

ORIGINAL RESEARCH PAPER

## Feasibility of Improvement of the Filter Performance of Particle Filtering Respirators by Using Composite Media of Polyacrylonitrile Nanofiber (PAN) and Montmorillonite Clay Nanoparticles (MMT)

Siavash Azad<sup>1</sup>, Yousef Rashidi<sup>1\*</sup>, Farideh Golbabaei<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Department of Environmental Technologies, Environmental Sciences Research Institute, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

<sup>2</sup> Department of Occupational Health Engineering, School of Public Health, Tehran University of Medical Sciences, Tehran, Iran

Received: 2022-05-14

Accepted: 2023-04-05

### ABSTRACT

**Introduction:** The important parameters for evaluating the performance of particle filtering respirators in international standards are the filtration efficiency and respiratory resistance of the mask filter against airflow passage. To improve nanofiber filtration efficiency while creating the least breathing difficulty for the wearer, various research has been or is being conducted worldwide. This study investigated the effect of using polyacrylonitrile (PAN) nanofiber composite membrane and montmorillonite clay nanoparticles (MMT) in enhancing particle-filtering respirators' filter performance, achieving higher filtration efficiency while maintaining optimal respiratory resistance conditions.

**Material and Methods:** First, PAN polymer solution containing zero, 1%, 2%, 3%, and 5% MMT nanoparticles was prepared, and then PAN/MMT nanofiber composite membrane was synthesized in an electrospinning machine. Filtration efficiency was measured in diameter range of 0.3, 0.5, 1, and 3 microns using sodium chloride aerosol. Additionally, filter breathing resistance was measured at flow rates of 30, 85, and 95 liters per minute.

**Results:** The efficiency of synthesized composite nanofilters for particle purification can be improved by adding MMT nanoparticles to PAN nanofibers. Optimal MMT concentration was found to be 2%. This addition resulted in an increase in filtration efficiency for particles with sizes of 0.3, 0.5, 1, and 3 microns by 4.2%, 4.88%, 3.77%, and 2.75% respectively without causing significant difference in respiratory resistance. Improved filtration efficiency can be attributed to enhanced morphology of composite nanofilters resulting from addition of MMT nanoparticles. Adding 2% MMT nanoparticles to PAN nanofibers resulted in uniform distribution and smaller fiber dimensions which did not significantly affect Packing density and porosity.

**Conclusion:** If 2% of MMT nanoparticles are added to PAN nanofibers and used to produce particle respirators, resulting respirator will exhibit a 4.2% increase in particle filtration efficiency without increasing breathing difficulty for user. This result can help protect users from particulate pollutants in air pollution conditions.

**Keywords:** Nanofibers, Particle filtering respirator, Filtration efficiency, Respiratory resistance, Montmorillonite (MMT)

### HOW TO CITE THIS ARTICLE

Azad S, Rashidi Y, Golbabaei F. Feasibility of Improvement of the Filter Performance of Particle Filtering Respirators by Using Composite Media of Polyacrylonitrile Nanofiber (PAN) and Montmorillonite Clay Nanoparticles (MMT). *Journal of Health and Safety at Work*. 2023; 13(2): 218-235.

## 1. INTRODUCTION

A respirator is personal protective equipment (PPE) designed to protect individuals from

inhaling hazardous substances in the air, including in environmental, industry, and medical centers. Particle filtering masks use fibrous materials (filters) to remove particulate contaminants. Nowadays, various nanofibers are used in the production of

\* Corresponding Author Email: [y\\_rashidi@sbu.ac.ir](mailto:y_rashidi@sbu.ac.ir)

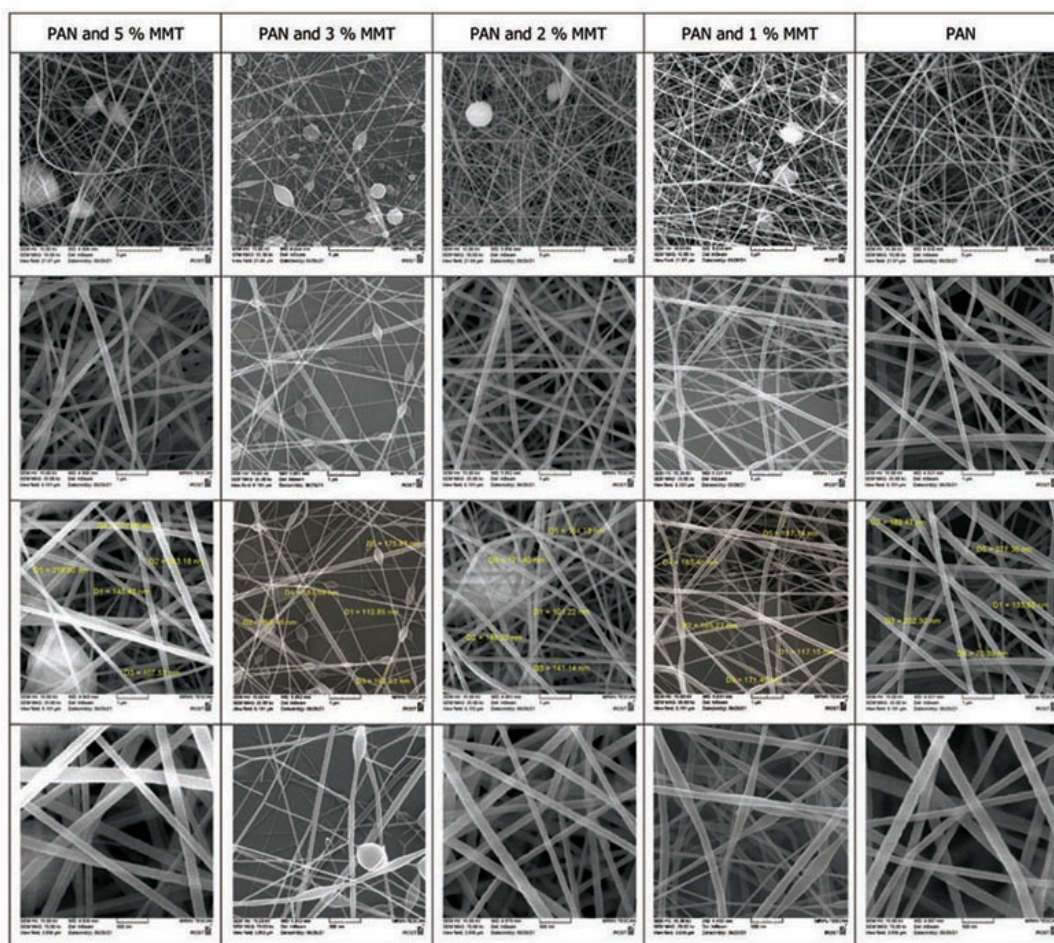


Fig. 1: FESEM images of synthesized composite media

particle respirators. Particle filtration efficiency is directly related to the respiratory resistance of respirator media, and therefore increasing filtration efficiency is allowed to the extent that respirator media's respiratory resistance does not exceed standard allowable limits.

A lot of research is being done to improve these nanofibers' filtration efficiency, which, while maintaining optimal respiratory resistance conditions, creates minimum breathing difficulty for respirator wearer. This study investigates the effect of a composite media of polyacrylonitrile nanofibers (PAN) and montmorillonite clay nanoparticles (MMT) on improving filtration efficiency of respirators for filtering particles.

## 2. MATERIAL AND METHODS

PAN nanofiber composite media with 0%, 1%, 2%, 3%, and 5% MMT nanoparticles were synthesized using an electrospinning machine.

The filter's filtration efficiency and respiratory resistance were measured using the FT200PS filter tester.

## 3. RESULTS AND DISCUSSION

The morphological characteristics of synthesized composite media are under images obtained by field emission scanning electron microscope (FESEM) as described in Fig. 1 and results of measuring diameter of nanofibers in Table No. 1. Comparison of results of measuring average filtration efficiency of particles by synthesized composite media with relevant standards is seen in Fig. 2. Also, comparison of results of measuring average respiratory resistance with relevant standards is seen in Fig. 3.

According to results, adding MMT nanoparticles to PAN nanofiber media increased particle filtration efficiency in all studied sizes. The main reason for increase in filtration efficiency of PAN nanocomposites containing 1 and 2% MMT without

Table 1: The results of measuring the diameter of synthesized nanofibers by Field Emission Scanning Electron Microscope (FESEM)

Fibre Diameter (nm)					
Composite of PAN and 5% MMT	Composite of PAN and 3% MMT	Composite of PAN and 2% MMT	Composite of PAN and 1% MMT	PAN	Fiber under study
143.42	112.85	101.22	117.15	133.5	D1
243.18	159.46	148.25	165.27	189.43	D2
107.53	169.63	141.14	177.46	202.5	D3
127.96	183.59	171.4	185.46	70.39	D4
218.6	175.87	104.13	197.74	271.36	D5
168.138	160.28	133.228	168.616	173.436	Average

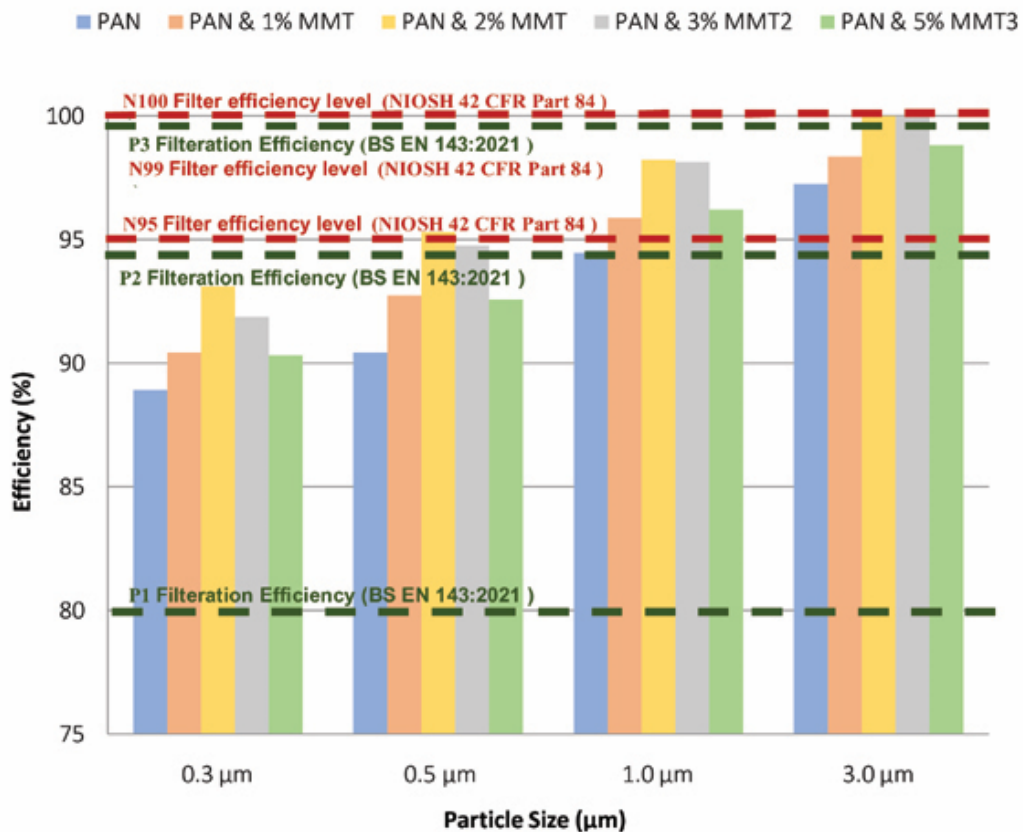


Fig. 2: Comparing the results of measuring the average filtration efficiency of particles by synthesized composite media with the relevant standards

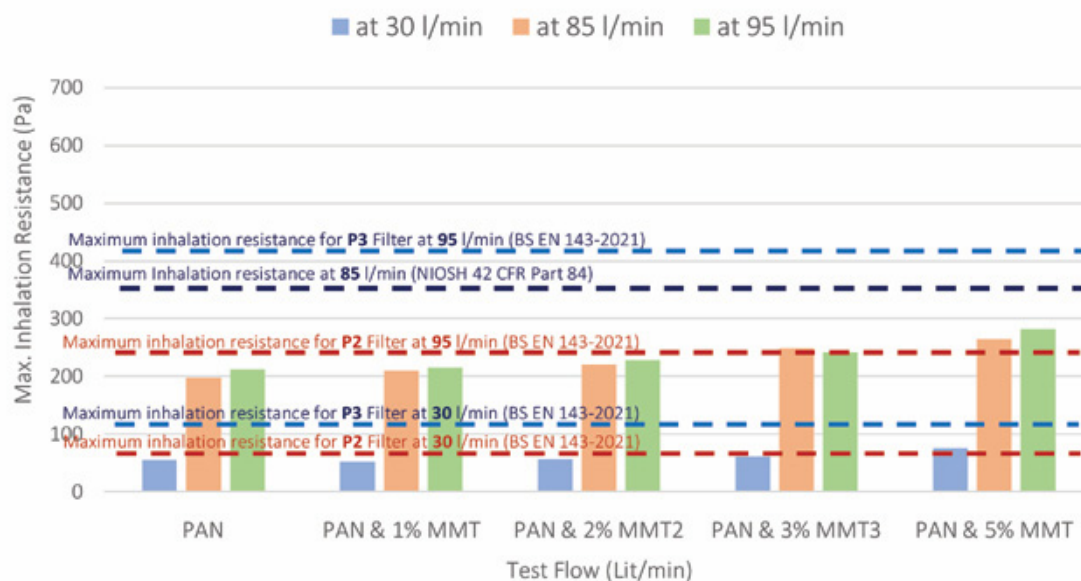


Fig. 3: Comparing the results of measuring the average respiratory resistance in composite media with the relevant standards

significant increase in breathing resistance is optimal diameter of synthesized nanofibers. Another reason can be attributed to characteristic of creating indirect or tortuous paths by clay nanoparticles which, while allowing suitable permeability against respiratory gases caused by inhaling and exhaling, creates obstacles against particle passage and as a result increases filtration efficiency.

It can be claimed that there is no significant difference between average breathing resistance of PAN nanofilter and PAN nanocomposites containing 1 and 2% MMT due to similarity between Packing density and porosity of these nanofilters. However, nanocomposites containing higher amounts of MMT, which according to FESEM images have higher Packing density and lower porosity, have higher average breathing resistance.

Therefore, amount of 2% MMT in composition of PAN nanocomposite was determined as optimal percentage with increase of 4.2, 4.9, 3.8, and 2.75% in filtration efficiency for 0.3, 0.5, 1, and 3-micron particles respectively while not causing significant change in average respiratory resistance.

Filtration efficiency of PAN nanofibers for filtration of 0.3, 0.5, and 1-micron particles with average of 91.28%, which was classified as P1 Level according to BS EN 143:2021 standard, by adding 2% MMT increased to 95.7% and promoted to P2 Level.

So, filtration efficiency of PAN nanofibers which had large difference with “filter efficiency level” parameter in classification of NIOSH CFR Part 84 standard by adding 2% MMT increased to 93.12% with improvement of 4.2% has reached near N95 Level at this standard.

#### 4. CONCLUSIONS

This study was carried out to evaluate the feasibility of improving particle filtering respirators’ filter performance by using composite media of polyacrylonitrile nanofiber (PAN) and montmorillonite clay nanoparticles (MMT). According to findings, filtration efficiency increased by adding MMT nanoparticles to PAN. Still, respiratory resistance in values over 2% MMT percentage shows a significant increase that limits application of higher than 2% MMT for mask filter.

Adding 2% MMT and synthesizing PAN/MMT nanocomposite and using it as respirator filter reduces fiber diameter and optimizes Packing density and porosity, resulting in proper filter permeability against breathing gases while creating barriers in particle passage, which will increase particle filtration efficiency.

It can be concluded that if 2% MMT nanoparticles are added to PAN nanofibers and composite nanofibers are used in production

of particle respirators, resulting respirators will increase particle filtration efficiency by 4.2% without increasing breathing difficulty for user. This result can increase protection against particulate pollutants in air pollution conditions.

#### **5. ACKNOWLEDGMENT**

The authors also thank Department of

Occupational Health Engineering of School of Public Health of Tehran University of Medical Sciences, especially Dr. Saba Kalantari, for cooperating in nanofilters test and also sincere cooperation of Dr. Nasim Gholam Shahbazi, CEO of Nanotarpak Knowledge-Based Company for electrospinning test nanofilters and preparation of FESEM images.

## امکان‌سنجی ارتقای عملکرد فیلتر ماسک‌های حفاظت تنفسی پالایش ذرات با به‌کارگیری غشاء کامپوزیتی نانوالیاف پلی‌اکریلونیتریل و نانوذرات رس مونت‌موریلونیت

سیاوش آزاد<sup>۱</sup>، یوسف رشیدی<sup>۱\*</sup>، فریده گلبابایی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> گروه فناوری های محیط زیست، پژوهشکده علوم محیطی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران  
<sup>۲</sup> گروه مهندسی بهداشت حرفه ای، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی تهران، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۲/۲۴، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۱/۱۶

### چکیده

**مقدمه:** پارامترهای مهم ارزیابی عملکرد ماسک‌های حفاظت تنفسی ذرات، کارایی فیلتراسیون و مقاومت تنفسی فیلتر ماسک در برابر عبور جریان هوا است که این دو پارامتر با هم رابطه‌ای مستقیم داشته و به‌طور معمول، با افزایش هر کدام، دیگری نیز افزایش می‌یابد. پژوهش‌هایی جهت ارتقای کارایی فیلتراسیون نانوالیاف با حفظ شرایط مطلوب مقاومت تنفسی که حداقل سختی تنفس را برای استفاده‌کننده‌ی ماسک ایجاد نماید، انجام شده است. این مطالعه، تأثیر به‌کارگیری غشاء کامپوزیتی نانوالیاف پلی‌اکریلونیتریل (PAN) و نانوذرات رس مونت‌موریلونیت (MMT) در ارتقای عملکرد فیلتر ماسک‌های حفاظت تنفسی پالایش ذرات با افزایش کارایی فیلتراسیون ضمن حفظ شرایط بهینه‌ی مقاومت تنفسی را مورد بررسی قرار می‌دهد.

**روش کار:** ابتدا محلول پلیمری PAN حاوی مقادیر صفر، ۱٪، ۲٪، ۳٪ و ۵٪ نانوذرات MMT آماده گردید و سپس غشاء کامپوزیتی نانوالیاف PAN/MMT در دستگاه الکترورسی تهیه شد. کارایی فیلتراسیون در محدوده‌ی قطرهای ۰/۳، ۰/۵، ۱ و ۳ میکرون و با استفاده از آئروسول کلرید سدیم، اندازه‌گیری و مقاومت تنفسی فیلتر نیز در سه گذر حجمی ۳۰، ۸۵ و ۹۵ لیتر بر دقیقه اندازه‌گیری شد.

**یافته‌ها:** کارایی فیلتراسیون نانوفیلترهای کامپوزیتی سنتز شده برای پالایش ذرات، با اضافه کردن نانوذرات MMT به نانوالیاف PAN افزایش می‌یابد که میزان بهینه‌ی MMT، ۲٪ تعیین گردید که بدون ایجاد تفاوت معنی‌داری در میزان مقاومت تنفسی، سبب ارتقای کارایی فیلتراسیون ذرات ۰/۳، ۰/۵، ۱ و ۳ میکرونی به ترتیب به میزان ۴/۲، ۴/۸۸، ۳/۷۷ و ۲/۷۵ درصد شد. دلیل اصلی این نتایج را می‌توان به بهبود ریخت‌شناسی نانوفیلترهای کامپوزیتی سنتز شده، پس از افزودن نانوذرات MMT نسبت داد که سبب ایجاد بهترین ویژگی‌های ریخت‌شناسی مناسب فیلتراسیون ذرات با اضافه کردن ۲٪ نانوذرات MMT به نانوالیاف PAN شده است؛ به‌گونه‌ای که ضمن توزیع یکنواخت و ابعاد کوچک‌تر الیاف، تغییر محسوس نیز در دانسیته‌ی فشردگی و تخلخل به وجود نمی‌آورد.

**نتیجه‌گیری:** در صورت اضافه کردن ۲٪ نانوذرات MMT به نانوالیاف PAN و استفاده از نانوالیاف کامپوزیتی به‌دست‌آمده در ساخت ماسک‌های ذرات، ماسک حاصل بدون افزایش سختی تنفس برای فرد استفاده‌کننده، با افزایش ۴/۲ درصدی کارایی فیلتراسیون ذرات در مقایسه با نانوالیاف PAN همراه خواهد بود که می‌تواند در شرایط آلودگی هوا، سبب حفاظت بیشتر افراد استفاده‌کننده در برابر آلاینده‌های ذره‌ای گردد.

**کلمات کلیدی:** نانوالیاف، ماسک ذرات، کارایی فیلتراسیون، مقاومت تنفسی، مونت‌موریلونیت.

## مقدمه

آلودگی هوا، یکی از مهم‌ترین خطرات محیط زیستی برای سلامتی انسان‌ها است که می‌تواند سبب بروز عوارضی از جمله سکنه‌ی مغزی، بیماری‌های قلبی و عروقی، سرطان ریه و بیماری‌های مزمن و حاد تنفسی از جمله آسم گردد. مطالعات آژانس بین‌المللی تحقیقات سرطان (IARC) وابسته به سازمان جهانی بهداشت، در سال ۲۰۱۳ نشان داد که آلودگی هوای محیط زیستی برای انسان سرطان‌زا است و ذرات معلق با قطر ۲/۵ میکرون یا کمتر (PM<sub>2.5</sub>) در هوا بیشترین ارتباط را با افزایش ابتلا به سرطان، به‌ویژه سرطان ریه دارد (۲۰۱). استفاده از ماسک‌های ذرات، به‌طور گسترده‌ای در کشورهای توسعه‌یافته و در حال توسعه به‌ویژه در کشورهای همچون چین، کره‌ی جنوبی، تایلند، هند و نیز کشور ما، به‌عنوان یکی از راهکارهای حفاظت افراد در برابر آلودگی ذرات محسوب می‌شود (۳).

ماسک‌های حفاظت تنفسی<sup>۱</sup>، وسایلی هستند که برای حفاظت از استنشاق آلاینده‌های خطرناک موجود در هوا مورد استفاده قرار می‌گیرند. کاربرد ماسک‌های حفاظت تنفسی تا پیش از سال ۲۰۱۹، به‌طور عمده به حفاظت از شاغلین در صنعت و مراکز درمانی و نیز حفاظت افراد در شرایط آلودگی هوا معطوف بود؛ اما با شیوع ویروس کووید ۱۹ در اواخر سال ۲۰۱۹ میلادی، توجه ویژه‌ای به استفاده از ماسک‌های حفاظت تنفسی ذرات جهت حفاظت در برابر این ویروس معطوف گردید (۴). در استانداردهای معتبرترین استانداردهای بین‌المللی ماسک‌های ذرات محسوب می‌گردند، دو پارامتر کارایی فیلتراسیون<sup>۲</sup> و مقاومت تنفسی<sup>۳</sup>، اصلی‌ترین عوامل ارزیابی عملکرد<sup>۴</sup> فیلتر ماسک محسوب می‌شوند. به‌طور معمول، این دو پارامتر با هم رابطه‌ای مستقیم داشته و با افزایش هر یک، دیگری هم افزایش می‌یابد (۵). به همین منظور، پژوهش‌هایی

جهت ساخت غشاهایی برای ایجاد کارایی فیلتراسیون حداکثری و شرایط مطلوب مقاومت تنفسی که حداقل سختی تنفس را برای فرد استفاده‌کننده از ماسک ایجاد نماید، در جریان است؛ به تعبیر دیگر، افزایش کارایی پالایش تا حدودی مجاز است که مقاومت تنفسی فیلتر ماسک از حدود مجاز تجاوز ننماید (۶، ۷).

تحقیقات صورت‌گرفته بر روی ماسک‌های ذرات موجود در بازارهای جهانی، نشان داده است که برخلاف ادعای تولیدکنندگان، بسیاری از آن‌ها به دلایل متعددی که مهم‌ترین آن‌ها نامناسب بودن غشاء مورد استفاده است، قابلیت پالایش آلاینده‌های ذره‌ای هوا را ندارند (۳). نکته‌ی مهمی که در استفاده از این ماسک‌ها به‌ویژه از سوی مردم عادی مشهود است، کارایی فیلتراسیون این ماسک‌ها در پیشگیری از مواجهه با ذرات و همچنین میانگین مقاومت تنفسی فیلتر ماسک و راحتی تنفس برای فرد استفاده‌کننده از ماسک است (۸).

نانوالیاف با قطر کمتر از ۵۰۰ نانومتر، غشاهای نوینی هستند که کارایی فیلتراسیون و نیز عملکرد بهتری نسبت به الیاف معمولی دارند؛ لذا در سالیان اخیر، استفاده از فیلترهای نانولیفی و کامپوزیت آن‌ها با برخی نانومواد به علت ساختار ساده، قیمت پایین، ساختارهای منفذدار با نفوذپذیری بالا، اندازه‌ی کوچک منافذ و مقاومت پایین در برابر عبور جریان هوا، بسیار متداول شده است (۹، ۱۰). ظرافت بسیار زیاد نانوالیاف، خواص متنوعی از قبیل بالا بودن نسبت سطح به حجم، کوچک بودن منافذ، نفوذپذیری مناسب و مقاومت کم در برابر جریان هوا را در این غشاها فراهم می‌نماید. مجموع این ویژگی‌ها، سبب شده است تا کارایی فیلتراسیون ذرات از طریق ساختار مکانیکی نانوفیلترها افزایش یابد. همچنین اثر لغزش جریان<sup>۵</sup> هوا در حین عبور از نانوالیاف، سبب تأثیر آن بر سرعت جریان هوای عبوری (مقاومت در برابر جریان هوا) شده و این موضوع باعث کاهش افت فشار نانوفیلترها نسبت به میکروفیلترها می‌گردد (۱۱).

1. Respirator
2. Filtration efficiency
3. Breathing resistance
4. Respirator performance

5. Slip-Flow

دارای دو ورق چهاروجهی<sup>۶</sup> از ساندویچ سیلیکا است که یک ورقه ی هشت وجهی<sup>۷</sup> مرکزی، آلومینا را می پوشاند (۱۵).

در پژوهش حاضر، با سنتز غشاء کامپوزیتی نانوالیاف PAN با نانوذرات MMT نسبت به به کارگیری آن به منظور ارتقای کارایی فیلتراسیون ماسکهای حفاظت تنفسی جهت پالایش ذرات پرداخته شده است. این پژوهش، به طور ویژه به بررسی و تعیین درصد بهینه ی MMT در نانوالیاف PAN برای استفاده از آن در غشاء (مدیای) ماسک پرداخته است که بتواند کارایی فیلتراسیون حداکثری و شرایط مطلوب مقاومت تنفسی (که حداقل سختی تنفس را برای فرد استفاده کننده از ماسک ایجاد کند) فراهم نماید و درعین حال با الزامات استانداردهای بین المللی فیلتر ماسکهای ذرات (BS EN ۱۴۳:۲۰۲۱ و ۸۴ NIOSH CFR Part) منطبق باشد.

### روش کار

#### ساخت غشاء کامپوزیتی نانوالیاف PAN/MMT

برای تهیه ی محلول پلیمری الکترورسی (۱۲ w/w)، ۱/۲ گرم پودر PAN شرکت پلی اکریل ایران در ۸/۸ گرم حلال دی متیل فرمامید (DMF) مرک آلمان حل شد. محلول، به مدت ۳ ساعت بر روی همزن مغناطیسی (استیرر) در دمای اتاق (۲۵±۲ درجه ی سانتی گراد) در حالت هم زدن نگه داشته شد. ابتدا بخشی از محلول حاصل شده، به عنوان نمونه ی PAN خالی برداشته شده و سپس MMT با نسبت های وزنی ۰.۱، ۰.۲، ۰.۳ و ۰.۵ (نسبت به PAN) (بر اساس نتایج مطالعه ی بانسال و همکاران (۲۰۲۱)) (۱۶) وزن شد و به محلول اضافه گردید و به مدت ۴ ساعت دیگر در حالت هم زدن نگه داشته شد. سپس محلول های تهیه شده، در دستگاه الکترورسی قرار گرفت. شرایط بهینه برای الکترورسی تعیین شد و شرایط یکسان برای همه ی نمونه ها شامل استفاده از سرنگ ۱ میلی لیتر، قطر نازل ۰/۵۳ میلی متر، ولتاژ تثبیت شده بر

6. Tetrahedral Sheet  
7. Octahedral Sheet

یکی از روش های تولید نانوالیاف، الکترورسی است. الکترورسی<sup>۱</sup>، فرایندی جهت تولید انواع نانوالیاف و میکروالیاف از محلول های مواد پلیمری، سرامیکی یا محلول های کامپوزیتی متشکل از پلیمر-نانوذرات و همچنین مذاب های مواد مذکور است (۹، ۱۲). امروزه امکان تولید صنعتی نانوالیاف مختلفی فراهم گردیده و در فرایندهای فیلتراسیون هوا مورد استفاده قرار می گیرند که از جمله ی آن ها می توان به نانوالیاف سلولزی، پلی اکریلونیتریل (PAN)<sup>۲</sup> و پلی پروپیلن (PP) اشاره کرد (۶). غشاء کامپوزیتی نانوالیاف، یکی از زمینه هایی است که در حیطه ی نانوفناوری خیلی سریع پیشرفت کرد؛ به طوری که کامپوزیت نانوالیاف با استفاده از تقویت کننده های نانومتری مانند نانوالیاف گرافیتی (GNFs) و نانولوله های کربنی (CNTs)، بسیار مورد توجه قرار گرفت (۱۳). بدیهی است در به کارگیری نانوالیاف و نانوذرات به عنوان ماسک، بایستی به اثرات بهداشتی و خطرات یا مزاحمت آن برای استفاده کننده نیز توجه داشت که این موضوع، انتخاب نانومواد مناسب را با محدودیت هایی مواجه خواهد کرد (۷).

یکی از نانوذراتی که در طی دهه های اخیر در سنتز نانوکامپوزیت ها بسیار مورد توجه قرار گرفته است، نانوذرات رس و در صدر آن مونتموریلونیت<sup>۳</sup> (MMT) است. کاربرد گسترده ی نانوذرات رس به عنوان پرکننده یا افزودنی در تولید نانوکامپوزیت ها طی سال های اخیر، سبب شده است که در سال ۲۰۰۵، تقریباً یک چهارم (۲۴ درصد) کل نانوکامپوزیت های مورد استفاده در جهان را به خود اختصاص دهد (۱۴).

مونتموریلونیت (MMT)، به گروه بسیار نرمی از مواد معدنی فیلوسیلیکات ها<sup>۴</sup> اطلاق می گردد که زمانی که محلول آب به صورت کریستال های میکروسکوپی تشکیل می شود، ساخته می شوند. مونتموریلونیت، یکی از اعضای گروه اسمکتیت<sup>۵</sup>، یک نوع رس ۲:۱ است؛ به این معنی که

1. Electrospinning
2. Polyacrylonitrile (PAN)
3. Montmorillonite (MMT)
4. Phyllosilicate
5. Smectite



قطر الیاف و میزان تخلخل توسط دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی (FESEM) صورت گرفت.

#### ارزیابی کارایی فیلتراسیون مدیای ماسک

ارزیابی کارایی فیلتراسیون مدیای ماسک، با استفاده از دستگاه آزمون فیلتر مدل FT200PS ساخت شرکت فناوران نانومقیاس (FNM Co.) انجام گرفت. نبولایزر این دستگاه، قابلیت تولید آئروسول کلرید سدیم مورد استفاده به عنوان آئروسول آزمون را داشته و نیز این دستگاه قابلیت پایش ذرات در محدوده ی قطرهای ۰/۳، ۰/۵، ۱ و ۳ میکرون را دارا است.

علاوه بر این، به جهت مطابقت نتایج با استانداردهای بین‌المللی مربوط به ماسک، نتایج با دو استاندارد NIOSH CFR Part ۸۴ و BS EN ۱۴۳:۲۰۲۱ (آمریکا) مورد مقایسه قرار گرفت (۷، ۱۹).

#### ارزیابی افت فشار ناشی از مدیای ماسک

ارزیابی افت فشار ناشی از مدیای ماسک که نشانگر میزان سختی تنفس با ماسک است، با استفاده از دستگاه آزمون فیلتر مدل FT200PS ساخت شرکت فناوران نانومقیاس (FNM Co.) در گذرهای حجمی ۳۰، ۸۵ و ۹۵ لیتر بر دقیقه انجام شد.

همچنین به جهت مطابقت نتایج با استانداردهای بین‌المللی مربوط به ماسک، نتایج با دو استاندارد NIOSH CFR Part ۸۴ و BS EN ۱۴۳:۲۰۲۱ (آمریکا) مورد مقایسه قرار گرفت (۷، ۱۹).

#### انتخاب مدیای ماسک مناسب از میان غشاهای کامپوزیتی

##### نانوالیاف PAN حاوی نانوذرات MMT

برای انتخاب مدیای مناسب از میان غشاهای کامپوزیتی نانوالیاف PAN/MMT که ضمن ارتقای کارایی فیلتراسیون ذرات، تفاوت معنی‌داری نیز در میزان مقاومت تنفسی فیلتر به وجود نیارد، از روش‌ها و آزمون‌های آماری حداقل تفاوت معنی‌دار (LSD)<sup>۳</sup> و

3. LSD (Least Significant Difference)

روی ۲۰ کیلوولت، سرعت جریان محلول ۰/۸ میلی‌لیتر در ساعت و فاصله ی بین نازل و درام جمع‌کننده، معادل ۱۰ سانتی‌متر بود (۷، ۱۷، ۱۸).

زیر لایه ی مورد استفاده، منسوج نفاخته اسپان‌باند با وزن ۳۰ گرم بر مترمربع بوده و تمام نمونه‌ها در شرایط یکسان، الکترورسی گردید و پارامتر مدت‌زمان و ضخامت وب نانوالیاف برای نمونه‌ها یکسان در نظر گرفته شد.

همچنین درصد بهینه ی MMT در نانوالیاف PAN بر مبنای استانداردهای ۱۴۳:۲۰۲۱ BS EN و ۸۴ NIOSH CFR Part تعیین گردید که معیار در این استانداردها، بالاترین کارایی فیلتراسیون همراه با پایین‌ترین میزان مقاومت تنفسی است (۷، ۱۹).

ذکر این نکته نیز ضروری است که در ساخت ماسک‌های حفاظت در برابر ذرات، از دو لایه اسپان‌باند در طرفین فیلتر مدیا (معمولاً از جنس نانوالیاف یا ملت بلون<sup>۱</sup>) به‌عنوان فرم‌دهنده و محافظ فیلتر مدیا استفاده می‌شود که این دو لایه، به‌عنوان یک مدیای ثانویه به افزایش کارایی فیلتراسیون در ماسک ساخته‌شده ی نهایی کمک می‌کند؛ که در این پژوهش، به‌منظور تمرکز خاص بر روی فیلتر از تأثیر این فیلتر مدیاها صرف‌نظر گردید (۷، ۱۹).

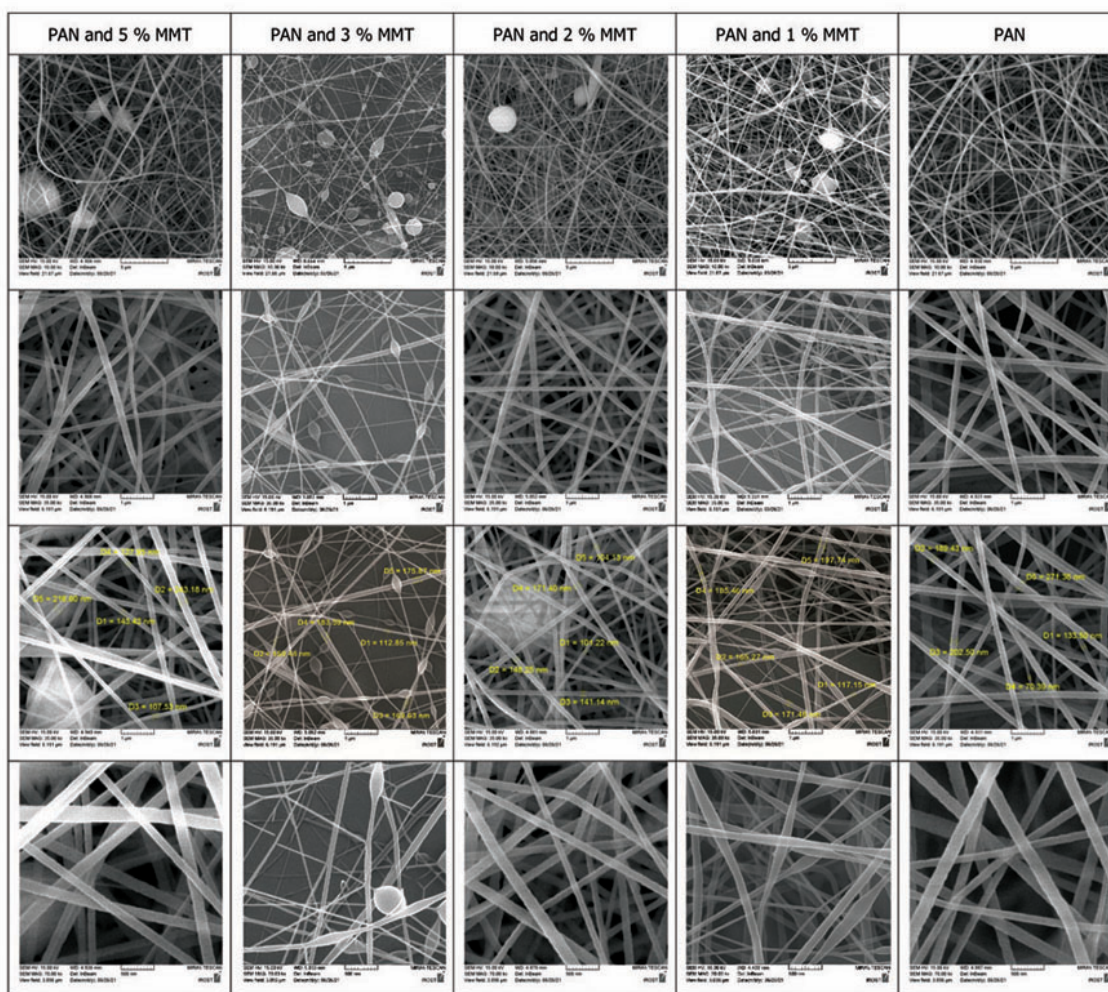
#### حجم نمونه

برای تعیین حجم نمونه در این پژوهش، از فرمول کوکران<sup>۲</sup> استفاده شد که با احتساب ۹۵٪ اطمینان، ۵٪ انحراف استاندارد و ۲٪ خطای مجاز، حداقل حجم نمونه ۱۰ عدد تعیین گردید و در نتیجه، نانوالیاف PAN و نیز هر یک از درصدهای ۱، ۲، ۳، ۵ و ۱۰ نانوذرات رس مونتموریلونیت (MMT) در غشاء کامپوزیتی نانوالیاف پلی‌اکریلونیتریل (PAN) به تعداد ۱۰ نمونه و در مجموع ۶۰ نانوفیلتر، برای سنتز و آزمون تعیین گردید.

#### ارزیابی میکروسکوپی مدیای تولیدشده

مطالعات ریخت‌شناسی نانوالیاف سنتز شده، شامل

1. Melt blown
2. Cochran formula



شکل ۱: تصاویر FESEM نانوالیاف سنتز شده

تصاویر شماره ی ۲، میانگین قطر الیاف PAN معادل ۱۷۳/۴۳۶ nm بود که با اضافه کردن مقادیر ۱٪، ۲٪، ۳٪ و ۵٪ نانوذره MMT به آن، سبب کاهش میانگین قطر نانوالیاف به ترتیب به مقادیر ۱۶۸/۶۱۶، ۱۳۳/۲۲۸، ۱۶۰/۲۸ و ۱۶۸/۱۳۸ نانومتر گردید.

همانطور که از تصاویر FESEM نانوالیاف سنتز شده در تصاویر شماره ی ۲ مشخص است، دانسیته فشردگی<sup>۲</sup> و تخلخل<sup>۳</sup> تقریباً مشابهی در نانوفیلتر PAN و نانوکامپوزیت‌های PAN حاوی ۱ و ۵٪ و تا حدودی ۳٪ نانوذرات MMT وجود دارد؛ ولی بهترین ویژگی‌های

2. Packing density
3. Porosity

آزمون همبستگی پیرسون<sup>۱</sup> استفاده شد.

### یافته ها

ریخت‌شناسی و قطر الیاف نانوفیلترهای کامپوزیتی سنتز شده

ویژگی‌های ریخت‌شناسی نانوالیاف سنتز شده، مطابق با تصاویر به‌دست‌آمده توسط دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی (FESEM) به شرح تصویر ۲ و نتایج اندازه‌گیری قطر نانوالیاف در جدول شماره ی ۱ ملاحظه می‌گردد.

- مطابق تصاویر FESEM نانوالیاف سنتز شده در
1. Pearson correlation

جدول ۱: نتایج سنجش قطر نانوالیاف سنتز شده توسط دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی (FESEM)

قطر فیبر (nm)					
غشاء کامپوزیتی نانوالیاف PAN با ۵٪ نانوذرات MMT	غشاء کامپوزیتی نانوالیاف PAN با ۳٪ نانوذرات MMT	غشاء کامپوزیتی نانوالیاف PAN با ۲٪ نانوذرات MMT	غشاء کامپوزیتی نانوالیاف PAN با ۱٪ نانوذرات MMT	PAN	فیبر مورد مطالعه
۱۴۳/۴۲	۱۱۲/۸۵	۱۰۱/۲۲	۱۱۷/۱۵	۱۳۳/۵	D۱
۲۴۳/۱۸	۱۵۹/۴۶	۱۴۸/۲۵	۱۶۵/۲۷	۱۸۹/۴۳	D۲
۱۰۷/۵۳	۱۶۹/۶۳	۱۴۱/۱۴	۱۷۷/۴۶	۲۰۲/۵	D۳
۱۲۷/۹۶	۱۸۳/۵۹	۱۷۱/۴	۱۸۵/۴۶	۷۰/۳۹	D۴
۲۱۸/۶	۱۷۵/۸۷	۱۰۴/۱۳	۱۹۷/۷۴	۲۷۱/۳۶	D۵
۱۶۸/۱۳۸	۱۶۰/۲۸	۱۳۳/۲۲۸	۱۶۸/۶۱۶	۱۷۳/۴۳۶	میانگین

جدول ۲: نتایج سنجش میانگین و انحراف معیار کارایی فیلتراسیون ذرات توسط فیلترهای سنتز شده

کارایی فیلتراسیون (%) در گذر حجمی ۹۵ Lit/min				نوع فیلتر مورد آزمون
$\mu\text{m}^3$	$\mu\text{m}^1$	$\mu\text{m}^0/5$	$\mu\text{m}^0/3$	
۱/۹۴±۹۷/۲۵	۲/۹۴±۹۴/۴۸	۲/۵۶±۹۰/۴۳	۱/۹۹±۸۸/۹۲	PAN
۱/۸۱±۹۸/۳۵	۱/۴±۹۵/۹۱	۱/۶۹±۹۲/۷۵	۲/۳۹±۹۰/۴۳	غشاء کامپوزیتی نانوالیاف PAN با ۱٪ نانوذرات MMT
۰±۱۰۰	۱/۳۱±۹۸/۲۵	۱/۹۷±۹۵/۳۱	۱/۶۶±۹۳/۱۲	غشاء کامپوزیتی نانوالیاف PAN با ۲٪ نانوذرات MMT
۰±۱۰۰	۱/۷±۹۸/۱۵	۱/۸۳±۹۴/۷۷	۱/۶۸±۹۱/۸۸	غشاء کامپوزیتی نانوالیاف PAN با ۳٪ نانوذرات MMT
۱/۱۶±۹۸/۸۲	۲/۳۶±۹۶/۲۲	۲/۰۵±۹۲/۵۸	۱/۳۷±۹۰/۳۳	غشاء کامپوزیتی نانوالیاف PAN با ۵٪ نانوذرات MMT

ملاحظه می‌شود.

آزمون مقایسه‌ی میانگین نیز نشان می‌دهد که افزایش کارایی فیلتراسیون نانوفیلترهای کامپوزیتی سنتز شده، حاوی درصد‌های مختلف MMT یکسان نیست.

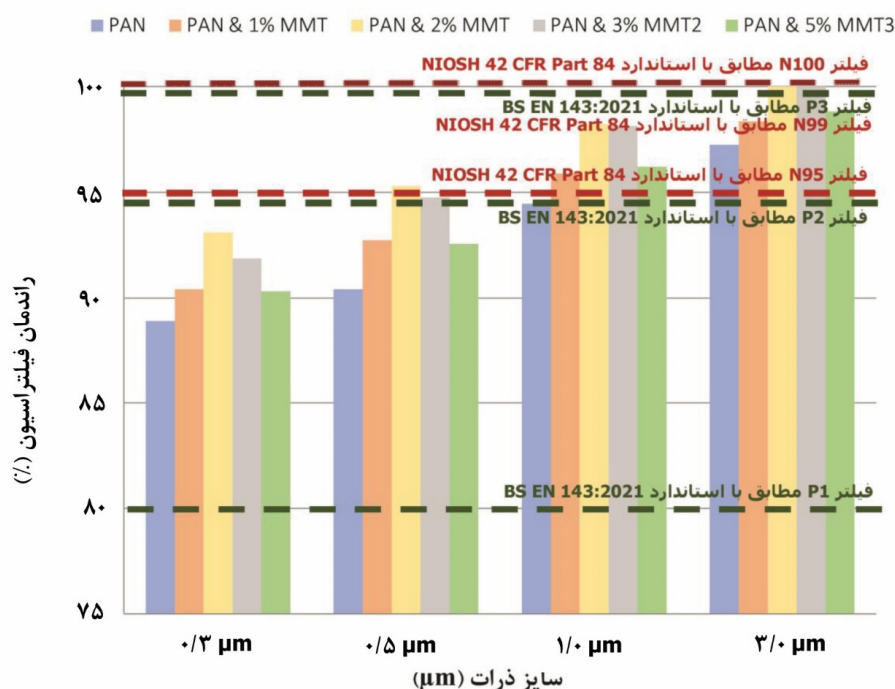
بر اساس ارزیابی انجام شده، کارایی فیلتراسیون برای پالایش ذرات ۰/۳ میکرون، با اضافه کردن مقادیر ۱، ۲، ۳ و ۵٪ نانوذرات MMT به نانوالیاف PAN به ترتیب ۱/۵۱، ۴/۲، ۲/۹۶ و ۱/۴۱ درصد افزایش می‌یابد.

همچنین انجام آزمون حداقل تفاوت معنی‌دار (LSD)، نشان داد که تفاوت معنی‌داری میان میانگین کارایی

ریخت‌شناسی نانوالیاف مناسب فیلتراسیون ذرات، شامل توزیع یکنواخت لیف و ابعاد کوچک‌تر الیاف در کامپوزیت حاوی ۲٪ نانوذره MMT در نانوالیاف PAN نسبت به سایر درصد‌های مورد آزمون مشاهده می‌گردد.

بررسی کارایی فیلتراسیون نانوفیلترهای کامپوزیتی سنتز شده

نتایج سنجش میانگین کارایی فیلتراسیون ذرات، توسط فیلترهای سنتز شده در جدول شماره ۲ و مقایسه‌ی این نتایج با استانداردهای مربوطه در شکل ۲



شکل ۲: مقایسه نتایج سنجش میانگین کارایی فیلتراسیون ذرات توسط فیلترهای سنتز شده با استانداردهای مربوطه

۳ و ۵٪ نانوذرات MMT به نانوالیاف PAN، این شاخص به ترتیب ۱/۴۳، ۳/۷۷، ۳/۶۷ و ۱/۷۴ درصد افزایش می‌یابد.

همچنین انجام آزمون حداقل تفاوت معنی‌دار (LSD)، نشان داد که تفاوت معنی‌داری میان میانگین کارایی فیلتراسیون نانوفیلتر PAN حاوی ۱ و ۵٪ نانوذرات MMT برای پالایش ذرات یک میکرون، وجود ندارد؛ ولی با مقادیر ۲ و ۳٪، تفاوت معنی‌داری وجود داشته و میانگین کارایی فیلتراسیون با اضافه کردن ۲٪ نانوذرات MMT به نانوالیاف PAN بیشتر از سایر مقادیر است.

کارایی فیلتراسیون برای پالایش ذرات ۳ میکرون نیز مورد اندازه‌گیری قرار گرفت که بر این اساس، با اضافه کردن مقادیر ۱، ۲، ۳ و ۵٪ نانوذرات MMT به نانوالیاف PAN، به ترتیب ۱/۱، ۲/۷۵، ۲/۷۵ (ماکزیمم)، ۲/۷۵ (ماکزیمم) و ۱/۵۷ درصد افزایش می‌یابد.

همچنین انجام آزمون حداقل تفاوت معنی‌دار (LSD)، نشان داد که تفاوت معنی‌داری میان میانگین کارایی فیلتراسیون نانوفیلتر PAN حاوی ۱ و ۵٪ نانوذرات

فیلتراسیون نانوفیلتر PAN حاوی ۱ و ۵٪ نانوذرات MMT برای پالایش ذرات ۰/۳ میکرون، وجود ندارد؛ ولی با مقادیر ۲ و ۳٪، تفاوت معنی‌داری وجود داشته و میانگین کارایی فیلتراسیون با اضافه کردن ۲٪ نانوذرات MMT به نانوالیاف PAN بیشتر از سایر مقادیر است.

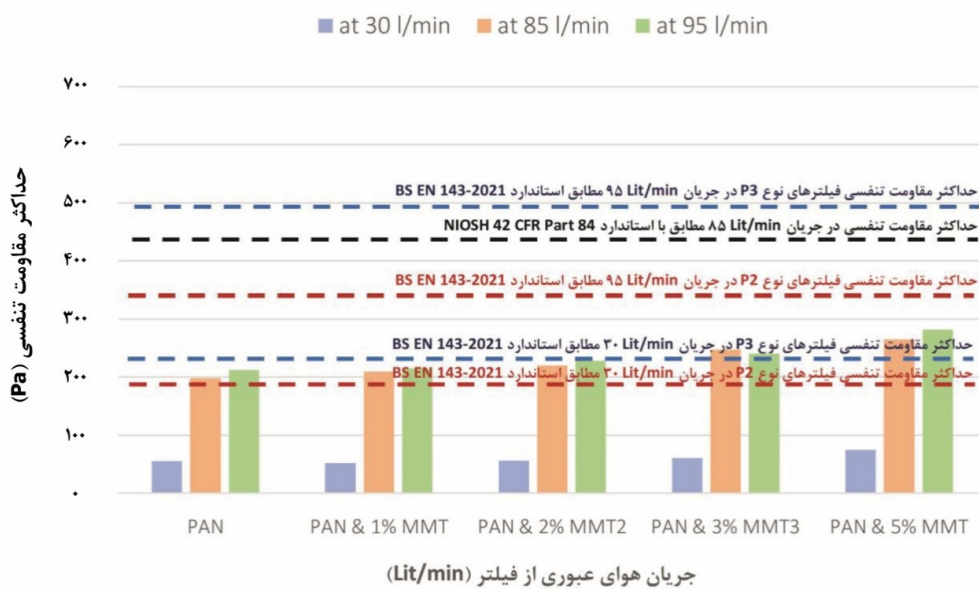
همچنین کارایی فیلتراسیون برای پالایش ذرات ۰/۵ میکرون، با اضافه کردن مقادیر ۱، ۲، ۳ و ۵٪ نانوذرات MMT به نانوالیاف PAN به ترتیب ۲/۳۲، ۴/۸۸، ۴/۳۴ و ۲/۱۵ درصد افزایش می‌یابد.

همچنین انجام آزمون حداقل تفاوت معنی‌دار (LSD)، نشان داد که تفاوت معنی‌داری میان میانگین کارایی فیلتراسیون نانوفیلتر PAN حاوی ۱ و ۵٪ نانوذرات MMT برای پالایش ذرات ۰/۵ میکرون، وجود ندارد؛ ولی با مقادیر ۲ و ۳٪، تفاوت معنی‌داری وجود داشته و میانگین کارایی فیلتراسیون با اضافه کردن ۲٪ نانوذرات MMT به نانوالیاف PAN، بیشتر از سایر مقادیر است.

انجام آزمون کارایی فیلتراسیون برای پالایش ذرات یک میکرون نیز نشان داد که با اضافه کردن مقادیر ۱، ۲،

جدول ۳: نتایج سنجش میانگین و انحراف معیار مقاومت تنفسی در فیلترهای سنتز شده

حداکثر مقاومت تنفسی (Pa)			نوع فیلتر مورد آزمون
گذر حجمی			
۹۵ Lit/min	۸۵ Lit/min	۳۰ Lit/min	
۱۲/۶۱±۲۱۲	۱۴/۰۳±۱۹۸	۱۴/۳۹±۵۵	PAN
۱۳/۱۵±۲۱۵	۱۴/۱۱±۲۱۰	۱۱/۴۵±۵۲	غشاء کامپوزیتی نانوالیاف PAN با ۱٪ نانوذرات MMT
۱۶/۱۹±۲۲۸	۱۶/۲۵±۲۲۰	۹/۸۴±۵۶	غشاء کامپوزیتی نانوالیاف PAN با ۲٪ نانوذرات MMT
۱۰/۰۲±۲۴۱	۱۰/۳۱±۲۴۸	۹/۱۹±۶۱	غشاء کامپوزیتی نانوالیاف PAN با ۳٪ نانوذرات MMT
۱۲/۴۲±۲۸۲	۱۴/۸۸±۲۶۵	۱۱/۴۶±۷۵	غشاء کامپوزیتی نانوالیاف PAN با ۵٪ نانوذرات MMT



شکل ۳: مقایسه نتایج سنجش میانگین مقاومت تنفسی در فیلترهای سنتز شده با استانداردهای مربوطه

مطالعه گردید که بیشترین مقدار آن در میزان ۲٪ MMT بود که این موضوع با نتایج بررسی ویژگی‌های ریخت‌شناسی نانوالیاف در بخش ۳-۱ نیز همخوانی کامل دارد. همچنین با توجه به نتایج ارزیابی کارایی فیلتراسیون ذرات ۱ و ۳ میکرون توسط نانوالیاف PAN حاوی ۲٪ نانوذرات MMT، پیش‌بینی می‌شود کارایی فیلتراسیون این نانوکامپوزیت برای ذرات ۲/۵ میکرون و کوچک‌تر (PM ۲/۵) نیز تا حدود ۳ درصد افزایش داشته باشد.

MMT برای پالایش ذرات ۳ میکرون، وجود ندارد؛ ولی با مقادیر ۲ و ۳٪، تفاوت معنی‌داری وجود داشته و میانگین کارایی فیلتراسیون با اضافه کردن ۲ و ۳٪ نانوذرات MMT به نانوالیاف PAN به میزان حداکثر (۱۰۰٪) و بیشتر از سایر مقادیر است.

با توجه به ارزیابی‌های صورت‌گرفته، افزودن مقادیر ۱، ۲، ۳ و ۵٪ نانوذرات MMT به نانوالیاف PAN، سبب افزایش کارایی فیلتراسیون ذرات در کلیه اندازه‌های مورد

جدول ۴: جمع بندی نتایج بهینه‌سازی نانوالیاف PAN با ۲٪ نانوذرات MMT

مقادیر	پارامترهای بهینه‌سازی
۴/۲ درصد	درصد افزایش کارایی فیلتراسیون جهت ذرات ۰/۳ میکرون نسبت به PAN
۱۶ پاسکال افزایش (غیر معنی دار)	میزان تغییر مقاومت تنفسی در گذر حجمی ۹۵ lit/min
۴۰	کاهش میانگین قطر الیاف (nm)
از رده P1 به نزدیک P2	ارتقای طبقه بندی فیلتر ماسک مطابق با استاندارد BS EN ۱۴۳:۲۰۲۱
۲/۹۶ درصد افزایش داشته ولی همچنان پایین تر از سطح N9۵	ارتقای طبقه بندی فیلتر ماسک مطابق با استاندارد ۸۴ NIOSH CFR Part

(LSD)، نشان داد که تفاوت معنی‌داری میان میانگین مقاومت تنفسی نانوفیلتر PAN با نانوکامپوزیت‌های PAN حاوی ۱ و ۲٪ نانوذرات MMT وجود ندارد؛ ولی با اضافه کردن مقادیر ۳ و ۵٪ نانوذرات MMT به نانوالیاف PAN، میانگین مقاومت تنفسی، به‌طور معنی‌داری افزایش می‌یابد که این موضوع با نتایج بررسی ویژگی‌های ریخت‌شناسی نانوالیاف در بخش ۳-۱ نیز همخوانی کامل دارد؛ به تعبیر واضح‌تر، دانسیته ی فشردگی و تخلخل تقریباً مشابه نانوفیلتر PAN و نانوکامپوزیت‌های PAN حاوی ۱ و ۲٪ نانوذرات MMT، سبب شده است که اختلاف معنی‌داری میان میانگین مقاومت تنفسی آن‌ها وجود نداشته باشد.

در این مطالعه، درصد بهینه‌ی نانوذرات MMT در نانوالیاف PAN برای استفاده از آن در غشاء (مدیای) ماسک که بتواند کارایی فیلتراسیون حداکثری و شرایط مطلوب مقاومت تنفسی (که حداقل سختی تنفس را برای استفاده‌کننده از ماسک ایجاد کند) را فراهم نماید و درعین حال با الزامات استانداردهای بین‌المللی فیلتر ماسک‌های ذرات (BS EN ۱۴۳:۲۰۲۱ و ۸۴ NIOSH CFR Part) منطبق باشد، ۲٪ تعیین گردید. همچنین با توجه به مباحث مطرح‌شده، جمع‌بندی نتایج بهینه‌سازی نانوالیاف PAN با استفاده از MMT را می‌توان در قالب جدول شماره ۴ نشان داد:

برای تحلیل نتایج حاصله از آزمون همبستگی میان میانگین قطر الیاف سنتز شده با میانگین مقاومت تنفسی و نیز با کارایی فیلتراسیون در صورت اضافه کردن مقادیر

بررسی مقاومت تنفسی نانوفیلترهای کامپوزیتی سنتز شده:

با توجه به تعداد نمونه‌ی محاسبه‌شده، از هر گروه نانوفیلتر کامپوزیتی سنتز شده، ۱۰ نمونه تحت آزمون تعیین مقاومت تنفسی قرار گرفتند که نتایج حاصل از این آزمون‌ها، در جدول شماره ۳ و مقایسه‌ی این نتایج با استانداردهای مربوطه در شکل ۳ ملاحظه می‌شود.

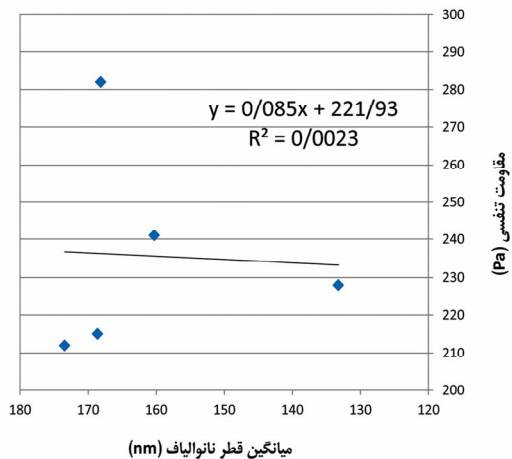
آزمون مقایسه‌ی میانگین نیز نشان می‌دهد که افزایش مقاومت تنفسی برای درصد‌های مختلف MMT، یکسان نیست.

بر اساس ارزیابی انجام‌شده، مقاومت تنفسی نانوفیلترهای کامپوزیتی سنتز شده با اضافه کردن مقادیر ۱، ۲، ۳ و ۵٪ نانوذرات MMT به نانوالیاف PAN در گذر حجمی ۳۰ lit/min به ترتیب ۳-، ۱، ۶ و ۲۰ پاسکال افزایش می‌یابد.

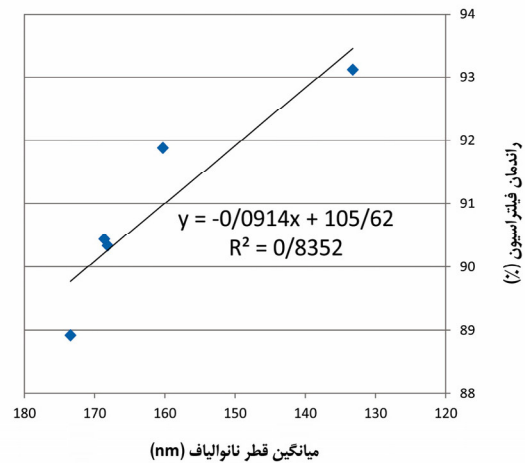
بر اساس ارزیابی انجام‌شده، مقاومت تنفسی نانوفیلترهای کامپوزیتی سنتز شده با اضافه کردن مقادیر ۱، ۲، ۳ و ۵٪ نانوذرات MMT به نانوالیاف PAN در گذر حجمی ۸۵ lit/min به ترتیب ۱۲، ۲۲، ۵۰ و ۶۷ پاسکال افزایش می‌یابد.

بر اساس ارزیابی انجام‌شده، مقاومت تنفسی نانوفیلترهای کامپوزیتی سنتز شده با اضافه کردن مقادیر ۱، ۲، ۳ و ۵٪ نانوذرات MMT به نانوالیاف PAN در گذر حجمی ۹۵ lit/min، به ترتیب ۳، ۱۶، ۲۹ و ۷۰ پاسکال افزایش می‌یابد.

همچنین انجام آزمون حداقل تفاوت معنی‌دار



شکل ۵: مقایسه نتایج سنجش همبستگی میان قطرنانو الیاف سنتز شده با میانگین مقاومت تنفسی و نیز کارایی فیلتراسیون در صورت اضافه کردن مقادیر صفر، ۱، ۲، ۳ و ۵ نانوذرات MMT به نانوالیاف PAN



شکل ۴: مقایسه نتایج سنجش همبستگی میان قطرنانو الیاف سنتز شده با میانگین مقاومت تنفسی و نیز کارایی فیلتراسیون در صورت اضافه کردن مقادیر صفر، ۱، ۲، ۳ و ۵ نانوذرات MMT به نانوالیاف PAN

۰/۵، ۱ و ۳ میکرونی به ترتیب به میزان ۴/۲، ۴/۸۸، ۳/۷۷ و ۲/۷۵ درصد گردید. بر اساس این نتایج، ارتقای کارایی فیلتراسیون برای ذرات ۲/۵ میکرون و کوچکتر (۲/۵ PM) نیز پیش بینی می‌گردد.

همچنین با توجه به شواهد، به نظر می‌رسد دلیل اصلی افزایش کارایی فیلتراسیون نانوکامپوزیت‌های PAN حاوی ۱ و ۲ نانوذرات MMT، ضمن معنی‌دار نبودن میزان افزایش مقاومت تنفسی در آن‌ها، قطر بهینه‌ی نانوالیاف سنتز شده است که این موضوع با نتایج تحقیقات فرهنگ و همکاران (۲۰۱۶) و نیز ژو و همکاران (۲۰۱۸) مشابهت دارد (۲۰، ۲۱). همچنین دلیل دیگر را می‌توان به ویژگی ایجاد مسیرهای غیرمستقیم یا پرپیچ‌وخم توسط نانوذرات رس نسبت داد که در عین امکان ایجاد نفوذپذیری مناسب در برابر گازهای تنفسی ناشی از دم و بازدم، موانعی را در برابر عبور ذرات ایجاد نموده و در نتیجه، کارایی فیلتراسیون را افزایش می‌دهد که این موضوع با نتایج مطالعه‌ی پائول و همکاران (۲۰۰۸) مطابقت داشت (۲۲).

می‌توان ادعا کرد که عدم وجود تفاوت معنی‌دار میان میانگین مقاومت تنفسی نانوفیلتر PAN با نانو کامپوزیت‌های PAN حاوی ۱ و ۲ MMT نیز به دلیل تشابه میان دانسیته‌ی فشرده‌گی و تخلخل این نانوفیلترها

صفر، ۱، ۲، ۳ و ۵ نانوذرات MMT به نانوالیاف PAN استفاده شد که بر این اساس، با اطمینان ۹۵٪ می‌توان گفت که همبستگی معنی‌داری میان میانگین قطر الیاف سنتز شده با میانگین مقاومت تنفسی وجود ندارد؛ اما با اطمینان ۹۰٪ همبستگی معکوس بسیار قوی ( $r = -0/91$ ) میان میانگین قطر الیاف سنتز شده با میانگین کارایی فیلتراسیون آن‌ها وجود دارد.

شکل‌های ۴ و ۵، نتایج سنجش همبستگی میان قطر نانوالیاف سنتز شده با میانگین مقاومت تنفسی و نیز کارایی فیلتراسیون در صورت اضافه کردن نانوذرات MMT به نانوالیاف PAN را نشان می‌دهد.

### بحث

بر اساس نتایج به دست آمده، کارایی فیلتراسیون نانوفیلترهای کامپوزیتی سنتز شده برای پالایش ذرات ۰/۳ الی ۳ میکرون با اضافه کردن نانوذرات MMT به نانوالیاف PAN افزایش می‌یابد که این موضوع با نتیجه‌ی تحقیقات بانسال و همکاران (۲۰۲۱) مشابه است (۱۶). با تحلیل نتایج، وضعیت بهینه‌ی میزان MMT در غشاء کامپوزیتی نانوالیاف PAN/MMT، ۲٪ محاسبه گردید که بدون ایجاد تفاوت معنی‌داری در میزان مقاومت تنفسی، سبب ارتقای کارایی فیلتراسیون ذرات ۰/۳

همچنین با توجه به اینکه مطابق دستورالعمل پیشگیری و کنترل عفونت در زمینه ی ویروس کرونا (Covid-19) در سال ۲۰۲۰، حداقل آستانه ی کارایی فیلتراسیون بایستی برای پالایش ذرات ۳ میکرون، ۷۰ درصد و آستانه ی ترجیحی آن برای پالایش ذرات ۰/۳ میکرون، ۵۰ درصد تعیین شده است، تمامی نانوالیاف PAN مورد آزمون، با این ضوابط منطبق هستند؛ ولی با توجه به نتایج این مطالعه، کارایی فیلتراسیون با اضافه کردن ۲٪ نانوذرات MMT به بالاترین میزان (۹۳/۱۲ درصد برای ذرات ۰/۳ میکرون) در میان فیلترهای مورد آزمون رسید (۴، ۲۴، ۲۵).

### نتیجه گیری

مطالعه ی حاضر، با هدف امکان سنجی ارتقای عملکرد فیلتر ماسکهای حفاظت تنفسی پالایش ذرات با به کارگیری غشاء کامپوزیتی نانوالیاف پلی اکریلونیتریل (PAN) و نانوذرات رس مونتموریلونیت (MMT) انجام شد. طبق یافته های حاصله، کارایی فیلتراسیون با اضافه کردن نانوذرات MMT به PAN و تشکیل PAN/MMT افزایش یافت؛ ولی درعین حال، میزان مقاومت تنفسی در مقادیر بیش از ۲٪ درصد MMT، افزایش معنی داری را نشان می دهد که این موضوع، کاربرد درصدهای بالاتر MMT را برای استفاده به عنوان فیلتر ماسک با محدودیت همراه می نماید.

اضافه کردن ۲٪ درصد MMT در ترکیب نانوکامپوزیت PAN/MMT و استفاده از آن به عنوان فیلتر ماسک، سبب کاهش قطر الیاف و بهینه شدن دانسیته ی فشردگی و تخلخل می گردد که در نتیجه، سبب ایجاد نفوذپذیری مناسب فیلتر در برابر گازهای تنفسی ضمن ایجاد موانعی در برابر عبور ذرات می شود که نتیجه ی آن افزایش کارایی فیلتراسیون ذرات خواهد بود.

در نهایت می توان نتیجه گیری کرد که در صورت اضافه کردن ۲٪ نانوذرات MMT به نانوالیاف PAN و استفاده از نانوالیاف کامپوزیتی به دست آمده در ساخت ماسکهای ذرات، ماسک حاصل بدون افزایش سختی تنفس برای

است. این در حالی است که نانوکامپوزیت های حاوی مقادیر بالاتر MMT که مطابق با تصاویر FESEM دارای دانسیته ی فشردگی بالاتر و تخلخل کمتری هستند، دارای میانگین مقاومت تنفسی بالاتری نیز می باشند. این موضوع، در تحقیقات گائو و همکاران (۲۰۱۳) و نیز وانگ و همکاران (۲۰۰۸) هم مشاهده گردید که هرچه در ترکیب یک فیلتر، قطر الیاف کوچک تر و دانسیته ی فشردگی بالاتر باشد، کارایی فیلتراسیون آن افزایش می یابد و از طرفی تخلخل بیشتر فیلتر، باعث کاهش فشار و مقاومت در برابر جریان عبوری از آن می گردد (۱۷، ۲۳). همچنین هرچه الیاف کوچک تر باشد، در مقایسه با الیاف بزرگ تر، کارایی فیلتراسیون بهتری را در افت فشار یکسان از خود نشان می دهد (۱۸).

مطابق با استاندارد BS EN ۱۴۳:۲۰۲۱، در صورتی که کارایی فیلتراسیون مدیای ماسک که با پارامتر "حداکثر نفوذپذیری فیلتر" در نتایج ذکر می گردد، برای جذب ذرات ۰/۲ تا ۲ میکرون با میانگین قطر ۰/۶ میکرون در گذر حجمی ۹۵ لیتر بر دقیقه، ۸۰، ۹۴ و یا ۹۹ درصد باشد، فیلتر به ترتیب در رده ی ۱P، ۲P و ۳P رتبه بندی می گردد. بر این اساس کارایی فیلتراسیون نانوالیاف PAN مورد آزمون برای ذرات ۰/۳، ۰/۵ و ۱ میکرون (تقریباً در محدوده استاندارد) با میانگین ۹۱/۲۸ که بر اساس این استاندارد در رده ۱P قرار می گرفت، با اضافه کردن ۲٪ نانوذرات MMT، به ۹۵/۷٪ افزایش یافته و به رده ی ۲P ارتقاء یافت (۷).

مطابق با استاندارد NIOSH CFR Part ۸۴، در صورتی که کارایی فیلتراسیون یک ماسک ساخته شده که با پارامتر "سطح کارایی فیلتر" از آن یاد می شود، برای جذب ذرات ۰/۳ میکرونی در گذر حجمی ۹۵ لیتر بر دقیقه، ۹۵، ۹۹ و یا ۱۰۰ درصد باشد، فیلتر به ترتیب در رده ی ۹۵ N، N۹۹ و N ۱۰۰ رتبه بندی می گردد. بر این اساس، کارایی فیلتراسیون نانوالیاف PAN مورد آزمون با اضافه کردن ۲٪ نانوذرات MMT با ارتقای ۴/۲ درصدی به ۹۳/۱۲ درصد ارتقاء یافت و به کمتر از ۲ درصدی رده ی ۹۵ N این استاندارد رسید (۱۹).



گروه مهندسی بهداشت حرفه‌ای دانشکده ی بهداشت دانشگاه علوم پزشکی تهران، به‌ویژه سرکار خانم دکتر صبا کلانتری به جهت همکاری در آزمون نانوفیلترها و نیز همکاری صمیمانه ی خانم دکتر نسیم غلام شهبازی، مدیریت عامل شرکت دانش‌بنیان نانوتارپاک به جهت همکاری در الکترورسی نانوفیلترهای آزمون و نیز تهیه ی تصاویر FESEM، قدردانی نمایند.

فرد استفاده‌کننده، با افزایش ۴/۲ درصدی در کارایی فیلتراسیون ذرات همراه خواهد بود که می‌تواند در شرایط آلودگی هوا سبب حفاظت بیشتر افراد استفاده‌کننده در برابر آلاینده‌های ذره‌ای گردد.

## تشکر و قدردانی

نویسندگان، بر خود لازم می‌دانند که از حمایت‌های

## REFERENCES

- World Health Organization. WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub>), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. 2021 [cited 2022]. Available from: <https://apps.who.int/iris/handle/10665/345329>.
- International Agency for Research on Cancer. IARC: Outdoor air pollution a leading environmental cause of cancer deaths. IARC Press Release. 2013 [cited 2022]. Available from: <https://www.iarc.who.int/news-events/iarc-outdoor-air-pollution-a-leading-environmental-cause-of-cancer-deaths/>.
- Cherrie JW, Apsley A, Cowie H, Steinle S, Mueller W, Lin Ch, et al. Effectiveness of face masks used to protect Beijing residents against particulate air pollution. *Occup Environ Med*. 2018;75(6):446-452.
- World Health Organization (WHO). Advice on the use of masks in the context of COVID-19. 2020 [cited 2022]. Available from: <https://apps.who.int/iris/handle/10665/331693>.
- Racz L, Yamamoto DP, Eninger RM. *Handbook of Respiratory Protection - Safeguarding against Current and Emerging Hazards*. 1st ed. Boca Raton: Taylor & Francis Group, LLC; 2018.
- Ming HC, Weiren C, Shermin SGK, Bing L, Jason YCL, Lu M, Suxi W, Kun X, Le Y, Enyi Y, Kangyi Z, et al. *Face Masks in the New COVID-19 Normal: Materials, Testing, and Perspectives*. Research (Wash D C). 2020;2020:1-40.
- British Standard Institute. BS EN 143:2021- Respiratory protective devices-Particle filters-Requirements, testing, marking. 2021.
- Fehr AF, Perlman S. Coronaviruses: An Overview of Their Replication and Pathogenesis. *Coronaviruses*. 2015;1282:1-23.
- Shi L, Zhuang X, Tao X, Cheng B, Kang W. Solution blowing nylon 6 nanofiber mats for air filtration. *Fibers and Polymers*. 2013;14(9):1485-1490.
- Zhu M, Han J, Wang F, Shao W, Xiong R, editors. *Electrospun Nanofibers Membranes for Effective Air Filtration*. *Macromol Mater Eng*. 2017;302(1):1-27.
- Graham K, et al. *Polymeric Nanofibers in Air Filtration Applications*. 15th Annual Technical Conference & Expo of the American Filtration and Separation Society, Galveston, Texas. 2002.
- Akgul Y, Polat Y, Canbay E, Demir A, Kilic A. Nanofibrous composite air filters. *Environmental Applications*. 2018:553-567.
- Leach MK, Feng ZQ, Tuck SJ, Corey JM. Electrospinning fundamentals: optimizing solution and apparatus parameters. *J Vis Exp*. 2011(47):2494.
- Uddin F. Clays, nanoclays, and montmorillonite minerals. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2008 ;39(12):2804-14.
- Gurses A. *Introduction to Polymer-Clay Nanocomposites*. 1st ed. Boca Raton: Taylor & Francis Group, LLC; 2016.
- Bansal P, Batra R, Yadav R, Purwar R. Electrospun polyacrylonitrile nanofibrous membranes supported with montmorillonite for efficient PM<sub>2.5</sub> filtration and adsorption of Cu (II) ions. *J Appl Polym Sci Symp*. 2022;139(5).

17. Agarwal S, Wendorff JH, Greiner A. Use of electrospinning technique for biomedical applications. *Polymer (Guildf)*. 2008;49(26):5063-5621.
18. Hinds WC, Zhu Y. *Aerosol Technology: Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particles*. 3rd Edition. New York: John Wiley & Sons; 2022.
19. NIOSH. NIOSH Guide to the Selection and Use of Particulate Respirators Certified under 42 CFR 84. DHHS (NIOSH) Publication No. 96-101. NIOSH, Cincinnati, OH; 1996 [cited 2017]. Available from: <https://www.cdc.gov/niosh/docs/96-101/default.html>.
20. Zhu M, Hua D, Pan H, Wang F, Manshian B, Soenen SJ, et al. Green electrospun and crosslinked poly (vinyl alcohol)/poly(acrylic acid) composite membranes for antibacterial effective air filtration. *J Colloid Interface Sci*. 2018;511:411-423.
21. Dehghan SF, Golbabaei F, Maddah B, Latifi M, Pezeshk H, Hasanzadeh M, et al. Optimization of electrospinning parameters for polyacrylonitrile-MgO nanofibers applied in air filtration. *J Air Waste Manage Assoc*. 2016;66(9):912-921.
22. Paul DR, Robeson LM. Polymer nanotechnology, nanocomposites. *Polymer (Guildf)*. 2008;49(15):3187-3204.
23. Li J, Gao F, Liu L, Zhang Z. Needleless electro-spun nanofibers used for filtration of small particles. *Express Polym Lett*. 2013;7(8):683-689.
24. Dugdale CM, Walensky RP. Filtration efficiency, effectiveness, and availability of N95 face masks for COVID-19 prevention. *JAMA Intern Med*. 2020;180(12):1612-1613.
25. World Health Organization (WHO). Infection prevention and control in the context of coronavirus disease (COVID-19): A living guideline. 2022 [cited 2022]. Available from: [https://www.who.int/publications/i/item/infection-prevention-and-control-in-the-context-of-coronavirus-disease-\(covid-19\)-a-living-guideline](https://www.who.int/publications/i/item/infection-prevention-and-control-in-the-context-of-coronavirus-disease-(covid-19)-a-living-guideline).