

## بررسی میزان جذب ذرات معلق کوچک تر از ۲/۵ میکرون توسط فیلترهای خودرو و بهبود کیفیت جذب این فیلترها با استفاده از نانوالیاف پلیمری و کامپوزیتی

محمد حسن امینی<sup>\*۱</sup>

[hassanamini4@gmail.com](mailto:hassanamini4@gmail.com)

میترا محمدزاده آهنی<sup>۲</sup>

تاریخ پذیرش: ۹۹/۱۰/۱۵

تاریخ دریافت: ۹۸/۱۲/۳

### چکیده

زمینه و هدف: ذرات معلق یکی از آلاینده‌های اصلی هوا مخصوصاً در کشورهای در حال توسعه می‌باشند. بخشی از این ذرات به دلیل قطر کوچک خود، توسط بدن جذب شده و در نهایت وارد سیستم گردش خون انسان یا سیستم تنفسی می‌شوند. از آن جا که سوخت ناقص موتور خودروها منبع اصلی تولید ذرات معلق است، سرنشینان خودرو به‌ویژه در ترافیک شهرهای بزرگ در معرض این آلودگی قرار دارند. از این رو، مطالعه حاضر با هدف ارزیابی فیلترهای تجاری موجود در انواع خودروها به لحاظ میزان جذب ذرات معلق کوچک تر از ۲/۵ میکرون ( $PM_{2.5}$ ) انجام گرفت و در ادامه جهت بهبود قابلیت حذف ذرات معلق توسط این فیلترها از نانوالیاف پلی‌آکریلونیتریل و کامپوزیت آن با نانوکیتوزان استفاده شد.

روش بررسی: ابتدا سیستمی برای اندازه‌گیری کارایی جذب  $PM_{2.5}$  و افت فشار فیلترها در آزمایشگاه طراحی و ساخته شد. سپس شش نمونه از انواع فیلترهای تجاری هوای کابین و موتور خودروهای داخلی و خارجی تهیه شده و جذب آن‌ها اندازه‌گیری شد. در ادامه فیلترهایی از جنس نانوالیاف پلیمری و کامپوزیتی به عنوان جاذب ساخته شده و کارایی آن‌ها بررسی گردید و در نهایت نتایج مورد مقایسه قرار گرفت.

یافته‌ها: برای فیلترهای تجاری موتور خودرو جذب برابر با صفر و جذب فیلترهای کابین در گستره ۵-۸/۳۳٪ به دست آمد. جذب ذرات معلق توسط فیلتر نانو الیاف پلی‌آکریلونیتریل و فیلتر نانوالیاف کامپوزیتی پلی‌آکریلونیتریل با نانوکیتوزان به ترتیب ۹۷ و ۹۵ درصد اندازه‌گیری شد.

بحث و نتیجه‌گیری: با توجه به این‌که فیلتر خودروهای بررسی شده در این پژوهش قابلیت حذف  $PM_{2.5}$  را نداشتند، از فیلترهای نانویی استفاده شد. نتایج نشان داد که فیلترهای نانو الیاف پلی‌آکریلونیتریل توانایی حذف ۹۷-۹۵٪ از  $PM_{2.5}$  را دارند و بنابراین می‌توان با

۱- استادیار، پژوهشگاه شیمی و مهندسی شیمی ایران، پژوهشکده فناوری‌های پاک، تهران، ایران. \* (مسئول مکاتبات)

۲- کارشناس ارشد شیمی آلی، پژوهشگاه شیمی و مهندسی شیمی ایران، پژوهشکده فناوری‌های پاک، تهران، ایران.

افزودن یک لایه نانو الیاف معرفی شده در این پژوهش به فیلترهای خودرو مخصوصاً فیلتر کابین، کارآیی حذف را افزایش داد و بدین ترتیب هوای پاک‌تری برای سرنشینان خودرو تأمین نمود.

**واژه های کلیدی:** حذف ذرات معلق، فیلتر هوای کابین خودرو، فیلتر هوای موتور خودرو، نانوکیتوزان، پلی‌آکریلونیتریل.

# **Investigation of PM<sub>2.5</sub> Adsorption on Car Filters and Improvement of Their Adsorption Quality Using Polymeric and Composite Nanofibers**

**Mohammad Hassan Amini<sup>1\*</sup>**

[hassanamini4@gmail.com](mailto:hassanamini4@gmail.com)

**Mitra Mohammadzadeh Ahani<sup>2</sup>**

Admission Date: January 4, 2021

Date Received: February 22, 2020

## **Abstract**

**Background and Objective:** Particulate matter is one of the main air pollutants, especially in developing countries. Due to their small diameter, some of these particles are absorbed by the body and eventually entered the human circulatory or respiratory system. Since incomplete combustion of fuels are the main source of particulate matter, car occupants are particularly exposed to this pollution, especially in large city traffic. Therefore, the present study was conducted to evaluate the commercial filters in various vehicles in terms of the absorption of particulate matter less than 2.5 microns (PM<sub>2.5</sub>). Then polyacrylonitrile nanofiber and its composite with nano-chitosan were used to improve the ability to remove suspended particles by these filters .

**Material and Methodology:** First, a system was designed and built in the laboratory to measure the adsorption efficiency of PM<sub>2.5</sub> and the pressure drop of filters. Then, six samples of various commercial cabin air filters and engine air filters were prepared and their PM<sub>2.5</sub> adsorption was measured. The polymeric and composite nanofiber filters were made and their efficiency was investigated and finally, the results were compared.

**Findings:** For commercial engine air filters, the PM<sub>2.5</sub> adsorption was equal to zero and the absorption by cabin air filters was measured in the range of 5-8.33%. The adsorption was measured respectively 97 and 95% by polyacrylonitrile nanofiber and polyacrylonitrile composite nanofiber filter with nanochitosan .

**Discussion and Conclusion:** This study showed that the car filters were not able to remove PM<sub>2.5</sub> but the polyacrylonitrile nanofiber filters were able to remove 95-97% of PM<sub>2.5</sub>. Therefore, by adding a layer of Nano-fiber introduced in this study to car filters, especially cabin filters, the PM<sub>2.5</sub> removal efficiency can be improved, thus clean air is provided for car occupants.

**Keywords:** Particulate matter adsorption, Car engine air filter, Car cabin air filter, nanochitosan, polyacrylonitrile

---

1- Assistant Professor, Chemistry and Chemical Engineering Research Center of Iran, Institute of Clean Technologies, Tehran, Iran. *\*(Corresponding Author)*

2- MSc Organic Chemistry, Chemistry and Chemical Engineering Research Center of Iran, Institute of Clean Technologies, Tehran, Iran

## مقدمه

موتور اتومبیل به ازای هر لیتر سوخت از هزار لیتر هوا استفاده می‌نماید. عملکرد نامناسب فیلتر هوای ماشین فرایند احتراق بنزین را تحت تاثیر قرار می‌دهد و در صورت عدم تعویض به موقع آن مشکلاتی نظیر افزایش مصرف سوخت را به دنبال دارد. فیلتر هوا، علاوه بر موتور خودرو در کابین خودرو نیز کاربرد دارد و هوای ورودی کابین خودرو را تصفیه می‌نماید بنابراین به بهبود کیفیت هوای داخل خودرو از هرگونه آلاینده‌گی و ناپاکی کمک می‌نماید. بیش‌تر فیلترهای هوای موجود از الیاف سلولزی پلیسه‌دار ساخته شده است. بعضی از آن‌ها ترکیبی از پنبه و کاغذ هستند. بعضی از آن‌ها هم به شکل فیلتر پنبه‌ای در کارتریج قرار دارند. هوای ورودی به کابین خودرو از طریق سیستم تهویه مطبوع توسط این قطعه فیلتر شده و از ورود ذرات گرد و غبار و سایر محرک‌های تنفسی به داخل کابین جلوگیری نموده و باعث می‌شود که حداکثر میزان هوای تمیز با کم‌ترین آلودگی و صدا از دریچه‌های ورودی داشبورد وارد کابین گردد (۱۸).

احتراق ناشی از موتورهای دیزلی حاوی دو آلاینده سمی و خطرناک ذرات معلق و اکسیدهای نیتروژن است که هر دو آلاینده مطابق گزارش‌های پایش هوای محیطی، از آلاینده‌های مهم و اصلی همه شهرهای کشور محسوب می‌شوند (۱۹). در این میان ذرات معلق به عنوان آلاینده شاخص و مهم‌ترین عامل بیماری‌های قلبی و عروقی تلقی می‌شود (۲۰). بهترین راهکار جهت کنترل ذرات معلق استفاده از خودروهای دیزلی دارای جاذب دوده (Diesel Particulate Filter) است. این تکنولوژی می‌تواند تا ۹۹٪ ذرات معلق خروجی از موتور را به دام بیندازد. البته وجود ناوگان با سطح استاندارد آلودگی پایین و قدیمی (یورو ۴ و پایین‌تر) و نیاز به صرف هزینه بالا جهت نوسازی ناوگان یا تجهیز آن به فیلتر جاذب دوده این راه را بسیار زمان‌بر و پر هزینه می‌نماید (۲۱). بنابراین با توجه به وجود ترافیک‌های سنگین در شهرهای بزرگ و غلظت بالای ذرات معلق، راهکار دیگر، حذف ذرات معلق است. ایده استفاده از فیلتر کابین خودرو که توانایی جذب ذرات معلق کم‌تر از  $2.5 \mu\text{m}$  را داشته باشد، می‌تواند راهکار مناسبی برای تامین هوای

آلودگی هوا، ناشی از مقادیر زیاد آلاینده‌های ایجاد شده از طریق فعالیت‌های انسانی نظیر ترافیک، صنایع و نیروگاه‌ها به یکی از نگرانی‌های اصلی زیست محیطی تبدیل شده است. ذرات معلق مخلوط پیچیده‌ای از ذرات کوچک و قطرات مایع و حاوی مواد معدنی (مانند سیلیکات‌ها، سولفات‌ها و نیترات‌ها) و مواد آلی (مانند کربن آلی و عنصر کربن) می‌باشند (۱، ۲). ذرات معلق اثرات شدیدی بر محیط زیست دارد که شامل افت کیفیت هوا، کاهش قدرت دید، اثرات اقلیمی و واداشت تابش (forcing radiative) می‌شود (۳-۸). مخصوصاً ذرات معلق کوچک‌تر از  $2.5 \mu\text{m}$  ( $\text{PM}_{2.5}$ ) که اثرات جدی بر سلامتی انسان دارد چرا که به دلیل اندازه کوچک می‌توانند به درون شش‌ها و نایژه‌ها نفوذ کرده و ترکیبات سمی را با خود حمل نمایند. مطالعات اپیدمیولوژیک متعددی نشان داده است که قرار گرفتن در معرض  $\text{PM}_{2.5}$  در دراز مدت می‌تواند منجر به بیماری‌های تنفسی، قلبی و عروقی شده و حتی به سرطان ریه و مرگ بینجامد (۹-۱۶).

طبق گزارش سالانه شرکت کنترل کیفیت هوا تهران و بررسی آلاینده‌های هوا، ۷۵٪ از روزهای آلوده در سال ۱۳۹۷ در این کلان شهر، مربوط به آلاینده  $\text{PM}_{2.5}$  بوده است. بنابراین کنترل و جذب ذرات معلق مخصوصاً  $\text{PM}_{2.5}$  چالش مهمی برای محققان این حوزه است. برای نشان دادن کیفیت هوا از پارامتری به نام شاخص کیفیت هوا (Air Quality Index) استفاده می‌شود که بر اساس غلظت تمام آلاینده‌های هوا تعیین می‌شود. در شاخص بالای ۳۰۰، کیفیت هوا، به صورت خطرناک تعریف می‌شود. به طور مثال در این شاخص غلظت ذرات معلق کوچک‌تر از  $2.5 \mu\text{m}$  ( $\text{PM}_{2.5}$ ) برابر بر  $250 \mu\text{g}/\text{m}^3$  و غلظت ذرات معلق کوچک‌تر از  $10 \mu\text{m}$  ( $\text{PM}_{10}$ ) برابر با  $425 \mu\text{g}/\text{m}^3$  تعریف می‌گردد (۱۷).

فیلتر هوا از تجهیزات لازم و ضروری در خودرو است. فیلتر هوا معمولاً به دو صورت در خودروها استفاده می‌شود که شامل فیلتر هوای موتور و فیلتر هوای کابین می‌باشد. فیلتر هوا با جذب ذرات موجود در هوا مانع ورود گرد و غبار و ذرات آلوده به داخل موتور و کابین اتومبیل می‌شود. در حالت طبیعی،

بررسی و کارایی آن‌ها اندازه‌گیری شد. در ادامه فیلترهایی از جنس نانوالیاف پلیمری به عنوان جاذب  $PM_{2.5}$  به روش الکتروریسی ساخته شده و کارایی آن‌ها بررسی گردید و در نهایت نتایج مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت.

### روش بررسی

مواد و تجهیزات:

پلی‌آکریلونیتریل با جرم مولکولی  $10^5 \text{ g/mol}$  و  $1/5$  و حلال دی‌متیل فرمامید از شرکت مرک آلمان تهیه شد. نانوکیتوزان از شرکت نانو نوین پلیمر خریداری شد و فیلترهای خودروهای ۲۰۶ ساخت شرکت سرکان، سوناتا ساخت شرکت *onnuri* و خودرو جک ساخت شرکت *genuine* تهیه شد.

از دستگاه شمارنده ذرات معلق جهت اندازه‌گیری  $PM_{2.5}$  مدل (TES5321) ساخت شرکت TES تایوان، دستگاه اندازه‌گیری اختلاف فشار مدل (GM520) ساخت شرکت *Benetech*، موتور پمپ هوا مدل (MAP1704) خریداری شده از آوا الکترونیک با دور متغیر جهت تنظیم هوای ورودی و فلومتر مدل (Optiflow 520) ساخت شرکت (humonics) در این پژوهش استفاده شد.

### ساخت بسترهای نانو الیاف

محلول ۱۲ درصد وزنی پلیمر پلی‌آکریلونیتریل از انحلال مقدار معینی از پلیمر در حلال دی‌متیل فرمامید، با استفاده از همزن مغناطیسی (stirrer) در دمای اتاق در مدت ۴ ساعت، تهیه شد.

جهت ساخت محلول‌های نانوکامپوزیت حاوی پلی‌آکریلونیتریل ۱۲ درصد و نانوکیتوزان ۰/۲ یا ۰/۵ درصد، ابتدا وزن معینی از نانوکیتوزان در حلال دی‌متیل فرمامید حل شد و به مدت ۲ ساعت در حمام فراصوت (ultrasonic bath) قرار داده شد و سپس به آرامی پودر پلی‌آکریلونیتریل به آن اضافه شد و با همزن مغناطیسی به مدت ۱ ساعت همزده شد. مجدداً ۱ ساعت در حمام فراصوت قرار داده شد و سپس این محلول برای انجام الکتروریسی ارسال شد.

ساخت نانوالیاف پلی‌آکریلونیتریل و نانوالیاف کامپوزیت نانوکیتوزان با پلی‌آکریلونیتریل با استفاده از روش الکتروریسی

سالم برای سرنشینان خودرو مخصوصاً در ترافیک‌های طولانی شهرهای بزرگ محسوب شود.

مهم‌ترین پارامترها در کارایی فیلترها افت فشار در دو طرف فیلتر و توانایی آن در جذب آلاینده مورد نظر است. فیلترهای هوای موجود، معمولاً به دو شکل وجود دارند، یکی از آن‌ها فیلترهای غشائی متخلخل می‌باشد که فیلتراسیون را بر اساس اندازه آلاینده‌ها انجام می‌دهد و دیگری فیلترهای هوای حاوی الیاف فشرده با قطرهای متفاوت است. در هر دو نوع فیلتر، افت فشار و کارایی پایین جذب  $PM_{2.5}$  از مشکلات عمده محسوب می‌شوند (۲۲). اخیراً جهت رفع مشکل افت فشار و جذب ضعیف  $PM_{2.5}$  در ساخت فیلترهای هوا از نانو لوله‌های کربنی (۲۳) و نانوالیاف پلیمری (۲۴) استفاده شده است. نانوالیاف به دلیل مساحت سطح بالا و ساختار بسیار متخلخل توانایی تقویت کارایی جذب و افت فشار کم را طی فیلتراسیون دارند. همچنین ساخت نانوالیاف با روش‌های مختلف از جمله الکتروریسی به خوبی توسعه یافته و در دسترس هستند، به طوری که در این روش از پلیمرهای مختلف با جرم مولکولی بالا مثل پلی‌آکریلونیتریل یا کامپوزیت آن‌ها با ترکیبات آلی و معدنی و پلیمرهای طبیعی مثل پروتئین‌ها و کیتوزان جهت تهیه نانوالیاف استفاده می‌شود (۲۵، ۲۶). نانوکیتوزان یک پلی‌ساکارید طبیعی زیست سازگار مشتق شده از گلوکان با واحدهای تکرار شونده کیتین است و به عنوان فراوان‌ترین آمینوپولی‌ساکارید در طبیعت، دارای خصوصیتی از جمله سازگاری زیستی بالا، سمیت پایین، زیست تخریب‌پذیری و خواص ضد میکروبی قابل قبول است. این ویژگی‌های منحصر به فرد، موجب شد توجه زیادی را به طرف خود معطوف کند. با کاهش اندازه ذرات کیتوزان تا ابعاد نانو، ویژگی‌های بهتری نظیر افزایش توانایی جذب، پوشش و قابلیت پیوند که نتیجه‌ی افزایش سطح تماس ذرات است حاصل می‌شود (۲۷).

در این پژوهش ابتدا سیستمی بر اساس مدارک علمی معتبر برای اندازه‌گیری کارایی جذب  $PM_{2.5}$  و افت فشار در آزمایشگاه طراحی و ساخته شد. سپس چند نمونه تجارتي از انواع فیلترهای هوای بدنه و موتور خودروهای داخلی و خارجی

انجام شد. برای انجام این کار از دستگاه الکترورسی موجود در آزمایشگاه دانشکده مهندسی نساجی دانشگاه امیرکبیر استفاده شد. شرایط کار دستگاه الکترورسی بدین ترتیب بود که محلول ریسندهی در سرنگ ۱ mL با قطر خارجی ۰/۷ mm قرار داده شد. ولتاژ ۱۵ kV بین نازل و درام جمع‌کننده اعمال شد. نرخ تغذیه محلول ریسندهی ۱/۵ mL/h تنظیم شد. فاصله ریسندهی (فاصله بین نازل و درام جمع‌کننده) ۱۳cm تنظیم شد.

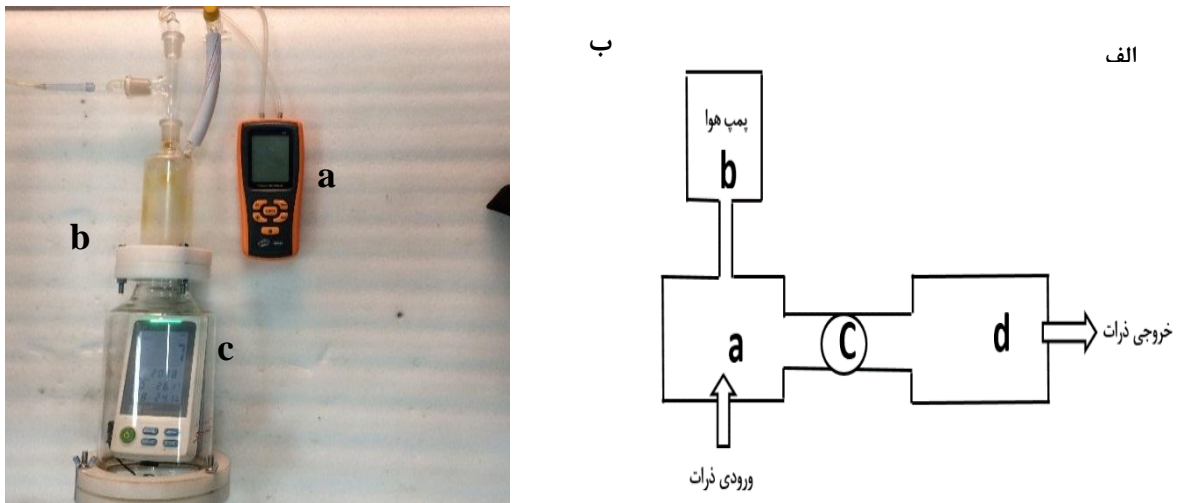
**طراحی سیستم تست و اجزای آن**

شکل ۱- الف اجزای سیستم تست مورد استفاده را به صورت شماتیک نشان می‌دهد. این سیستم از چهار قسمت تشکیل شده است که شامل: (a) بخش مولد ذرات معلق: در این پژوهش از عود به عنوان مولد ذرات معلق استفاده شد. دود عود به دلیل این که شامل ذرات معلق با اندازه‌های متفاوت و بسیاری از آلاینده‌های موجود در هوای آلوده شهرها مثل CO، CO<sub>2</sub>، NO<sub>2</sub> و SO<sub>2</sub> VOCs شامل بنزن، تولوئن، زایلن، آلدئیدها و ترکیبات آروماتیک چند حلقوی و ترکیبات دیگر است، انتخاب مناسبی برای تولید شرایط هوای آلوده است (۲۸). ذرات معلق تولید شده در این بخش توسط یک فن هوا به گردش در می‌آید تا رقیق شده و غلظت آن یکنواخت گردد. با تنظیم مقدار دود عود ورودی به این بخش، غلظت ذرات معلق به شاخص بالای ۳۰۰ (index>300) که برابر با غلظت بیش‌تر از ۳۰۰ μg/m<sup>3</sup> است، تنظیم شد در شکل ۲ طرح شماتیک بخش مولد ذرات معلق نشان داده شده است. پس از تنظیم غلظت، سیستم آماده قرار دادن فیلتر است. (b) این قسمت شامل سیستم جریان انتقال ذرات معلق تولید شده توسط باد، برای عبور از میان فیلترهای مورد مطالعه است که توسط یک پمپ باد کوچک با دور متغیر که دبی هوای عبوری را ۰/۲ m/s تنظیم می‌کند انجام می‌شود. (c) محل قرار گرفتن فیلتر که در میان دو فلنج از جنس تفلن می‌باشد که با پیچ و مهره سفت می‌گردد و (d) محل قرارگیری دستگاه اندازه‌گیری غلظت ذرات و افت فشار است. اختلاف فشار بین دو طرف فیلتر اندازه‌گیری می‌شود. شکل ۱-ب تصویر واقعی سیستم به کار رفته در این پژوهش را نمایش می‌دهد.

شکل ۱- الف اجزای سیستم تست مورد استفاده را به صورت شماتیک نشان می‌دهد. این سیستم از چهار قسمت تشکیل شده است که شامل: (a) بخش مولد ذرات معلق: در این پژوهش از عود به عنوان مولد ذرات معلق استفاده شد. دود عود به دلیل این که شامل ذرات معلق با اندازه‌های متفاوت و بسیاری از آلاینده‌های موجود در هوای آلوده شهرها مثل CO، CO<sub>2</sub>، NO<sub>2</sub> و SO<sub>2</sub> VOCs شامل بنزن، تولوئن، زایلن، آلدئیدها و ترکیبات آروماتیک چند حلقوی و ترکیبات دیگر است، انتخاب مناسبی برای انجام این کار از دستگاه الکترورسی موجود در آزمایشگاه دانشکده مهندسی نساجی دانشگاه امیرکبیر استفاده شد. شرایط کار دستگاه الکترورسی بدین ترتیب بود که محلول ریسندهی در سرنگ ۱ mL با قطر خارجی ۰/۷ mm قرار داده شد. ولتاژ ۱۵ kV بین نازل و درام جمع‌کننده اعمال شد. نرخ تغذیه محلول ریسندهی ۱/۵ mL/h تنظیم شد. فاصله ریسندهی (فاصله بین نازل و درام جمع‌کننده) ۱۳cm تنظیم شد.

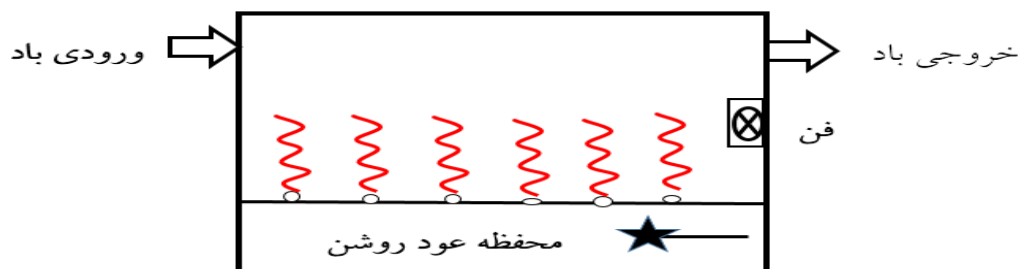
### طراحی سیستم تست و اجزای آن

شکل ۱- الف اجزای سیستم تست مورد استفاده را به صورت شماتیک نشان می‌دهد. این سیستم از چهار قسمت تشکیل شده است که شامل: (a) بخش مولد ذرات معلق: در این پژوهش از عود به عنوان مولد ذرات معلق استفاده شد. دود عود به دلیل این که شامل ذرات معلق با اندازه‌های متفاوت و بسیاری از آلاینده‌های موجود در هوای آلوده شهرها مثل CO، CO<sub>2</sub>، NO<sub>2</sub> و SO<sub>2</sub> VOCs شامل بنزن، تولوئن، زایلن، آلدئیدها و ترکیبات آروماتیک چند حلقوی و ترکیبات دیگر است، انتخاب مناسبی برای انجام این کار از دستگاه الکترورسی موجود در آزمایشگاه دانشکده مهندسی نساجی دانشگاه امیرکبیر استفاده شد. شرایط کار دستگاه الکترورسی بدین ترتیب بود که محلول ریسندهی در سرنگ ۱ mL با قطر خارجی ۰/۷ mm قرار داده شد. ولتاژ ۱۵ kV بین نازل و درام جمع‌کننده اعمال شد. نرخ تغذیه محلول ریسندهی ۱/۵ mL/h تنظیم شد. فاصله ریسندهی (فاصله بین نازل و درام جمع‌کننده) ۱۳cm تنظیم شد.



شکل ۱- الف) طرح شماتیک سیستم تست و اجزای آن ب) تصویر واقعی سیستم تست طراحی شده در این پژوهش (a) دستگاه اندازه گیری افت فشار (b) محل قرار گرفتن فیلتر (c) دستگاه اندازه گیری ذرات معلق

Figure 1. a) Schematic diagram of the test system and its components b) Real image of the test system designed in this study c) A particle counter device



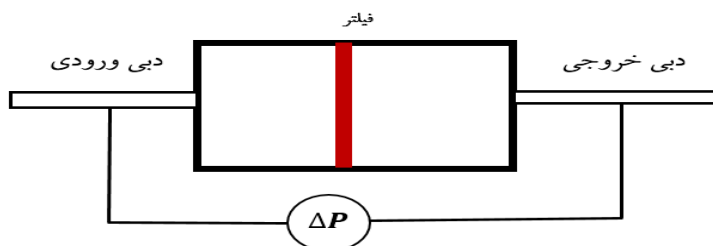
شکل ۲- طرح شماتیک بخش مولد ذرات معلق

Figure 2. Schematic diagram of a particulate matter generator section

#### شرح آزمایش‌ها و محاسبه راندمان حذف

به حدود  $0.2 \text{ m/s}$ ، غلظت ذرات معلق خروجی از این بخش بر روی  $300 \mu\text{g}/\text{m}^3$  تنظیم و همزمان غلظت  $\text{PM}_{2.5}$  توسط دستگاه شمارنده غلظت  $\text{PM}_{2.5}$  ثبت می‌شود.

نحوه انجام آزمایش‌ها بدین صورت بود که ابتدا عود روشن شده و در سیستم تست قرار گرفت. با چرخش فن در بخش a شکل ۱- الف غلظت آن یکنواخت شده و با تنظیم دور پمپ باد



شکل ۳- طرح شماتیک اندازه‌گیری افت فشار

Figure 3. Schematic diagram of pressure drop measurement

مسطح به روش الکترورسی از محلول پلی‌آکریلونیتریل، گزارش شده در بالا تهیه شد و بررسی شد. این دو به ترتیب در مدت زمان ۴۰ و ۹۰ دقیقه الکترورسی شده اند و تفاوت آن‌ها در ضخامت فیلتر نانو الیاف بوده و با شناسه PAN40 و PAN90 معرفی شده‌اند. همچنین دو نمونه فیلتر نانوالیاف از کامپوزیت نانوکیتوزان و پلی‌آکریلونیتریل تهیه شده و با نام‌های PAN/NC 0.5% و PAN/NC 0.2% در این تحقیق مورد مطالعه قرار گرفت و تفاوت آن‌ها در درصد وزنی نانو کیتوزان موجود در نانوالیاف پلی‌آکریلونیتریل می‌باشد. این چهار نمونه ساخته شده، بین دو لایه منسوج نفاخته از جنس پلی‌پروپیلن به‌عنوان نگه‌دارنده قرار گرفته و سپس به اندازه مورد نظر برش داده شد به‌طوری که به‌صورت کامل محل قرار دادن فیلتر را بپوشاند.

#### یافته‌ها

میزان جذب  $PM_{2.5}$  توسط سیستم طراحی شده در آزمایشگاه بر روی نمونه‌های سنتز شده و تجاری جمع‌آوری شده از بازار، مورد بررسی قرار گرفت. در شکل ۴ نمودار ستونی غلظت  $PM_{2.5}$  در طی ۱۰ دقیقه عبور دود از سیستم تست شکل ۱- الف برای شش نمونه فیلتر بدنه و موتور خودروها نشان داده شده است. غلظت  $PM_{2.5}$  ورودی  $300 \mu g/m^3$  تنظیم شد و غلظت در زمان‌های ۱ الی ۱۰ دقیقه پس از عبور دود از میان فیلتر مورد نظر ثبت شد. در جدول ۱ اختلاف فشار ایجاد شده بین دو طرف فیلترها در طی عبور دود از میان آن‌ها، فاکتور کیفیت و کارایی جذب پس از عبور دود به مدت ۱۰ دقیقه محاسبه شده و برای هر فیلتر نشان داده شده است.

پس از آن که غلظت  $PM_{2.5}$  در خروجی بخش a به غلظت مورد نظر رسید، فیلتر مورد مطالعه در سیستم قرار داده شد و در زمان‌های مختلف از ۱ تا ۱۰ دقیقه، پس از قرار گرفتن فیلتر، غلظت  $PM_{2.5}$  خوانده شد. همزمان افت فشار بین دو طرف فیلتر توسط دستگاه اندازه‌گیری افت فشار قرائت شد. در شکل ۳ طرح شماتیک اندازه‌گیری افت فشار نشان داده شده است. دو پارامتر مهم در ارزیابی فیلترها وجود دارد. کارایی فیلتر در جذب آلاینده مورد نظر و مقدار افت فشار در اثر عبور هوا که به معنی مقدار مقاومت فیلتر در اثر عبور جریان هوا است. در بررسی کارایی نهایی فیلتر هر دو پارامتر کارایی جذب و افت فشار با هم لحاظ می‌گردد و با فاکتور کیفیت (Quality factor) نشان داده می‌شود و به‌صورت فرمول ۱ محاسبه می‌گردد (۲۹).

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

که در آن E کارایی جذب  $PM_{2.5}$  است که درصد آن با فرمول ۲ محاسبه می‌گردد (۳۰).

فرمول (۲)

$$E = \frac{\text{غلظت ذرات خروجی} - \text{غلظت ذرات ورودی}}{\text{غلظت ذرات ورودی}} * 100 \quad (2)$$

و  $\Delta P$  افت فشار در دو طرف فیلتر است که با دستگاه اندازه‌گیری اختلاف فشار در دو طرف فیلتر تعیین می‌گردد.

#### نمونه‌های مورد مطالعه:

شش عدد نمونه مختلف فیلتر هوای کابین و موتور سه نوع خودرومی موجود در بازار ایران تهیه شد و با تیغ سطح معینی از آن‌ها برش داده شد به‌طوری که به‌صورت کامل محل قرار دادن فیلتر را بپوشاند. دو عدد فیلتر نانوالیاف به‌صورت صفحات



جدول ۱- خلاصه عملکرد فیلترهای خودرو پس از ۱۰ دقیقه

Table 1. The performance of car filters after 10 minutes

$\Delta P$ (Pa)	E(%)	QF ( $\text{Pa}^{-1}$ )	نمونه
۱۰	۰	۰	فیلتر موتور ۲۰۶
۱۰	۸/۳۳	۰/۰۰۸۷	فیلتر کابین ۲۰۶
۱۰	۰	۰	فیلتر موتور جک
۱۰	۶/۶۶	۰/۰۰۶۹	فیلتر کابین جک
۱۰	۰	۰	فیلتر موتور سوناتا
۱۰	۵/۰۰	۰/۰۰۵۱	فیلتر کابین سوناتا

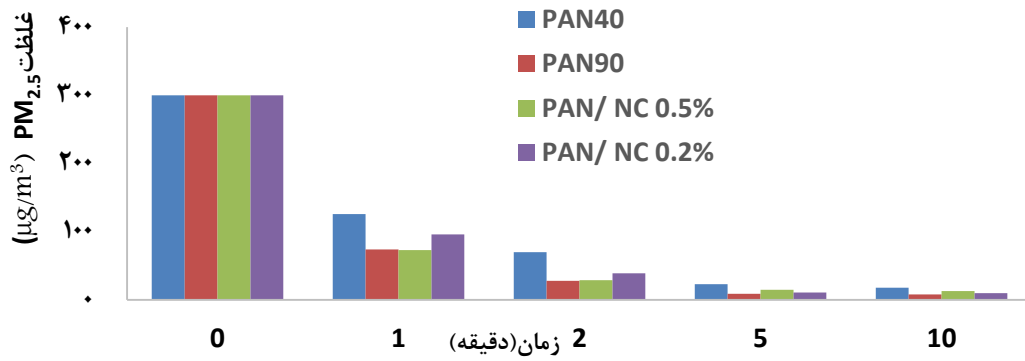


شکل ۴- نمودار غلظت بر حسب زمان برای فیلترهای خودرو

Figure 4. Concentration plot versus time for car filters

پس از عبور دود از میان فیلتر مورد نظر ثبت شد. در جدول ۲ اختلاف فشار ایجاد شده بین دو طرف فیلترها و فاکتور کیفیت و کارایی جذب، محاسبه شده و برای هر فیلتر نشان داده شده است.

در شکل ۵ نمودار ستونی غلظت  $\text{PM}_{2.5}$  در طی ۱۰ دقیقه عبور دود از سیستم تست شکل ۱-الف برای چهار نمونه فیلتر نانو الیاف پلیمری و کامپوزیتی الکترورسی شده در این پژوهش نشان داده شده است. غلظت  $\text{PM}_{2.5}$  ورودی  $300 \mu\text{g}/\text{m}^3$  تنظیم شد و غلظت در زمان های ۱ الی ۱۰ دقیقه



شکل ۵- نمودار غلظت بر حسب زمان برای فیلترهای سنتز شده

Figure 5. Concentration plot versus time for synthesized filters

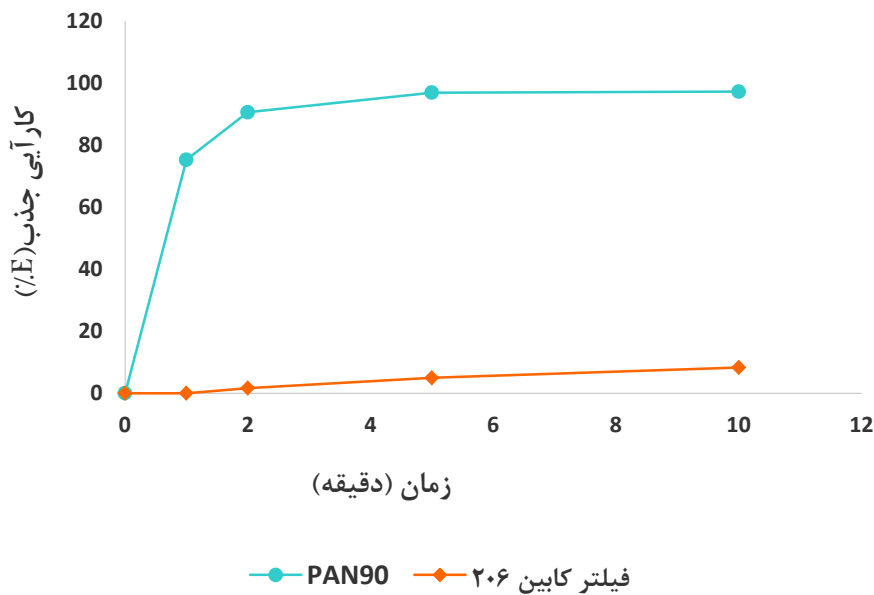
جدول ۲- خلاصه عملکرد فیلترهای نانو الیاف

Table 2. The performance of nanofiber filters

ΔP	E(%)	QF	نمونه
۹۰	۹۴/۰۰	۰/۰۳۱۳	PAN40
۱۰۰	۹۷/۳۳	۰/۰۳۶۲	PAN90
۱۳۱۰	۹۵/۰۰	۰/۰۰۲۳	PAN/NC 0.5%
۱۰۰	۹۶/۶۶	۰/۰۳۴۰	PAN/NC 0.2%

در شکل ۶ کارایی جذب نمونه فیلتر تجاری با نمونه ساخته

شده در این پژوهش بررسی شده است.

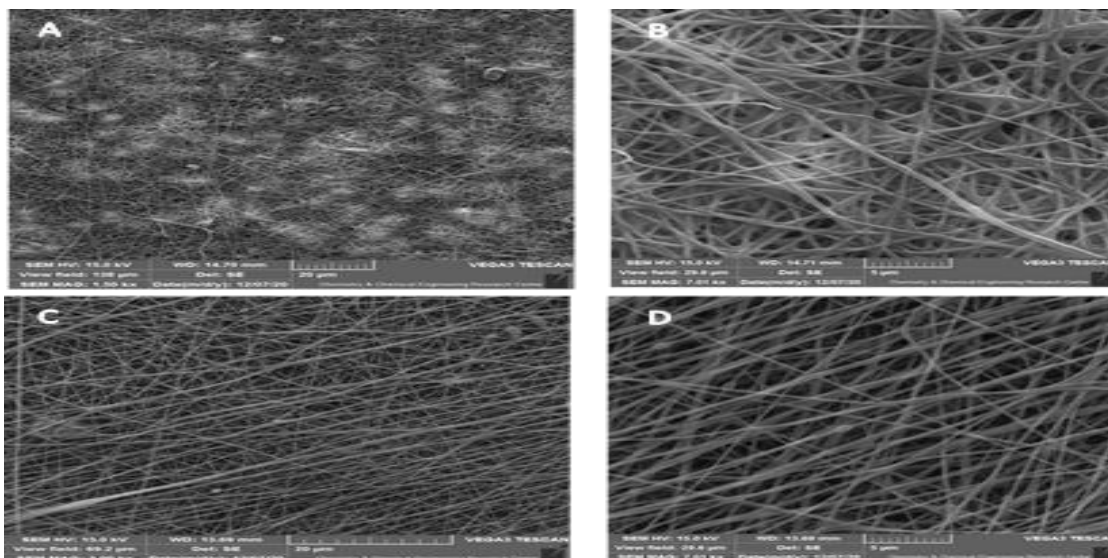


شکل ۶ - نمودار کارایی جذب بر حسب زمان برای مقایسه فیلتر کابین خودرو ۲۰۶ و نانو الیاف PAN90

Figure 6. Plot of adsorption efficiency over time to compare 206 car cabin filters and PAN90 nanofibers

0.2% با بزرگنمایی‌های مختلف نشان داده شده است. ساختار شبکه‌ای از نانو الیاف در هر دو نمونه به وضوح قابل مشاهده می‌باشد.

میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) برای بررسی ساختار مورفولوژی نانوفیلترها مورد استفاده قرار گرفت. در شکل ۷ SEM نمونه نانوالیاف PAN90 و نانوالیاف PAN/NC



شکل ۷- A و B تصویر SEM نمونه PAN90 و C و D تصویر SEM نمونه PAN/NC 0.2% با بزرگنمایی متفاوت می‌باشد

Figure 7. A and B SEM images of PAN90 sample and C and D images of PAN/NC 0.2% sample with different magnification

نشان می‌دهد که غلظت  $PM_{2.5}$  در فیلترهای نانو الیاف پس از مدت زمان کوتاهی از عبور دود در حد ۱۰ دقیقه به کمترین میزان خود می‌رسند. در جدول ۲ فشار در دو طرف فیلترها گزارش شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود افت فشار در نانو الیاف پلی آکریلونیتریل با افزایش زمان الکترورسی در PAN90 نسبت به PAN40 باعث افزایش افت فشار می‌شود. زمان های الکترورسی پایین تر از ۴۰ دقیقه به دلیل خواص مکانیکی ضعیف فیلتر تولیدی و زمان بیش‌تر از ۹۰ دقیقه به دلیل ضخامت بالاتر فیلتر و افزایش افت فشار مناسب نیستند. طبق اطلاعات ارائه شده در مدارک معتبر، فیلترهای هوای تجاری موجود که حتی قابلیت حذف کم‌تر از ۸۰ درصد  $PM_{2.5}$  را دارند افت فشار حدود ۴۰۰ پاسکال را ایجاد می‌نمایند و افت فشار کم‌تر از ۱۰۰ پاسکال در سرعت جریان باد  $0.2m/s$  در فیلترهای هوا عدد مناسبی می‌باشد (۳۱). معمولاً در افت فشار بالا انرژی بالایی برای جریان هوا نیاز است و این مسئله علاوه بر مصرف انرژی، با تخریب سریع تر بافت فیلتر، طول عمر آن را کاهش خواهد داد. لازم به ذکر می‌باشد که

جهت بررسی تکرارپذیری نتایج، آزمایش جذب  $PM_{2.5}$  بر روی فیلتر نانوالیاف PAN90 شش بار به صورت متوالی و در شرایط مشابه انجام گرفت. انحراف استاندارد نسبی برای کارایی جذب نسبت به میانگین شش بار اندازه‌گیری مقدار ۰/۷۹ درصد بدست آمد که نشان دهنده تکرارپذیر بودن نتایج می‌باشد.

#### بحث

همان‌طور که در شکل ۴ نشان داده شده است هیچ‌کدام از فیلترهای هوا خودرو موجود در بازار توانایی جذب  $PM_{2.5}$  را ندارند. به عبارت دیگر تمام هوایی که از طریق این فیلترها وارد خودرو می‌گردد حاوی  $PM_{2.5}$  است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که احتمالاً مسئله حذف  $PM_{2.5}$  در اولویت شرکت‌های ساخت فیلترهای خودرو نیست. همان‌طور که پیش بینی می‌شد، استفاده از نانو الیاف پلی آکریلونیتریل، اولاً به دلیل حضور نانو الیاف در بافت فیلتر و بالا بودن سطح تماس در مواد با ابعاد نانو و ثانیاً به دلیل وجود گروه‌های عاملی موجود در پلی آکریلونیتریل باعث افزایش حذف ذرات شده است. شکل ۵

### نتیجه گیری

از آنجایی که هیچ کدام از فیلترهای کابین و هوای خودرو مورد بررسی در این پژوهش قابلیت حذف  $PM_{2.5}$  را نداشتند و با توجه به این که هوای داخل خودرو یا از طریق این فیلترها یا از طریق پنجره اتومبیل وارد خودرو می‌شوند، در نتیجه مخصوصاً در ترافیک سنگین شهرهای بزرگ که غلظت  $PM_{2.5}$  بالا است، هوای کابین برای سرنشینان خودرو آلوده است. با توجه به این نکته که در سیستم تهویه خودروهای تجاری هوای داخل کابین خودرو به‌طور مداوم از میان فیلتر هوای کابین در گردش می‌باشد، در نتیجه به نظر می‌رسد ایده ساخت فیلترهای جاذب  $PM_{2.5}$  برای خودرو اهمیت زیادی داشته و می‌تواند ضامن سلامتی سرنشینان خودرو گردد. همان‌طور که نتایج این پژوهش نشان می‌دهد، استفاده از نانو الیاف پلی آکریلونیتریل می‌تواند با راندمان حذف بیش‌تر از ۹۷٪ باعث جذب  $PM_{2.5}$  شود. همچنین با توجه به توسعه روش‌های تولید نانو الیاف به روش الکترورسی که به صورت گسترده در دسترس هست و صنعتی شده است، با افزودن یک لایه از نانو الیاف پلی‌آکریلونیتریل به فیلترهای بدنه خودرو می‌توان توانایی حذف  $PM_{2.5}$  را به فیلترهای معمول اضافه کرده و هوای خیلی تمیزتری برای کابین خودرو تأمین نمود که در سلامتی شهروندان حاضر در خودرو می‌تواند بسیار موثر واقع شود.

### تقدیر و تشکر

این مقاله با حمایت مالی پژوهشگاه شیمی و مهندسی شیمی ایران در راستای حمایت از طرح‌های کاربردی انجام گرفته است.

### References

1. Maricq MM. Chemical characterization of particulate emissions from diesel engines: A review. *Journal of Aerosol Science*. 2007; 38(11):1079-118.
2. Zhang R, Jing J, Tao J, Hsu S-C, Wang G, Cao J, et al. Chemical

مطابق با اعلام شرکت های تولید دستگاه‌های تهویه مطبوع حدود ۳۰ درصد مصرف انرژی در این دستگاه‌ها مستقیماً مربوط به قسمت فیلتراسیون می‌باشد و با توجه به افزایش افت فشار در نانوفیلترهای با کارایی حذف  $PM_{2.5}$  بالا که در این مطالعه ارائه شده نسبت به فیلترهای هوای خودرو معمول، نحوه تأمین این انرژی بایستی قبل از استفاده در سیستم تهویه هوای خودرو توسط کارشناسان مربوطه مورد بررسی دقیق قرار گیرد (۳۲).

استفاده از کامپوزیت نانو الیاف پلیمری با ترکیبات معدنی و آلی دیگر برای بهبود خاصیت فیزیکی مانند افزایش مقاومت مکانیکی یا عملکرد آن در تحقیقات معمول است. حضور نانوکیتوسان مقاومت مکانیکی فیلتر تولیدی را بالا می‌برد که به راحتی با مقاومت بالای آن در مقابل پارگی قابل تشخیص می‌باشد. در عین حال با توجه به نتایج جدول ۲ به دلیل افزایش افت فشار، استفاده از آن بالاتر از ۰/۲ درصد در ساخت نانو فیلتر مناسب نیست. همان‌طور که اشاره شد افزایش خواص مکانیکی در اثر اضافه کردن نانوکیتوسان به صورت بصری کاملاً مشهود می‌باشد و در نتیجه کاملاً حضور نانوکیتوسان را در ساختار نانو الیاف ثابت می‌نماید.

مقایسه کارایی نمونه تجاری با نمونه فیلتر نانو الیاف ساخته شده در این پژوهش نشان داد که فیلتر ابداعی در زمان یک دقیقه، بیش‌تر از ۶۰ درصد  $PM_{2.5}$  عبوری را جذب می‌کند و نشان دهنده سرعت و کارایی این نوع فیلترها است شکل ۶. در صورتی که فیلتر تجاری پس از ۱۰ دقیقه هم جذب قابل توجهی نداشت.

همان‌طور که در جدول ۲ و شکل ۵ نشان داده شده است نانو فیلتر PAN۹۰ قابلیت جذب بالای ۹۷ درصد از  $PM_{2.5}$  را پس از ۱۰ دقیقه داشته و فاکتور کیفیت آن برابر با ۰/۳۶۲ است و بهترین نتیجه ثبت شده در این گزارش می‌باشد و می‌تواند به‌عنوان فیلتر مناسب در خودروهای تجاری مورد استفاده قرار گیرد.

- fine particulate matter on premature human mortality using atmospheric modeling. *Environmental health perspectives*. 2010;118(9):1189-95.
11. Brook RD, Rajagopalan S, Pope III CA, Brook JR, Bhatnagar A, Diez-Roux AV, et al. Particulate matter air pollution and cardiovascular disease: an update to the scientific statement from the American Heart Association. *Circulation*. 2010;121(21):2331-78.
  12. Timonen KL, Vanninen E, De Hartog J, Ibald-Mulli A, Brunekreef B, Gold DR, et al. Effects of ultrafine and fine particulate and gaseous air pollution on cardiac autonomic control in subjects with coronary artery disease: the ULTRA study. *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology*. 2006;16(4):332.
  13. Zhao S, Chen L, Li Y, Xing Z, Du K. Summertime spatial variations in atmospheric particulate matter and its chemical components in different functional areas of Xiamen, China. *Atmosphere*. 2015;6(3):234-54.
  14. Hoek G, Krishnan RM, Beelen R, Peters A, Ostro B, Brunekreef B, et al. Long-term air pollution exposure and cardio-respiratory mortality: a review. *Environmental health*. 2013;12(1):43.
  15. Raaschou-Nielsen O, Andersen ZJ, Beelen R, Samoli E, Stafoggia M, Weinmayr G, et al. Air pollution and lung cancer incidence in 17 European cohorts: prospective analyses from the European Study of Cohorts for Air Pollution Effects (ESCAPE). *The lancet oncology*. 2013;14(9):813-22.
  16. Hu D, Jiang J. A study of smog issues and PM<sub>2.5</sub> pollutant control strategies in China. *Journal of Environmental Protection*. 2013;4(07):746.
  - characterization and source apportionment of PM<sub>2.5</sub> in Beijing: seasonal perspective. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2013; 13(14): 7053-74.
  3. Watson JG. Visibility: Science and regulation. *Journal of the Air & Waste Management Association*. 2002; 52(6): 628-713.
  4. Andreae M, Rosenfeld D. Aerosol-cloud-precipitation interactions. Part 1. The nature and sources of cloud-active aerosols. *Earth-Science Reviews*. 2008;89(1-2):13-41.
  5. Mahowald N. Aerosol indirect effect on biogeochemical cycles and climate. *Science*. 2011;334(6057):794-6.
  6. Horton DE, Skinner CB, Singh D, Diffenbaugh NS. Occurrence and persistence of future atmospheric stagnation events. *Nature climate change*. 2014;4(8):698.
  7. Nel A. Air pollution-related illness: effects of particles. *Science*. 2005; 308(5723): 804-6.
  8. Betha R, Behera SN, Balasubramanian R. 2013 Southeast Asian smoke haze: fractionation of particulate-bound elements and associated health risk. *Environmental science & technology*. 2014;48(8):4327-35.
  9. Wu S, Deng F, Wei H, Huang J, Wang X, Hao Y, et al. Association of cardiopulmonary health effects with source-appointed ambient fine particulate in Beijing, China: a combined analysis from the Healthy Volunteer Natural Relocation (HVNR) study. *Environmental science & technology*. 2014;48(6):3438-48.
  10. Anenberg SC, Horowitz LW, Tong DQ, West JJ. An estimate of the global burden of anthropogenic ozone and

- composite with low filtration resistance for the effective capture of PM<sub>2.5</sub>. *Journal of membrane science*. 2018;551:85-92.
27. Pooraeini F NM. Chitosan and its application in wastewater treatment, second national conference on solutions to water crisis in Iran and the middle East, Shiraz, scientific conference center. 1394.
28. Lin T-C, Krishnaswamy G, Chi DS. Incense smoke: clinical, structural and molecular effects on airway disease. *Clinical and Molecular Allergy*. 2008;6(1):3.
29. Zhang R, Liu C, Hsu PC, Zhang C, Liu N, Zhang J, et al. Nanofiber Air Filters with High-Temperature Stability for Efficient PM<sub>2.5</sub> Removal from the Pollution Sources. *Nano Lett*. 2016;16(6):3642-9.
30. Xu Y, Liu X, Zhang Y, Sun W, Zhou Z, Xu M, et al. Field Measurements on the Emission and Removal of PM<sub>2.5</sub> from Coal-Fired Power Stations: 3. Direct Comparison on the PM Removal Efficiency of Electrostatic Precipitators and Fabric Filters. *Energy & Fuels*. 2016;30(7):5930-6.
31. Zhang R, Liu C, Hsu P-C, Zhang C, Liu N, Zhang J, et al. Nanofiber air filters with high-temperature stability for efficient PM<sub>2.5</sub> removal from the pollution sources. *Nano letters*. 2016;16(6):364.9-2
32. Li P, Wang C, Zhang Y, Wei F. Air filtration in the free molecular flow regime: a review of high-efficiency particulate air filters based on carbon nanotubes. *Small*. 2014;10(22):4543-61.
17. Roshani M A, Shahbazi H, Torbatian S, Karimi E. Tehran air quality and noise report in 1397 1398. (In Persian)
18. Hutten IM. Handbook of nonwoven filter media: Elsevier; 2007.
19. Heger M, Sarraf M. Air pollution in Tehran: health costs, sources, and policies. World Bank; 2018.
20. Terzano C, Di Stefano F, Conti V, Graziani E, Petroianni A. Air pollution ultrafine particles: toxicity beyond the lung. *Eur Rev Med Pharmacol Sci*. 2010;14(10):809-21.
21. Doozandegan M, Masumi A, Izanloo H, Soot removal pilot project from Beyhaghi suburban terminal, Technical report of air quality control company, QM96/06/26(U)/01. (In Persian)
22. Hinds WC. Aerosol technology: properties, behavior, and measurement of airborne particles: John Wiley & Sons; 1999.
23. Li P, Zong Y, Zhang Y, Yang M, Zhang R, Li S, et al. In situ fabrication of depth-type hierarchical CNT/quartz fiber filters for high efficiency filtration of sub-micron aerosols and high water repellency. *Nanoscale*. 2013;5(8):3367-72.
24. Gong G, Zhou C, Wu J, Jin X, Jiang L. Nanofibrous adhesion: The twin of gecko adhesion. *ACS nano*. 2015;9(4):3721-7.
25. Souzandeh H, Johnson KS, Wang Y, Bhamidipaty K, Zhong W-H. Soy-protein-based nanofabrics for highly efficient and multifunctional air filtration. *ACS applied materials & interfaces*. 2016;8(31):200.31-23
26. Li J, Zhang D, Yang T, Yang S, Yang X, Zhu H. Nanofibrous membrane of graphene oxide-in-polyacrylonitrile