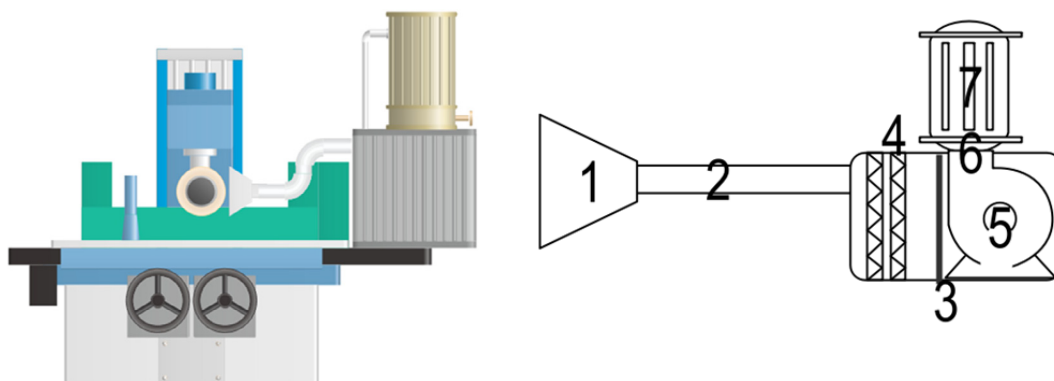
$$E_i = \left[1 - \frac{n_i}{N_i} \right] \times 100$$

که در آن n_i تعداد ذرات تست (آزمون) در رنج سایزی " i " در پایین‌دست مدیا و N_i تعداد ذرات در رنج سایزی " i " در بالا‌دست مدیا است.

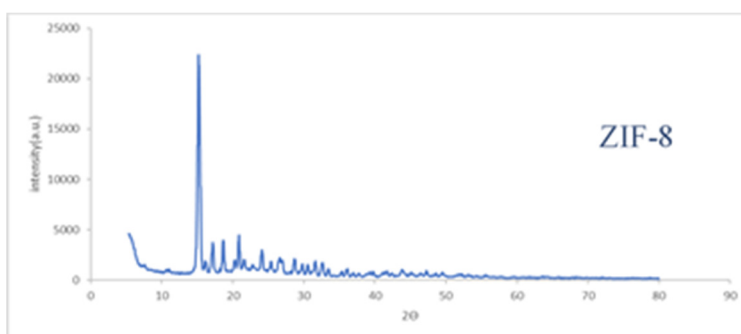
== یافته‌ها

طراحی سامانه تهویه مکنده موضعی مجهز به سامانه فیلتراسیون هوا

سیستم تهویه با در نظر گرفتن شرایط ایستگاه کار، هود مکنده در نزدیک‌ترین فاصله به سنگ سمباده دستگاه CNC طراحی شد. به دلیل قابلیت جابجایی بازویی دستگاه در محور حرکت سنگ، از کانال انعطاف‌پذیر (آکاردئونی) برای انتقال هوای آلوده به فیلترهای جاذب استفاده گردید. شایان ذکر است که با توجه به راندمان پیش‌بینی‌شده بالا در حذف آئروسول‌ها توسط سامانه فیلتراسیون، نیازی به کانال‌کشی برای خروج هوای مکش‌شده از محیط کار وجود ندارد و هوای تصفیه‌شده مجدداً به محیط بازمی‌گردد. به‌طور خلاصه، سامانه تهویه موضعی طراحی‌شده شامل اجزای زیر است: هود مکنده موضعی، کانال انعطاف‌پذیر آکاردئونی، محفظه فیلتراسیون، فیلتر آلومینیومی، هواکش گریز از مرکز با پره‌های شعاعی، تیوپ‌شیت، و ماژول فیلتر کاتریجی. نمای شماتیک این سامانه در شکل ۱ نشان داده شده است. برای محاسبه دبی موردنیاز سامانه تهویه بر اساس



شکل ۱: شماتیک سامانه تهویه مکنده موضعی طراحی شده
(۱-هود مکنده موضعی، ۲-کانال انعطاف پذیر آکاردئونی، ۳-محفظه فیلتراسیون، ۴-فیلتر آلومینیومی، ۵-هواکش گریز از مرکز با پره های شعاعی، ۶-تیوپ شیت و ۷-فیلتر نانولیفی حاوی چارچوب فلزی-آلی کارتریجی)



شکل ۲: XRD از ماف سنتز شده

ورودی (KQ_{inlet})، فشار استاتیک و کل معادل هواکش (EFTP/EFSP) و قطر دهانه ورودی هواکش تعیین گردید.

بر اساس محاسبات انجام شده، جهت عملکرد بهینه سامانه تهویه با فشار استاتیک معادل ۳/۳۷ اینچ آب، هواکشی با مشخصات زیر مورد نیاز است:

شده اند که هواکش بتواند حجم هوای آلوده را به صورت مؤثر از محیط کار مکش و وارد سامانه فیلتراسیون کند.

• مشخصات سامانه فیلتراسیون هوا

در طراحی سامانه فیلتراسیون، پیش فیلتر آلومینیومی به عنوان اولین مرحله تصفیه، در مسیر جریان هوای ورودی و پیش از هواکش نصب شد (شکل ۷ پیوست).

و تمامی جزئیات مربوط به انتخاب ابعاد کانال و توازن فشارها در جداول ۳ تا ۸ پیوست ارائه شده است. تعیین فشارهای استاتیک به گونه ای صورت پذیرفت که سامانه ضمن تأمین جریان هوای مورد نیاز برای جمع آوری مؤثر آلاینده ها، کمترین اتلاف انرژی و کارایی حداکثری را داشته باشد.

• مشخصات طراحی هواکش انتخابی

سومین بخش سامانه تهویه طراحی شده، هواکش است که در داخل محفظه فیلتراسیون و پس از فیلترهای آلومینیومی تعبیه شده است. این هواکش وظیفه تأمین نیروی محرکه جریان هوا درون سامانه را بر عهده دارد. مشخصات فنی آن با توجه به نرخ جریان حجمی هوای

جدول ۱: مشخصه های نهایی فن

نام مشخصه	مقدار	واحد
۱ قطر دهانه ورودی	۱۳	اینچ
۲ دور موتور	۱۱۹۱	rpm
۳ نرخ جریان هوا	۱۲۷۳	acfm
۴ توان الکتروموتور	۱/۵۱	اسب بخار

جدول ۲: پیکهای XRD اصلی ZIF-8 استاندارد

ردیف	زاویه (۲θ درجه)	شدت نسبی (%)
۱	۷/۴	۱۰۰
۲	۱۰/۴	۷۰
۳	۱۲/۷	۳۰
۴	۱۴/۷	۲۰
۵	۱۶/۴	۴۰
۶	۱۸/۰	۶۰

جدول ۲ نشان دهنده پیکهای اصلی ZIF-8 استاندارد می باشد که می توان آن را با نمودار مقایسه کرد.

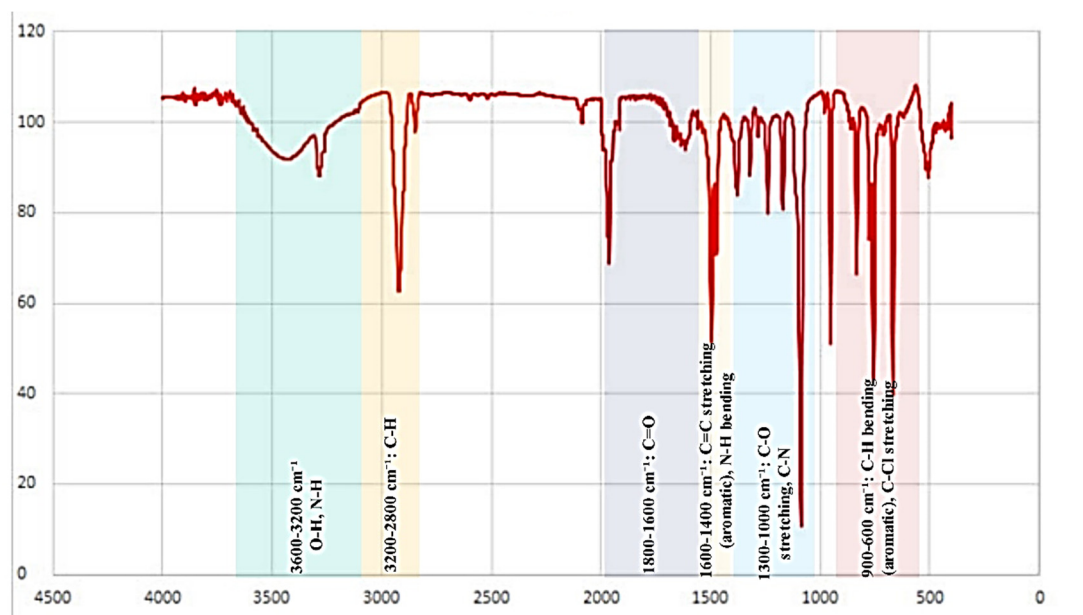
در این نمودار، پیکهای اصلی در $7/4^\circ$ و $12/7^\circ$ و $16/4^\circ$ و 18° به وضوح دیده می شوند که نشان می دهد نمونه دارای ساختار بلوری مناسب ZIF-8 است (۳۵، ۳۶). ساختار بلوری ZIF-8 شامل یونهای Zn^{2+} و لیگندهای ۲-متیل ایمیدازولات است که یک شبکه سه بعدی متخلخل را تشکیل می دهد. این ساختار باعث می شود تا ZIF-8 خواص منحصر به فردی برای جذب ترکیبات آلی فرار و میستهای روغنی داشته باشد. پهنای پیکها (FWHM) در نمودار نشان دهنده اندازه بلورکها و تنشهای درون ساختاری است. پیکهای باریکتر معمولاً نشان دهنده بلورکهای بزرگ تر و تنشهای کمتر در نمونه است.

نمودار طیف سنجی (FTIR) که از یک نمونه ZIF-8 تهیه شده، شامل چندین پیک جذبی مشخص است که مربوط به گروههای شیمیایی مختلف در ساختار این ترکیب می باشد. تحلیل این نمودار به شناسایی این گروهها و تایید ساختار ZIF-8 کمک می کند. در ادامه به تحلیل نقاط مهم نمودار پرداختیم (شکل ۳). پیک در

این فیلتر با ابعاد $60 \times 60 \times 10$ cm و ضخامت ۱۰ cm با توجه به کاتالوگ فنی و ظرفیت عبور جریان هوا، انتخاب گردید و توانست به طور مؤثری تراشه های فلزی و ذرات مایع روانکاری را به دام اندازد. فیلتر کارتریجی E11 همراه فیلتر نانوالیاف حاوی چارچوب فلزی-آلی به صورت لمینت، به عنوان مرحله دوم تصفیه، پس از هواکش نصب شد (شکل ۸ پیوست). بر اساس آزمایشهای صورت گرفته، این فیلتر توانایی تحمل سرعت سطحی حداکثر $0/2$ m/s تحت اختلاف فشار مشخص را دارد. با در نظر گرفتن دبی هوای عبوری 1273 acfm، سه مترمربع سطح فیلتر برای تصفیه جریان حجمی هوای این سامانه کافی است.

مشخصات ساختاری چارچوب فلزی-آلی ZIF-8

نمودار XRD چارچوب فلزی-آلی سنتز شده، پیکهای مشخصه ای را نشان می دهد، در ادامه پیکهای استاندارد ZIF-8 مقایسه و تحلیل قرار گرفت (شکل ۲). نمودار پیکهای برجسته ای در زاویه های زیر $7/4^\circ$ ، $12/7^\circ$ ، $16/4^\circ$ ، 18° نشان می دهد. این پیکها مطابق با الگوهای استاندارد ZIF-8 هستند که نشان دهنده ساختار بلوری و تشکیل موفق این ماده است (۳۵، ۳۶).



شکل ۳: نتایج FTIR از ماف سنتر شده

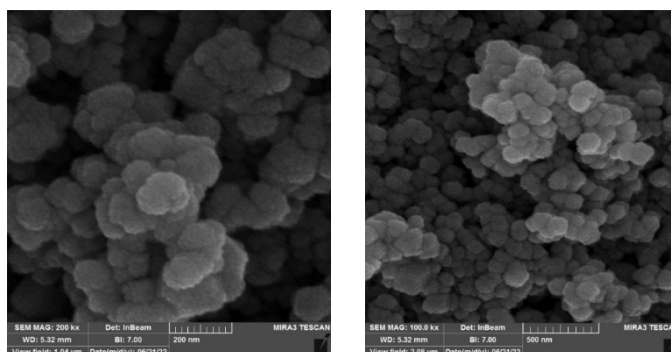
جدول ۳: نتایج حاصل از اندازه‌گیری BET

ردیف	نام ماده	BET surface area (m ² /g)	Average diameter of cavities (37)	The volume of cavities (cm ³ /g)
۱	ZIF-8	۱۵۶۸	۳/۲	۱/۲۳

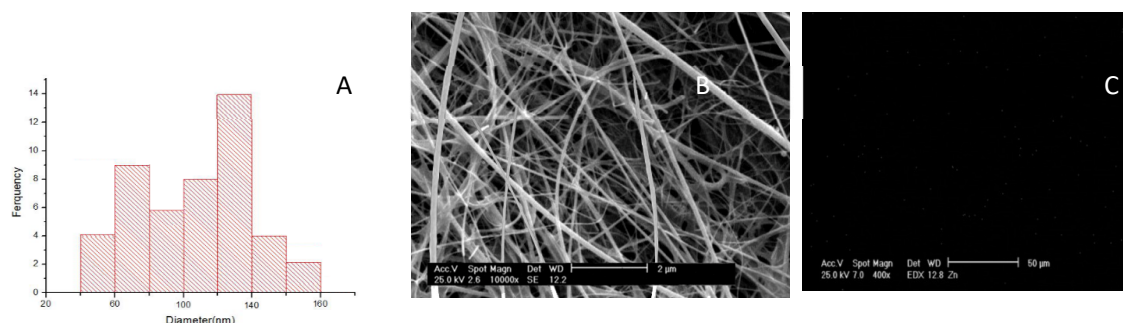
به ارتعاشات خمشی CH و ارتعاشات شبکه‌ای فلزی-آلی مربوط باشند که تاییدی بر ساختار ژئولیتی این ترکیب است (۲۳-۲۵).

نتایج جدول ۳ مربوط به خصوصیات ماده ZIF-8 از جمله سطح ویژه (BET)، قطر متوسط حفرات و حجم حفرات می‌باشد. مقدار سطح ویژه ZIF-8 برابر با ۱۵۶۸ متر مربع بر گرم (m²/g) است. سطح ویژه بالا نشان‌دهنده این است که این ماده دارای مساحت سطحی زیادی برای تعامل با گازها یا مواد دیگر می‌باشد، که این ویژگی برای کاربردهای کاتالیزوری و جذب گازها بسیار مهم است. قطر متوسط حفرات (Average Diameter of Cavities): قطر متوسط حفرات در ZIF-8 برابر با ۳/۲ نانومتر (۳۷) است. این نشان می‌دهد که حفرات ماده به اندازه‌ای کوچک هستند که می‌توانند مولکول‌های مختلف را به

حدود ۳۴۴۸/۵ cm⁻¹ معمولاً مربوط به ارتعاشات کششی گروه‌های OH یا NH است. در ترکیب‌های MOF، این پیک ممکن است به دلیل حضور رطوبت یا مواد باقی‌مانده در ساختار باشد. پیک در حدود ۲۹۲۹/۳۷ cm⁻¹ می‌تواند به ارتعاشات کششی CH در گروه‌های آلی پیوند داده شده به ساختار اشاره داشته باشد. پیک در ۱۶۴۶/۰۳ cm⁻¹ مربوط به ارتعاشات کششی C=O یا C=N در زنجیره‌های آلی متصل به ساختار فلزی است. پیک در ۱۵۸۴/۳۶ cm⁻¹ به ارتعاشات کششی C=C در حلقه‌های آروماتیک یا ارتعاشات C=N مربوط است. پیک در ۱۴۰۶/۱۹ cm⁻¹ به ارتعاشات خمشی CH در گروه‌های متیل یا متیلن اشاره دارد. پیک در ۱۳۱۰-۱۲۰۰ cm⁻¹ شامل ارتعاشات مختلف گروه‌های N-H و C-N در ساختار زنجیره‌های آلی می‌شود. پیک‌های زیر ۱۰۰۰ cm⁻¹



شکل ۴: تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از ماف سنتز شده

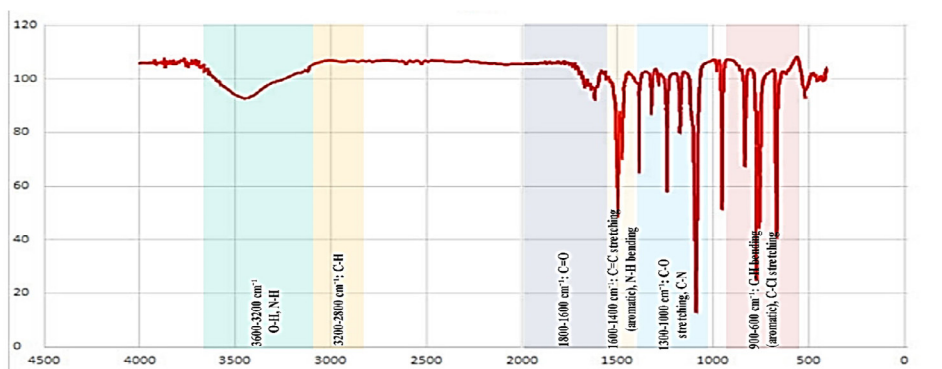


شکل ۵: تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی فیلتر نانوالیاف حاوی ماف شکل C و B عکس SEM و شکل A قطر الیاف فیلتر

چندوجهی هستند. اندازه ذرات با مقایسه با نوار مقیاس ۱۰۰ نانومتری تخمین زده می‌شود. سطح ذرات در این بزرگنمایی نسبتاً صاف به نظر می‌رسد. هیچ گونه تخلخل یا بافت زبر در سطح مشاهده نمی‌شود. ذرات تمایل دارند به صورت تجمعات بزرگ شکل بگیرند. این خوشه‌بندی ممکن است به دلیل روش سنتز یا خصوصیات ذاتی ZIF-8 باشد که تمایل به تشکیل چنین تجمعاتی دارد. تصاویر SEM از نانولیف‌های تولیدی در هر نوبت آزمایش توسط میکروسکوپ الکترونی تهیه شد. قطر الیاف در تصاویری با بزرگنمایی‌های ۶۲۵، ۱۲۵۰، ۵۰۰۰، ۱۰۰۰۰ و ۲۰۰۰۰ تعیین شد. برای هر آزمایش، میانگین قطر الیاف با حدود ۵۰ نانومتر اندازه‌گیری تصادفی از الیاف تعیین شد. در بسیاری از مطالعات پردازش تصویر به عنوان روشی مطمئن برای محاسبه تخلخل معرفی شده است.

دام بیاندازند یا جدا کنند. حجم حفرات در ZIF-8 برابر با ۱/۲۳ سانتی‌متر مکعب بر گرم (cm^3/g) است. حجم بالای حفرات به این معنی است که این ماده می‌تواند مقدار زیادی از گازها یا مایعات را در خود ذخیره کند. این اطلاعات نشان می‌دهند که ZIF-8 ماده‌ای با خصوصیات مناسب برای استفاده در کاربردهای مختلفی مانند ذخیره‌سازی گاز، جداسازی مولکول‌ها و کاتالیزورها است. نتایج حاصل از آزمون میکروسکوپ الکترونی روبشی را نیز در شکل ۴ مشاهده می‌کنید. شکل ۵ مربوط به ماده ZIF-8 است، برای این ماده نیز با توجه به عکس‌های حاصل از میکروسکوپ روبشی ساختار ذرات به صورت چند وجهی به وضوح در عکس مشاهده می‌شود. تصویر نشان می‌دهد که ذرات ZIF-8 به صورت خوشه‌های بزرگ تجمع یافته‌اند. ذرات به صورت تقریبی کروی یا

الف



شکل ۶: FTIR مربوط به فیلتر نانوالیاف

به تدریج افزایش یافته و برای ذرات ۱ میکرون و ۲/۵ میکرون به ترتیب به $95/96 \pm 0/07$ و $96/0 \pm 68/29$ رسید. در نهایت، برای ذرات ۵ میکرون و ۱۰ میکرون، سامانه فیلتراسیون توانست راندمان حداکثری ۱۰۰ درصد را ارائه دهد.

جهت ارزیابی عملکرد سامانه فیلتراسیون ساخته شده توجه به غلظت جرمی ذرات دو حالت در نظر گرفته شد؛ در حالت اول به جای فیلتر کارتریجی از فیلتر E11 و در حالت دوم فیلتر E11 همراه با یک لایه نانولیفی حاوی چارچوب فلزی-آلی در محل قرارگیری فیلتر کارتریجی قرار گرفت. نتایج ارزیابی اختلاف فشار، سرعت دهانه هود، و کارایی سامانه برای هر دو حالت ذکر شده در جدول ۵ ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد در حالت اول یعنی سامانه فیلتراسیون با فیلتر E11 میزان اختلاف فشار قبل و بعد از فیلتر کارتریجی برابر ۱۲۴ پاسکال و کارایی سامانه ۹۲/۸۸٪ بدست آمد. این مقادیر برای حالتی که فیلتر طراحی شده در سامانه قرار گرفت کمی متفاوت تر از حالت قبلی بدست آمد، در این حالت میزان اختلاف فشار قبل و بعد از فیلتر کارتریجی برابر ۱۴۳ پاسکال و کارایی سامانه ۱۰۰٪ بدست آمد.

بحث

هدف این مطالعه طراحی، ساخت و ارزیابی سامانه فیلتراسیون هوا به منظور کنترل آلاینده‌های فرآیندهای

نتیجه آزمایش FTIR که هدف آن بررسی ساختار و گروه های عملکردی ZIF-8 بود، در شکل ۶ نشان داده شده است. این آزمایش در محدوده طول موج 500 cm^{-1} تا 3500 cm^{-1} انجام شد. شکل ۶ نشان داد که نمونه ZIF-8 با موفقیت سنتز شد. در محدوده طول موج 1400 cm^{-1} تا 1730 cm^{-1} ، پیک هایی که نشان دهنده پیوندهای C=O و C-O متقارن و نامتقارن بود مشاهده شد. علاوه بر این، پیک های مربوط به پیوندهای O=C=O و C-O در محدوده 830 cm^{-1} تا 1150 cm^{-1} یافت شد. پهن ترین پیک در نمودار، بین 3150 cm^{-1} و 3650 cm^{-1} مربوط به گروه کربوکسیل و پیوند OH- می باشد (۲۳-۲۵). میزان گراماژ (چگالی وزنی) برای فیلتر نانوالیاف پلی آمید و نانوالیاف پلی آمید با ZIF-8 به ترتیب 232 g/m^2 و 317 g/m^2 تخمین زده شده است.

۳-۳- عملکرد سامانه فیلتراسیون هوا

آزمون عملکردی سامانه فیلتراسیون برای یک فیلتر کلاس E11 بعنوان فیلتر شاهد و فیلتر کلاس E11 همراه با یک لایه نانولیفی حاوی چارچوب فلزی-آلی نشان داد که این فیلتر کارایی متفاوتی در حذف ذرات با قطره های آئرو دینامیکی مختلف دارد (جدول ۴). بر اساس داده های آزمایشی، راندمان حذف ذرات در اندازه $0/3$ میکرون برابر با $92/64 \pm 0/16$ و برای ذرات $0/5$ میکرون $0 \pm 0/4$ و $94/27$ گزارش شد. با افزایش اندازه ذرات، راندمان حذف

جدول ۴: نتایج عملکرد سامانه فیلتراسیون با توجه به غلظت عددی ذرات

نام سامانه	سایز ذرات (μm)	غلظت اولیه (mg/m ³)	غلظت ثانویه (mg/m ³)	کارایی سامانه (%)
سامانه فیلتراسیون فیلتر E11	۰/۳	۱۵۲۸۷۲	۱۵۲۹۳۶	۹۲/۶۴±۰/۱۶
E11 همراه با یک لایه نانولیفی حاوی چارچوب فلزی-آلی		۱۸۳۶۴۷	۱۷۹۶۳۲	۹۹/۸۸±۰/۰۱
سامانه فیلتراسیون فیلتر E11	۰/۵	۱۱۴۰۴۵	۱۱۴۳۲۸	۹۴/۲۷±۰/۰۴
E11 همراه با یک لایه نانولیفی حاوی چارچوب فلزی-آلی		۱۲۳۶۸۲	۱۲۰۳۱۵	۹۹/۸۸±۰/۰۴
سامانه فیلتراسیون فیلتر E11	۱	۷۴۳۲۷	۷۴۲۵۸	۹۵/۹۶±۰/۰۷
E11 همراه با یک لایه نانولیفی حاوی چارچوب فلزی-آلی		۷۸۳۶۹	۷۷۹۴۵	۹۹/۹۰±۰/۰۴
سامانه فیلتراسیون فیلتر E11	۲/۵	۱۳۷۵۷	۱۳۱۴۷	۹۶/۶۸±۰/۲۹
E11 همراه با یک لایه نانولیفی حاوی چارچوب فلزی-آلی		۱۴۲۵۰	۱۴۰۷۸	۹۹/۸۸±۰/۰۱
سامانه فیلتراسیون فیلتر E11	۵	۵۹۷۲	۵۹۳۲	۹۷/۳۹±۰/۴۳
E11 همراه با یک لایه نانولیفی حاوی چارچوب فلزی-آلی		۵۸۰۲	۵۷۳۸	۱۰۰
سامانه فیلتراسیون فیلتر E11	۱۰	۱۰۳۸	۱۱۵۲	۱۰۰
E11 همراه با یک لایه نانولیفی حاوی چارچوب فلزی-آلی		۹۳۴	۸۳۷	۱۰۰

جدول ۵: نتایج عملکرد سامانه فیلتراسیون با توجه به غلظت جرمی ذرات

ردیف	اختلاف فشار (Pa)	سرعت دهانه هود (m/s)	غلظت اولیه (mg/m ³)	غلظت ثانویه (mg/m ³)	کارایی سامانه (%)
سامانه فیلتراسیون مجهز فیلترهای E11	۱۲۴	۱۸/۷۲	۱۲/۵۷	۹/۴۲	۹۲/۸۸±۲/۴۴
E11 همراه با یک لایه نانولیفی حاوی چارچوب فلزی-آلی	۱۴۳	۱۷/۳۲	۹/۲۳	۸/۹۵	۱۰۰±۰/۰۰

عوامل حیاتی در تضمین سلامت و بهره‌وری کارکنان است. مواجهه با آلاینده‌های هوا، به‌ویژه در محیط‌های صنعتی، می‌تواند منجر به عوارضی از جمله بیماری‌های ریوی،

ماشین‌کاری، به‌ویژه آئروسول‌های ناشی از به‌کارگیری مایعات فلزکاری، با هدف کاهش مواجهه شغلی و بهبود کیفیت هوای محیط کار بود. کیفیت هوای محیط کار یکی از

افزایش می یابد. در این مطالعه میدانی با توجه به افزایش کارایی فیلتر نانولیف حاوی چارچوب فلزی-آلی ساخته شده، نسبت به فیلتر هیای E11 میزان کارایی سامانه فیلتراسیون نیز به نسبت افزایش یافته است. در مطالعه‌ای ژانگ و همکاران (۲۰۱۷) به بررسی عملکرد فیلتراسیون میست روغن - ویژگی‌های افت فشار و راندمان فیلتر نیز به این مسئله اشاره دارد. در این مقاله به بررسی عملکرد فیلترهای لیفی در حذف ذرات میست روغنی از هوا می‌پردازد. نتایج نشان داد که این فیلترها در حذف ذرات بزرگ‌تر از روغن کارایی مناسبی دارند، اما در برخورد با ذرات کوچک‌تر کارایی کمتری دارند. علاوه بر این، اشباع شدن فیلتر باعث افزایش افت فشار و کاهش راندمان فیلتر به ویژه برای ذرات ۳۰ تا ۵۰۰ نانومتری می‌شود (۴۱). در مطالعه وی و همکاران در سال ۲۰۲۴ نشان داد که فیلترهای E11 کارایی خوبی در حذف میست‌های آب و صابون داشته اند، ولی با کاهش قطر آئرویدینامیکی میست‌های روغن کارایی فیلتر نیز کاهش پیدا می‌کند (۴۲). مطالعه آدیل و همکاران (۲۰۲۲) نشان می‌دهد که استفاده از ترکیب فیلترهای آلومینیومی و فیلتر E11 به همراه فیلتر نانو لیفی حاوی چارچوب فلزی-آلی نه تنها موجب راندمان بالای حذف (تا ۱۰۰٪ برای ذرات درشت و ۹۹/۸۸ برای ذرات زیر ۲/۵ میکرون) شده است، بلکه با کاهش هزینه‌های نگهداری و انرژی، مزایای بیشتری را در کنترل آلاینده‌های مایعات فلزکاری فراهم می‌کند. این خود بیانگر توانایی بالای سامانه در کنترل آلاینده‌های مرتبط با فرآیند ماشین‌کاری و بهبود کیفیت هوای محیط کار است. مطالعه‌ای در سال ۲۰۲۳ به بررسی استفاده از چارچوب‌های فلزی-آلی مانند ZIF-8 که در نانو الیاف الکتروریسی شده قرار گرفته‌اند، برای حذف ذرات معلق و بیوآئروسول‌ها پرداخته است (۴۳). علاوه بر این در این مطالعه الیاف نانویی حاوی ماف به دلیل سطح ویژه بالا و تخلخل قابل تنظیم، به شدت کارایی فیلترهای هوا را افزایش می‌دهد. نانوالیاف دارای سطح وسیعی برای جذب ذرات هستند. ماف‌ها به دلیل ساختار متخلخل خود، ظرفیت جذب بالایی دارند. آنها توانستند ذرات زیرمیکرونی (مانند ذرات ریزتر از یک میکرون) و بیوآئروسول‌ها (مانند

اختلالات قلبی-عروقی و کاهش توانایی جسمانی و ذهنی شود. بر این اساس، کنترل آلاینده‌های هوا در محیط‌های صنعتی یک ضرورت به شمار می‌رود. مایعات فلزکاری، به عنوان یکی از عوامل اصلی در فرآیندهای ماشین‌کاری، می‌توانند تحت شرایط عملیاتی، آئروسول‌هایی تولید کنند که حاوی ترکیبات شیمیایی مضر هستند. این آئروسول‌ها، بسته به اندازه ذرات و ترکیبات شیمیایی موجود، ممکن است خطراتی نظیر تحریک دستگاه تنفسی، آلرژی و حتی سرطان را برای شاغلان به همراه داشته باشند (۳۳، ۳۸، ۳۹). روش‌های مختلفی برای کنترل و حذف آلاینده‌های هوا در محیط‌های صنعتی وجود دارد. از جمله این روش‌ها می‌توان به تهویه عمومی، تهویه موضعی، استفاده از فیلترهای صنعتی مانند هپا و الیاف فلزی و سامانه‌های مبتنی بر فناوری‌های نوین مانند فیلترهای الکترواستاتیک اشاره کرد. در میان این گزینه‌ها، تهویه موضعی به دلیل قابلیت کنترل آلاینده‌ها در منبع تولید، به عنوان یکی از راهکارهای مؤثر مورد توجه قرار گرفته است (۴۰). در این مطالعه، از ترکیب دو فیلتر آلومینیومی و فیلتر E11 به همراه فیلتر نانو لیفی حاوی چارچوب فلزی-آلی استفاده شد تا مزایای هر دو در یک سامانه یکپارچه بهره‌برداری شود. فیلتر آلومینیومی، با راندمان مناسب در حذف ذرات روغنی و مقاومت کم در برابر جریان هوا، به کاهش هزینه‌های انرژی و افزایش طول عمر سامانه کمک می‌کند. در مقابل، فیلتر فیلتر نانو لیف حاوی چارچوب فلزی-آلی با توانایی حذف ذرات ریزتر از ۰/۳ میکرون با راندمان بالا، برای کنترل آئروسول‌های حاصل از مایعات فلزکاری عملکرد فوق‌العاده‌ای ارائه می‌دهد. طراحی سامانه به گونه‌ای انجام شد که ابتدا فیلتر آلومینیومی به عنوان پیش‌فیلتر عمل کند و ذرات بزرگ‌تر از جمله تکه‌های سنگ و تراشه‌های فلزی، را حذف نماید و سپس فیلتر هپا برای حذف ذرات ریزتر به کار گرفته شود، که این رویکرد موجب بهینه‌سازی راندمان و کاهش هزینه‌های نگهداری می‌شود. عملکرد جزء فیلتراسیون سامانه زمانی که فیلتر هیای E11 و نانولیف حاوی چارچوب فلزی-آلی ساخته شده در مطالعه در آن نصب شد، نشان داد که کارایی سامانه به صورت چشمگیری

انعطاف‌پذیر با قابلیت استفاده مجدد عالی برای شستشو به‌منظور فیلتراسیون ذرات استفاده شد و نتایج نشان داد که همه فیلترهای هیبریدی تولیدی دارای کارایی حذف بالای ۹۰ درصد هستند. (۴۵). موو و همکاران در سال ۲۰۱۹ با طراحی یک فیلترهای حاوی ماف دوجزئی، میزان کارایی آنتی باکتریال و کارایی فیلتراسیون آن را در حذف ذرات PM2.5 را موردبررسی قرار دادند. ترکیب Ag-MOFs @CNF@ZIF-8 بر روی فیلتر سلولزی سنتز و نشانده شد. نتایج مطالعه نشان داد که این فیلتر کامپوزیت دارای پتانسیل کاربرد فوق‌العاده‌ای در حذف PM2.5، جذب گازهای سمی و در زمینه مراقبت‌های بهداشتی است (۴۶).

نتیجه گیری

سامانه طراحی‌شده در این مطالعه، به‌منظور کنترل آلاینده‌های ناشی از عملیات ماشین‌کاری، عملکردی اثربخش در حذف ذرات آلاینده در منبع تولید نشان داد. نتایج نشان می‌دهد که راندمان حذف ذرات با اندازه‌های بزرگ‌تر از ۵ میکرون به ۱۰۰٪ رسیده و برای ذرات کوچک‌تر از ۲/۵ میکرون، میانگین ۹۹/۸۸٪ بوده است. این دستاورد حاکی از کارایی بالای سامانه در کاهش آلاینده‌ها و بهبود شرایط محیط کار است. سامانه معرفی‌شده می‌تواند به‌عنوان یک راهکار علمی و عملی برای کنترل آلاینده‌های ذره‌ای فرآیندهای ماشین‌کاری مورد استفاده قرار گیرد و الگویی برای ارتقای ایمنی و سلامت محیط کار ارائه دهد. بررسی اقتصادی‌تر کردن سیستم، از طریق کاهش هزینه تولید و بهره‌برداری، و همچنین ارائه مدل‌های بازگشت سرمایه برای مشتریان صنعتی، می‌تواند پیشنهادی در راستای تجاری کردن این سیستم باشد.

تشکر و قدردانی

مقاله حاضر بخشی از نتایج پایان‌نامه مقطع PhD تحت عنوان «طراحی و ساخت سامانه فیلتراسیون انعقادی هوا با استفاده از فیلتر لیفی مبتنی بر چارچوب فلزی-آلی

باکتری‌ها و ویروس‌ها) را به‌طور مؤثری به دام بیندازند. این قابلیت برای استفاده در سیستم‌های فیلتراسیون هوا بسیار مهم است، به‌خصوص در مواردی که نیاز به جذب ذرات زیستی و جلوگیری از انتشار عوامل بیماری‌زا باشد. بهبود در جذب و فیلتراسیون: ساختار تخلخلی ماف‌ها اجازه می‌دهد که ذرات به درون این منافذ نفوذ کنند و درون آن‌ها به دام بیفتند. این خاصیت باعث افزایش قابل توجه ظرفیت جذب ذرات می‌شود. همچنین ماف به دلیل پایداری حرارتی و شیمیایی، برای استفاده در محیط‌های مختلف مناسب هستند. این نوع فیلترها پتانسیل بالایی برای استفاده در حوزه‌هایی مثل تهویه مطبوع (HVAC)، ماسک‌های فیلتراسیون، و محیط‌های بیمارستانی که نیاز به حذف بیوآئروسول‌ها و ذرات معلق زیان‌آور دارند، نشان داده‌اند. این مطالعه نشان می‌دهد که استفاده از نانوالیاف مبتنی بر MOF، خصوصاً ZIF-8، در فناوری‌های فیلتراسیون می‌تواند به‌عنوان یک راهکار امیدوارکننده برای مقابله با آلودگی‌های زیستی و ذرات معلق بسیار کوچک در هوا مطرح شود این تحقیق، گام‌های جدیدی در بهبود فناوری فیلتراسیون هوا از طریق استفاده از مواد نوین همچون MOFs به شمار می‌آید (۴۳). زی و همکاران در سال ۲۰۱۹ فیلتر هیبریدی PI@PDA@MOF متشکل از الیاف پلی آمید (PI) فعال شده با پلی دوپامین (PDA) حاوی کریستال ماف -MIL-101(80)-NH2 را سنتز و میزان کارایی آن را برای حذف ذرات در دمای بالا ارزیابی نمودند. مساحت سطحی فیلتر هیبریدی ۸۰۰ m²/g تعیین شد. نتایج عملکرد فیلتراسیون نشان داد که میانگین راندمان حذف کامپوزیت‌ها با افت فشار کمتر از ۵۷ Pa حدود ۹۳٪ و فاکتور کیفیت آن‌ها ۱ Pa-0.۴۶۴ برای PM0.3 در دمای ۲۶۰ درجه سانتی گراد به دست آمد. میزان کارایی فیلتر هیبریدی نسبت به فیلتر ساده ۳۰ درصد افزایش، افت فشار آن ۲۰ درصد کاهش و فاکتور کیفیت آن ۲۰۰ درصد افزایش یافته بود (۴۴). در مطالعه دیگری که توسط ژانگ و همکارانش (۲۰۱۹) انجام گرفت از الیاف آرامید، پلی استر و کتان حاوی ماف‌های UiO-66 و ZIF-8، MIL-53(Al) برای ایجاد یک فیلتر

است.

نقش نویسندگان

سرکار خانم دکتر سمیه فرهنگ دهقان، سرکار خانم دکتر فریده گلبابایی و مهرداد حلمی کهنه شهری، نویسندگان اصلی مقاله هستند که مسئولیت اصلی تهیه و نگارش مقاله را برعهده داشته اند. سمیه فرهنگ دهقان مسئولیت کلی پروژه و هماهنگی بین اعضای تیم را برعهده داشته است. مهرداد حلمی کهنه شهری نقش‌هایی مثل تحقیق، تجزیه و تحلیل داده‌ها، تدوین استنباطات و مرور نهایی مقاله را برعهده داشته است. خانم دکتر رضوان زنده دل و جناب آقای دکتر علیرضا عباسی در طول فرآیند انجام طرح و تهیه مقاله مشاوره‌های لازم را ارائه کرده‌اند و به تدوین محتوا و روند کلی مقاله کمک نموده‌اند. همه نویسندگان تأکید می‌کنند که همه اعضای تیم با اخلاق و قوانین صنعت علمی پایبند بوده و به صداقت و شفافیت در ارائه نتایج و استنباطات پژوهشی متعهد هستند.

اظهارنامه استفاده از ابزار هوش مصنوعی

نویسندگان بدین وسیله اعلام می‌کنند از ابزار هوش مصنوعی Gemini برای ویرایش و ترجمه متون و کمک به تحقیق استفاده نموده‌اند و کلیه مطالب تولید شده و یا ویرایش شده توسط این ابزار تحت نظر و مسئولیت مستقیم نویسندگان بوده و صحت و اعتبار اطلاعات ارائه شده در آن‌ها قابل تأیید است.

REFERENCES

1. Marrian J. Marketing characteristics of industrial goods and buyers. In: The Marketing of Industrial Products. Routledge; 2024. p. 10-23.
2. Yurtkuran H, Günay M, Rai R. A state of the art on sustainable metal working fluids in machining applications. J Mol Eng Mater. 2024;12(3).
3. Fernando W, Karunathilake H, Gamage J. Strategies to reduce energy and metalworking fluid consumption for the sustainability of turning operation: A review. Clean

جهت حذف آئروسول‌های ناشی از مایعات فلزکاری» در رشته مهندسی بهداشت حرفه‌ای و ایمنی کار دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی اخذ نموده است. بدینوسیله نویسندگان از معاونت تحقیقات و فناوری دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی به دلیل حمایت مالی از این مطالعه تقدیر و تشکر می‌نمایند. از مدیران و کارکنان شرکت صنایع هواپیمایی ایران که جهت اجرای این پژوهش همکاری لازم را با ما داشته‌اند، کمال تشکر و قدردانی را داریم.

ملاحظات اخلاقی

تأییدیه اخلاقی این مطالعه از کمیته اخلاق دانشکده بهداشت و مرکز تحقیقات علوم اعصاب دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی با کد IR.SBMU.PHNS. REC.1400.151 اخذ شده است.

تضاد منافع

نویسندگان این مقاله، اعلان می‌دارند که در طول فرآیند تهیه و نگارش این مقاله، هیچ تضاد منافع مالی، شخصی یا سازمانی وجود نداشته است که ممکن است تاثیری بر نتایج و استنباطات ارائه شده در این مقاله داشته باشد.

منابع مالی

این مطالعه با حمایت مالی دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی و سازمان صنایع هوایی ایران انجام شده

Eng Technol. 2021;3:100.

4. Haider J, Hashmi M. 8.02—Health and environmental impacts in metal machining processes. Compr Mater Process. 2014;8:7-33.
5. Latinović L, Marjanović M. A systematic review of human health risks associated with metalworking fluids exposure. Syst J Environ Manag. 2021;6(2):1-10.
6. Asgari M, Azari M, Zandehdel R, Khodakarim S, Rafieepour A, Tavakol E, et al. Development of a new method for analysis of oil mists. Health Scope.

- 2017;6(3):e15114.
7. Asgari M, Azari M, Zandehdel R, Khodakarim S, Rafieepour A, Tavakol E, et al. Development of a new method for analysis of oil mists. *Health Scope*. 2017;6(3).
 8. Hochegger A, Moret S, Geurts L, Gude T, Leitner E, Mertens B, et al. Mineral oil risk assessment: Knowledge gaps and roadmap. Outcome of a multi-stakeholders workshop. *Trends Food Sci Technol*. 2021;113:151-66.
 9. Lee Y-S, Gu H, Lee Y-H, Yang M, Kim H, Kwon O, et al. Occupational risk factors for skin cancer: A comprehensive review. *J Korean Med Sci*. 2024;39(42).
 10. Abatan A, Jacks BS, Ugwuanyi ED, Nwokediegwu ZQS, Obaigbena A, Daraojimba AI, et al. The role of environmental health and safety practices in the automotive manufacturing industry. [Journal not provided]. 2024;5(2):531-42.
 11. Lima FdA, Medeiros GB, Chagas PAM, Aguiar ML, Guerra VG. Aerosol nanoparticle control by electrostatic precipitation and filtration processes—A review. [Journal not provided]. 2023;2(2):259-98.
 12. International Organization for Standardization (ISO). *ISO 29463: High-efficiency filters and filter media for removing particles in air.* Geneva: ISO; 2017.
 13. Wang J, Cahyadi A, Wu B, Pee W, Fane AG, Chew JW. The roles of particles in enhancing membrane filtration: A review. *J Membr Sci*. 2020;595:117570.
 14. Zhou Y, Liu Y, Zhang M, Feng Z, Yu D-G, Wang K. Electrospun nanofiber membranes for air filtration: A review. *Nanomaterials*. 2022;12(7):1077.
 15. de Almeida DS, Martins LD, Aguiar ML. Air pollution control for indoor environments using nanofiber filters: A brief review and post-pandemic perspectives. *Clean Eng Environ*. 2022;11:100330.
 16. Niu Z, Xiao C, Mo J, Zhang L, Chen C. Investigating the influence of metal-organic framework loading on the filtration performance of electrospun nanofiber air filters. *ACS Appl Mater Interfaces*. 2022;14(23):27096-106.
 17. Peterson GW, Lee DT, Barton HF, Epps TH, Parsons GN. Fibre-based composites from the integration of metal-organic frameworks and polymers. *Nat Rev Mater*. 2021;6:1-17.
 18. Mirzaei F, Abbasi A, Dehghan SF, Pourmand MR, Mortazavi S-S, Masoorian E, et al. Removal of bioaerosols using metal-organic frameworks incorporated into electrospun nanofibers. *Fibers Polym*. 2021;22(9):2424-32.
 19. Mohammad-Gholikhan-Khalaj P, Hasanzadeh M, Panahi D, Yazdankhah Z, Dehghan SF. Feasibility study of toluene removal from the airstream by activated carbon/zeolite imidazolate framework composite material. [Journal not provided]. 2023.
 20. Li B, Wen H-M, Zhou W, Chen B. Porous metal-organic frameworks for gas storage and separation: what, how, and why? *J Phys Chem Lett*. 2014;5(20):3468-79.
 21. Mohammad-Gholikhan-Khalaj P, Hasanzadeh M, Panahi D, Yazdankhah Z, Dehghan SF. Feasibility study on the removal of toluene from the air stream by activated carbon/zeolite imidazolate framework composite material. *J Environ Chem Eng*. 2023;11(1):110885. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.110885>.
 22. Dou Y, Zhang W, Kaiser A. Electrospinning of metal-organic frameworks for energy and environmental applications. *Adv Sci*. 2020;7(3):1902590.
 23. Kang E, Kim M, Oh JS, Park DW, Shim SE. Electrospun BMIMPF6/nylon 6,6 nanofiber chemiresistors as organic vapour sensors. *Mater Res*. 2012;20:372-8.
 24. Abd Halim NS, Wirzal MDH, Bilad MR, Md Nordin NAH, Adi Putra Z, Mohd Yusoff AR, et al. Electrospun nylon 6,6/ZIF-8 nanofiber membrane for produced water filtration. *Water*. 2019;11(10):2111.
 25. Wang J, Kim SC, Pui DY. Investigation of the figure of merit for filters with a single nanofiber layer on a substrate. *J Aerosol Sci*. 2008;39(4):323-34.
 26. American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH). *Industrial Ventilation: A Manual of Recommended Practice for Design*. 30th ed. Cincinnati: ACGIH; 2019.
 27. Mateen A, Ebrahimi H, Pirani D, Khalilinejad A. *Industrial Ventilation Design*. 2nd ed. Tehran: Academic Jihad of Shahid Beheshti Medical Sciences; 2020.
 28. Handscomb JR, Eng P. Use of ASHRAE Standards, ACGIH Industrial Ventilation Guidelines and Client Standards for Industrial Buildings. *ASHRAE Trans*. 2022;128(1):1-10.
 29. Shen C, Bian L, Zhang P, An B, Cui Z, Wang H, et al. Microstructure evolution of bonded water layer and morphology of grafting membrane with different polyethylene glycol length and their influence on permeability and anti-fouling capacity. *J Membr Sci*.

- 2020;601:117949.
30. Yang C, Zhang C, Chen ZJ, Li Y, Yan WY, Yu HB, et al. Three-dimensional hierarchical porous structures of metallic glass/copper composite catalysts by 3D printing for efficient wastewater treatments. *ACS Appl Mater Interfaces*. 2021;13(6):7227-37.
31. National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH). NIOSH Manual of Analytical Methods. 4th ed. Cincinnati: US Department of Health and Human Services; 1994.
32. Sultan ZM, Nilsson G, Magee RJ, Brousseau JS. Method for testing portable air cleaners. Ottawa: National Research Council of Canada; 2011.
33. Cooper SJ, Leith D. Evaporation of metalworking fluid mist in laboratory and industrial mist collectors. *Am Ind Hyg Assoc J*. 1998;59(1):45-51.
34. Çakir O, Yardimeden A, Ozben T, Kilickap E. Selection of cutting fluids in machining processes. *J Achiev Mater Manuf Eng*. 2007;25(2):99-102.
35. Kaur H, Mohanta GC, Gupta V, Kukkar D, Tyagi S. Synthesis and characterization of ZIF-8 nanoparticles for controlled release of 6-mercaptopurine drug. *J Drug Deliv Sci Technol*. 2017;41:106-12.
36. Jameh AA, Mohammadi T, Bakhtiari O, Mahdysfarfar M. Synthesis and modification of Zeolitic Imidazolate Framework (ZIF-8) nanoparticles as highly efficient adsorbent for H₂S and CO₂ removal from natural gas. *J Environ Chem Eng*. 2019;7(3):103058.
37. American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH). Threshold Limit Values for Chemical Substances and Physical Agents and Biological Exposure Indices. Cincinnati: ACGIH; 2021.
38. Dixit US, Sarma D, Davim JP. *Environmentally Friendly Machining*. Berlin: Springer; 2012.
39. Wright D. *Safe Handling and Disposal of Metalworking Fluids*. London: UK Lubricants Association; 2020.
40. Mead-Hunter R, King AJ, Mullins BJ. Aerosol-mist coalescing filters - A review. *Sep Purif Technol*. 2014;133:484-506.
41. Zhang J, Pan W, Long Z, Wang C, Feng Z. Study of the oil mist filtration performance: Pressure drop characteristics and filter efficiency model. *Aerosol Air Qual Res*. 2017;17(4):1063-72.
42. Wei F, Liang Y, Wang H, Hu M, Wang L, Wang D, et al. Construction and Investigation of a Filtration Efficiency Test System for High-Efficiency Filter Materials Based on Mass Concentration. *Processes*. 2024;12(5):981.
43. Adil HI, Thalji MR, Yasin SA, Saeed IA, Assiri MA, Chong KF, et al. Metal-organic frameworks (MOFs) based nanofiber architectures for the removal of heavy metal ions. *RSC Adv*. 2022;12(3):1433-50.
44. Xie F, Zhang N, Zhuo L, Qin P, Chen S, Wang Y, et al. "MOF-cloth" formed via supramolecular assembly of NH₂-MIL-101 (Cr) crystals on dopamine modified polyimide fiber for high temperature fume paper-based filter. *Compos Part B Eng*. 2019;168:406-12.
45. Zhang K, Huo Q, Zhou YY, Wang HH, Li GP, Wang YW, et al. Textiles/metal-organic frameworks composites as flexible air filters for efficient particulate matter removal. *ACS Appl Mater Interfaces*. 2019;11(19):17368-74.
46. Ma S, Zhang M, Nie J, Tan J, Yang B, Song S. Design of double-component metal-organic framework air filters with PM_{2.5} capture, gas adsorption and antibacterial capacities. *Carbohydr Polym*. 2019;203:415-22.