

ORIGINAL RESEARCH PAPER

## Assessment and Validation of Domestically Made Activated Carbon Sorbent Tubes for Sampling air Pollutants

Mahdi Alinia Ahandani<sup>1</sup>, Saba Kalantary<sup>1</sup>, Monireh Khadem<sup>1</sup>, Fatemeh Jafari<sup>1</sup>, Kamal Azam<sup>2</sup>, Farideh Golbabaee<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Occupational Health Engineering, School of health, Tehran University of Medical Sciences, Tehran, Iran

<sup>2</sup>Department of Epidemiology and Biostatistics, School of Public Health, Tehran University of Medical Sciences, Tehran, Iran

Received: 01-08-2023

Accepted: 07-12-2023

### ABSTRACT

**Introduction:** VOCs are harmful air pollutants that must be detected, monitored and eliminated. Adsorber tubes are standard tools for this task, specifically activated carbon tubes with high adsorption and selectivity. This research aims to compare the structural and functional characteristics of domestically produced activated carbon tubes with the conventional commercial ones for sampling toluene, a volatile organic compound.

**Material and Methods:** The characteristics of each adsorbent, such as structure, morphology, porosity, and element composition, were examined by SEM photography, BET testing, and EDAX analysis. The central composite design (CCD) method was employed to investigate the adsorption properties of the adsorbents. The input concentration and re-adsorption time of the samples were the variables considered in this study. Additionally, a field phase of personal air sampling was performed to evaluate the effectiveness of adsorbent tubes.

**Results:** SEM and BET analyses indicated that the porous structure of domestic activated carbon was comparable to the model produced by SKC. EDAX analysis detected a minor impurity (1%) in the domestic activated carbon adsorbent. The adsorption performance was significantly influenced by the variations in re-adsorption time and pollutant input concentration. The accuracy and precision of the performance of the domestic adsorbent tube were obtained as 90.77% and 91.76%. The field phase results demonstrated that the amount of pollutant adsorbed in the SKC-activated charcoal adsorber did not differ significantly during 0 to 30 days. However, the domestic adsorber showed a significant difference in the same period. The overall performance of the two adsorbents did not exhibit a significant difference between 0 and 30 days.

**Conclusion:** Despite minor structural differences, the adsorption efficiency of toluene by domestic adsorbent tubes in sampling high concentrations is very similar to its commercial type. However, it is not recommended for use in low-concentration environments (10 ppm and less).

**Keywords:** Adsorber tubes, Activated carbon, Toluene, Sampling tubes

### HOW TO CITE THIS ARTICLE

Alinia Ahandani M, Kalantary S, Khadem M, Jafari F, Azam K, Golbabaee F. Assessment and Validation of Domestically Made Activated Carbon Sorbent Tubes for Sampling air Pollutants. *J Health Saf Work*. 2024; 13(4): 838-855.

\* Corresponding Author Email: [fgolbabaee@tums.ac.ir](mailto:fgolbabaee@tums.ac.ir)

Copyright © 2024 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

The occupational exposure of workers to toxic compounds in workplace air poses significant health risks. Therefore, it is crucial to employ suitable methods for sampling, monitoring, and eliminating such pollutants. The surface adsorption method is a common approach to monitor airborne chemical compounds, relying on the properties of both the adsorbate and the adsorbent materials. Identifying an adsorber that aligns with the requirements is a critical step in the research process.

However, commercial air sampler adsorber tubes, like the SKC type, are mainly imported and have limited availability. Thus, exploring the domestic synthesis of these tubes presents a viable alternative.

This study evaluates and compares the structure and performance of two domestically synthesized activated carbon adsorbent tubes with the standard commercial counterpart, using toluene as the indicative chemical compound for sampling and comparison. The pursuit of domestic alternatives aims to address practical constraints, ensuring a sustainable and accessible solution for workplace air quality monitoring. The findings hold the potential to advance this field and contribute to sustainable industrial practices and policies concerning air pollution control.

## 2. MATERIAL AND METHODS

The current study employed a domestically manufactured activated carbon adsorber tube, alongside a commercial counterpart, serving as a reference sample for comparative analysis. The specifications of these tubes are provided in Table 1.

In this study, a range of analytical techniques were employed to conduct a thorough examination of the morphological characteristics and adsorption properties of the adsorbents. Scanning Electron Microscopy (SEM) was specifically utilized to enable a detailed comparative analysis of the morphological attributes of the adsorbents. The Brunauer-Emmett-Teller (BET) test was utilized to ascertain the average pore diameter, specific surface

area, and pore size distribution. Concurrently, the Energy-Dispersive X-ray Spectroscopy (EDAX) test was implemented to identify the constituent elements and compute their respective weight percentages.

The investigation of the adsorption properties was carried out using the Central Composite Design (CCD) method, which allowed for the examination of various factors, such as initial concentration in the range of half to twice the threshold limit (Toluene threshold limit value = 20 ppm) and readsorption time (0 to 30 days), on the efficiency of the adsorbents. Consequently, employing this prescribed methodology, a total of 13 simultaneous samplings were conducted for each type of activated carbon adsorbent. Standard concentrations were prepared in the Tedlar bag using a static method, and these were subsequently passed through domestic and commercial sampler adsorber tubes. The flow rate, sampling volume, and other pertinent requirements for toluene sampling were adhered to in accordance with the established standard method of aromatic hydrocarbon sampling, specifically as outlined in the NIOSH (National Institute for Occupational Safety and Health) 1501 method.

After the sampling procedure, the NIOSH 1501 method was utilized to conduct the analysis of the collected samples. The protocol involved the careful extraction of the activated carbon from both the front and rear segments of the sampling tubes, and these samples were then individually placed into separate vials. Subsequently, a precise volume of 1 milliliter of CS<sub>2</sub> (carbon disulfide) was meticulously injected into each vial. The vials containing the activated carbon samples were then subjected to a controlled agitation process within a shaker set at 200 RPM for a duration of 30 minutes. Following the agitation, the contents of each vial were meticulously transferred to new vials using disposable pipettes, and appropriate coding was applied to the new vials to ensure proper identification during the subsequent analysis. The analysis of aromatic hydrocarbons was performed on a GC-MS (Gas Chromatography-

Table 1: Specifications of domestic and commercial type adsorbent tubes

	front layer (mg)	Backup layer (mg)	Middle foam separator (mm)	End foam separator (mm)
Domestically made adsorber	100	50	2	3
SKC adsorber	100	50	2	3

Table 2: BET test results of domestically produced activated carbon and commercial model

	Domestic AC adsorber tube	Commercial (SKC) AC adsorber tube
specific surface area ( $\text{m}^2\text{g}^{-1}$ )	1071.3	1078.8
Total pore volume ( $\text{cm}^3\text{g}^{-1}$ )	246.15	247.87
Average pore diameter (nm)	1.85	1.7532

Table 3: Percentage composition of constituent elements in domestic and commercial activated carbon tubes obtained through Energy Dispersive X-ray Analysis (EDAX)

	C (W%)	O (W%)	Si (W%)	S (W%)	Cl (W%)	K (W%)
Domestic AC adsorber tube	89.15	8.89	0.94	0.33	0.46	0.31
Commercial (SKC) AC adsorber tube	90.21	8.42	1.37	0	0	0

Mass Spectrometry) machine, with a temperature program specifically designed for this purpose. Upon completion of the temperature program, the prepared vials were placed in an auto-sampler, enabling the systematic and sequential analysis of the samples in adherence to the predetermined order.

Furthermore, to evaluate the performance of the adsorbent tubes under real-world conditions, a field phase of personal air sampling was conducted. This step provided valuable insights into the practical applicability and effectiveness of the adsorbents in real-life scenarios.

### 3. RESULTS AND DISCUSSION

The findings from the rigorous application of Structural Equation Modeling (SEM) and Brunauer-Emmett-Teller (BET) analyses have indicated a striking similarity in the porous structures of domestic activated carbon adsorber tubes and the SKC models which is shown in Table 2. Furthermore, the Energy-Dispersive X-ray Spectroscopy (EDAX) analysis has revealed a marginal impurity content (1%) in the domestic activated carbon adsorbent relative to its commercial counterpart. Both the commercial and domestic adsorbents, along with the activated carbon adsorber, were found to be primarily composed of carbon and oxygen. (Table 3).

Moreover, the adsorption performance of each domestic and SKC activated carbon adsorbent demonstrated a significant dependence on both the readsorption time and the pollutant input concentration ( $p$ -value  $< 0.05$ ). Subsequent to the field phase assessment, it was observed that the discrepancy in the amount of pollutant adsorbed by the SKC activated charcoal adsorber did not

attain statistical significance ( $p$ -value  $> 0.05$ ) over the 0 to 30-day period. Conversely, for the domestic adsorber, a noteworthy correlation ( $p$ -value  $< 0.05$ ) between the adsorption quantity and time was discerned. Nevertheless, the overall performance of the two SKC and domestic adsorbents exhibited no statistically significant difference between 0 and 30 days ( $p$ -value  $> 0.05$ ). Figure 1 delineates the results pertaining to the impact of the input pollutant quantity and the influence of readsorption time on the detected quantity of toluene adsorbed on the surfaces of domestically manufactured and commercial activated carbon adsorbents.

### 4. CONCLUSIONS

The present study has shed light on the structural characteristics of domestically produced activated carbon, revealing slight differences, yet conspicuous similarities when compared to the corresponding models manufactured by SKC. The adsorption efficiency of domestically manufactured activated carbon adsorber tubes, evaluated at three distinct pollutant levels, yielded results akin to those obtained with the activated charcoal adsorber produced by SKC company. Although the average pollutant concentration adsorbed and extracted from the activated carbon adsorber tubes manufactured by SKC (79.02 mg/m<sup>3</sup>) exhibited a marginally higher value than the domestically manufactured activated carbon adsorber (75.05 mg/m<sup>3</sup>), this difference did not reach statistical significance. These observations were consistently replicated during field assessments for both adsorbents.

Nevertheless, it is crucial to note that abrupt variations in the results were observed at low pollutant concentrations for both domestic and

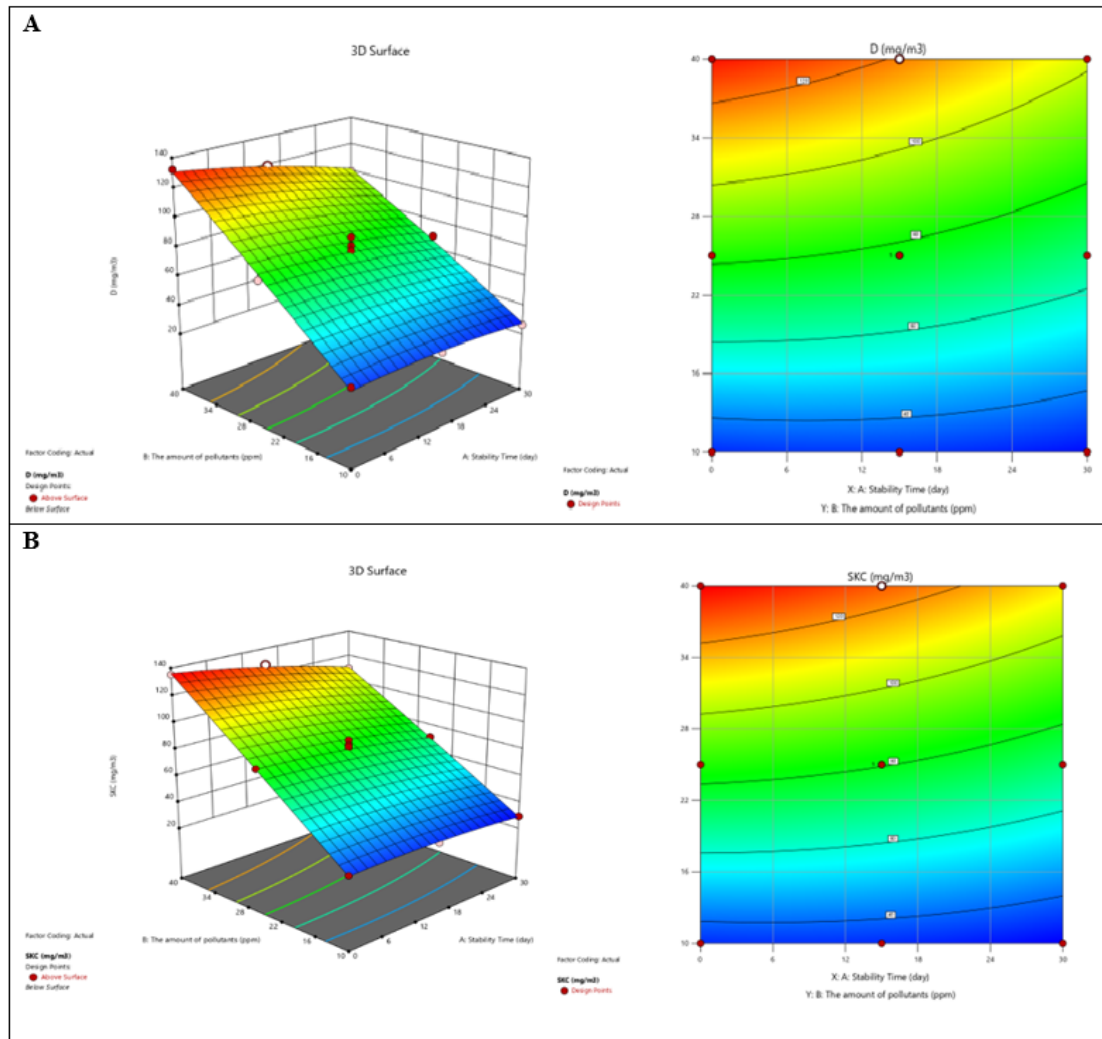


Fig. 1: Three-dimensional response surface curve illustrating the adsorption of toluene in relation to sample readsorption time and pollutant input amount for two activated carbon adsorbent types: A - domestically manufactured, and B - commercial (SKC) activated

commercial activated carbon adsorbents. This necessitates further investigations that encompass a variety of environmental conditions and a broader concentration range, in order to gain a more comprehensive understanding of the adsorption behavior under different scenarios. Such in-depth studies will contribute to advancing our

comprehension of these adsorption processes and their implications in real-world applications.

## 5. ACKNOWLEDGMENT

This research has been supported by Tehran University of Medical Sciences and Health Services grant (Grant No. 53262)

## ارزیابی و اعتبار بخشی لوله جاذب نمونه بردار زغال فعال ساخت داخل جهت نمونه برداری از آلاینده های هوا

مهدی علی نیا آهندانی<sup>۱</sup>، صبا کلانتری<sup>۱</sup>، منیره خادم<sup>۱</sup>، فاطمه جعفری<sup>۱</sup>، کمال اعظم<sup>۲</sup>، فریده گلبابایی<sup>۱\*</sup>

<sup>۱</sup>گروه مهندسی بهداشت حرفه ای، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی تهران، تهران، ایران  
<sup>۲</sup>گروه اپیدمیولوژی و آمار زیستی، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی تهران، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۵/۱۰، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۹/۱۶

### مکیده

**مقدمه:** ترکیبات آلی فرار (VOC's)، از جمله آلاینده های خطرناک هوا هستند که جهت نمونه برداری از آن ها از لوله های جاذب نمونه بردار زغال فعال استفاده می شود. هدف این مطالعه، بررسی ساختار و عملکرد لوله جاذب زغال فعال ساخت داخل در مقایسه با نمونه تجاری متداول آن در بازار جهت نمونه برداری از ترکیبات آلی فرار، به ویژه تولوئن، می باشد.

**روش کار:** در این مطالعه تجربی از دو نوع لوله جاذب نمونه بردار زغال فعال ساخت داخل و مدل تجاری شرکت SKC به عنوان نمونه مرجع استفاده شد. جهت بررسی ساختار ریخت شناسی از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)، تعیین ساختار تخلخل از آنالیز BET و جهت پایش عنصری از آزمون EDAX استفاده شد. به منظور بررسی عملکرد جذبی، تحت شرایط یکسان، غلظت های مختلف آلاینده از لوله ها عبور داده شد و نتایج در روزهای ۰، ۱۵ و ۳۰ آنالیز شدند. در نهایت امکان کاربرد عملی لوله های جاذب نمونه بردار به منظور نمونه برداری از تولوئن در هوای یک واحد جایگاه سوخت نیز بررسی شد.

**یافته ها:** نتایج نشان داد سطح ویژه و حجم منافذ لوله جاذب نوع تجاری با تفاوت اندکی از لوله جاذب ساخت داخل بیشتر است. نتایج تست EDAX مقادیر اندک (۰/۱٪) از عناصر ناخالصی در جاذب ساخت داخل را نشان داد. بررسی اثر زمان بازیافت و تراکم ورودی آلاینده در هردو جاذب معنادار شد. نتایج فاز میدانی نشان داد میانگین جذب در جاذب های ساخت داخل و نوع تجاری تفاوت معناداری با یکدیگر ندارند. میزان صحت و دقت عملکرد لوله جاذب ساخت داخل به ترتیب ۹۰/۷۷ و ۹۱/۷۶ درصد به دست آمد. با بررسی تاثیر روز بازیافت در فاز میدانی، این ارتباط برای جاذب ساخت داخل به صورت معنادار، و برای جاذب تجاری ارتباطی یافت نشد.

**نتیجه گیری:** کارایی جذب تولوئن توسط لوله های جاذب ساخت داخل در نمونه برداری از تراکم های بالا با نوع تجاری آن علازغم وجود تفاوت های ساختاری اندک شباهت بسیاری داشته، اما برای کاربرد در محیط هایی با تراکم پایین (۱۰ ppm و کمتر) توصیه نمی شود.

**کلمات کلیدی:** جاذب سطحی، زغال فعال، لوله نمونه بردار، جذب سطحی، تولوئن

\* پست الکترونیکی نویسنده مسئول مکاتبه: [fgolbabaiei@tums.ac.ir](mailto:fgolbabaiei@tums.ac.ir)

## مقدمه

آلودگی هوا به دلیل تأثیرات منفی آن از جنبه‌های گوناگون و از جمله بر سلامت انسان، مورد توجه بسیاری در سرتاسر جهان است. مجتمع‌های صنعتی یکی از منابع انسانی مهم آلودگی هوا هستند. ترکیبات آلی فرار (VOCs)<sup>(۱)</sup> گروه مهمی از آلاینده‌های هوا هستند که اغلب به عنوان آلاینده‌های سمی یا خطرناک هوا شناخته می‌شوند و می‌توانند نگرانی‌های جدی برای سلامتی انسان ایجاد کنند<sup>(۱)</sup>. غلظت VOCها در حال حاضر به واسطه‌ی رشد جمعیت شهرها و افزایش صنایع گوناگون، در حال افزایش است. ترکیبات آلی فرار عمدتاً توسط صنایعی مانند صنایع چاپ، تولید مواد شیمیایی آلی، جایگاه‌های سوخت خودرو و صنایع رنگ و رزین منتشر می‌شوند و به دلیل سرعت تبخیر بالا و انتشار سریع در هوا می‌توانند به طور قابل توجهی بر کارگران شاغل در این صنایع اثر گذاشته و منجر به عوارض ناخوشایند همچون اثرات سرطان‌زایی و عصبی و غیره شوند<sup>(۲)</sup>. علاوه بر آن، این ترکیبات نقش مهمی در تشکیل ازن و ذرات ریز توسط مه‌دود فتوشیمیایی ایفا می‌کنند و دارای اثرات زیست‌محیطی قابل توجهی نیز می‌باشند<sup>(۳)</sup>.

در میان تمام ترکیبات آلی فرار، تولوئن یکی از رایج‌ترین مواد شیمیایی بوده که تولید جهانی آن بین ۵ تا ۱۰ میلیون تن در سال است. تولوئن یک ترکیب مایع غیرخورنده با بویی شبیه بنزن است. کارگرانی که از تولوئن به عنوان حلال استفاده می‌کنند مشکلات و عوارضی مانند سرگیجه، سوزش چشم، تحریک پوست، اختلالات تنفسی، اختلالات کبدی، کلیوی و سیستم عصبی مرکزی را تجربه می‌کنند<sup>(۴)</sup>. مواجهه مزمن با تولوئن ممکن است باعث اختلالات مغزی و عصبی رفتاری در کارگران شود<sup>(۱)</sup>. مطالعات نشان می‌دهد که قرار گرفتن در معرض تولوئن می‌تواند باعث مشکلات قلبی مانند برادیکاردی، تاکی‌کاردی و فیبریلاسیون بطنی، کاردیومیوپاتی، نارسایی قلبی، انفارکتوس میوکارد، و مرگ ناگهانی شود<sup>(۵-۷)</sup>. بنابراین اندازه‌گیری و ارزیابی

این آلاینده در هوا به منظور تعیین غلظت آن و در نهایت ارائه راهکارهای کنترلی به منظور حفظ سلامت محیط‌های کاری و جامعه ضروری است. مهم‌ترین و پایه‌ای‌ترین گام در جهت ارزیابی و کنترل درست مواجهه با ترکیبات مضر، نمونه‌برداری مناسب و صحیح از این ترکیبات است. روش‌های نمونه‌برداری مورد استفاده در بهداشت حرفه‌ای جهت پایش ترکیبات آلی فرار منتشر شده در هوا، عموماً شامل روش‌های نمونه‌برداری از گازها و بخارات مبتنی بر جاذب‌های سطحی می‌باشد که توسط سازمان‌های معتبری همچون موسسه ملی ایمنی و بهداشت شغلی (NIOSH)<sup>(۲)</sup> و اداره ایمنی و بهداشت شغلی آمریکا (OSHA)<sup>(۳)</sup> توصیه می‌شود<sup>(۸)</sup>.

از مهم‌ترین جاذب‌های سطحی قابل استفاده در نمونه‌برداری از تولوئن، جاذب سطحی کربن فعال می‌باشد. کربن فعال جاذبی غیرقطبی بوده که به دلیل خاصیت آبگریزی و نسبت بالای سطح به جرم، تخلخل زیاد، واکنش سطحی مناسب، ارزان و در دسترس بودن و همچنین دارا بودن طیف گسترده‌ای از گروه‌های عاملی بر روی سطح خود یکی از گزینه‌های مهم در بین انواع جاذب‌ها به منظور استفاده در سیستم‌های مبتنی بر جذب سطحی است<sup>(۹)</sup>.

کربن فعال به عنوان یکی از متداول‌ترین و کارآمدترین مواد جاذب شناخته می‌شود و به طور عمده از موادی نظیر چوب و زغال سنگ به عنوان ماده پیش‌ساز و اولیه تهیه می‌گردد، با این وجود به دلیل عدم تجدیدپذیری این مواد پیش‌ساز و هزینه‌های بالای تولید و احیای آن‌ها به فرم تجاری، قیمت نهایی کربن فعال تولیدشده بالا بوده و عموماً نیز به صورت وارداتی و با قیمتی گزاف وارد کشورهای در حال توسعه از جمله کشور ما می‌گردد. بنابراین در سال‌های اخیر تلاش‌های فراوانی برای گسترش و توسعه مقرون به صرفه تولید کربن فعال و لوله‌های جاذب نمونه‌بردار صورت گرفته است. علاوه بر این تولید آن از مواد اولیه ارزان‌قیمت و در دسترس،

2. National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH)

3. Occupational Safety and Health Administration (OSHA)

1. Volatile Organic Compounds (VOCs)

می‌تواند توجیه اقتصادی داشته باشد (۱۰، ۱۱). لذا هدف از مطالعه حاضر بررسی و مقایسه عملکرد لوله‌های جاذب زغال فعال ساخت داخل با نمونه تجاری متداول آن در بازار است که جهت نمونه‌برداری از یک ترکیب شاخص از دسته ترکیبات آلی فرار (تولوئن) مورد استفاده قرار گرفت و در نهایت امکان کاربرد عملی این لوله جاذب نمونه‌بردار به منظور نمونه‌برداری تولوئن در هوای یک واحد صنعتی بررسی گردید.

### روش کار

#### مواد و تجهیزات

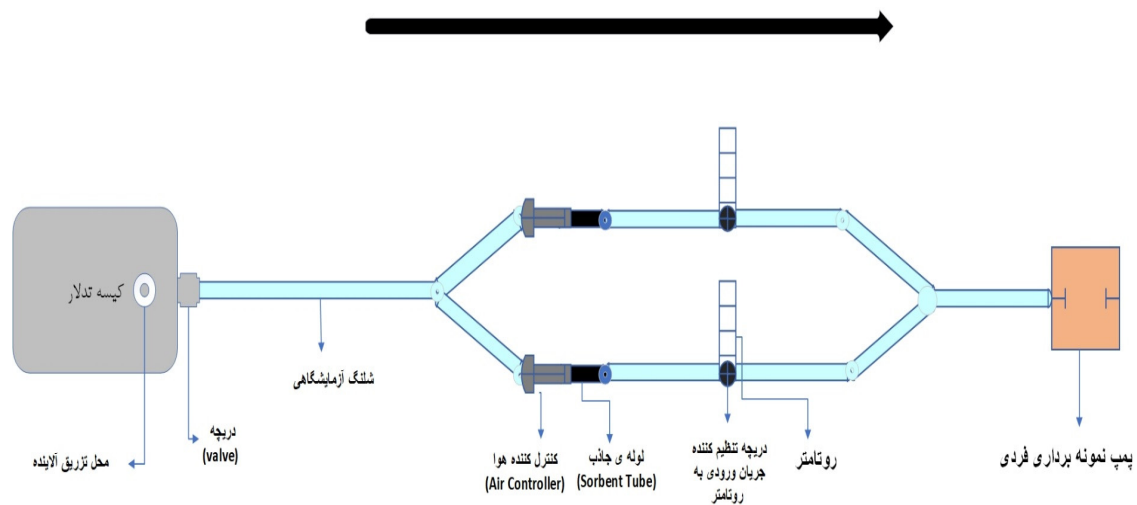
در این پژوهش از تولوئن شرکت مرک آلمان، لوله‌های نمونه‌برداری تجاری مورد استفاده به عنوان لوله‌های مرجع ساخت شرکت SKC انگلستان، پمپ نمونه برداری فردی ساخت شرکت SKC کشور انگلستان، فلومتر با دامنه اندازه‌گیری دبی ۰/۱ تا ۱ میلی لیتر بر دقیقه مربوط به شرکت Madeco کشور کانادا و کیسه تدارک ۱۰ لیتری ساخت شرکت SKC انگلستان استفاده گردید. از دیگر تجهیزات مورد استفاده تنظیم کننده‌ی هوا (air controller)، شلنگ‌های تفلونی با قطر مناسب، دوشاخه و دستگاه گاز کروماتوگرافی با دتکتور (FID GC-Agilent Technologies-Model 7890 A, USA) بوده است.

#### بررسی مشخصات ظاهری لوله‌های جاذب نمونه برداری ساخت داخل و تجاری

در این مطالعه از دو لوله جاذب سطحی کربن فعال ساخت داخل و نوع تجاری آنها به عنوان نمونه مرجع جهت مقایسه استفاده شد (شکل ۱). در جدول ۱ به اختصار مشخصات آنها ذکر شده است. به منظور بررسی عملکرد لوله‌های نمونه بردار در جذب آلاینده، این پژوهش در دو فاز آزمایشگاهی و میدانی صورت گرفته است.

#### بررسی ویژگی‌های ساختاری لوله‌های نمونه بردار جاذب ساخت داخل و تجاری

به منظور تعیین ویژگی‌های ریخت شناختی زغال فعال داخلی سنتز شده و نیز نوع تجاری آن از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مدل MIRA III ساخت شرکت TESCAN-USA استفاده گردید. سپس با استفاده از آزمون جذب و واجذب (BET) با استفاده از دستگاه BELSORP MINI II ساخت شرکت BEL-Japan ، ویژگی‌های خلل و فرج جاذب‌های نمونه بردار شامل مساحت سطح ویژه، میانگین قطر منافذ، تعیین حجم کل منافذ و توزیع اندازه حفرات جاذب مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت. همچنین درصد ترکیبات هر یک از مواد



شکل ۱: چیدمان سیستم نمونه‌برداری از آلاینده

جدول ۱: مشخصات لوله های جاذب داخلی و نوع تجاری (مرجع)

نوع لوله جاذب	مدل	مقدار بخش جلویی (mg)	مقدار بخش عقبی (mg)	طول فوم میانی (mm)	طول فوم انتهایی (mm)
زغال فعال	داخلی	۱۰۰	۵۰	۲	۳
	تجاری (مرجع)	۱۰۰	۵۰	۲	۳

مواجهه با این ماده تا دو برابر این مقدار با استفاده از روش طراحی مرکب مرکزی (CCD<sup>۱</sup>) در نظر گرفته شد. (مقدار مجاز مواجهه با تولوئن = ۲۰ ppm) است.

نمونه برداری از تراکم های معین ساخته شده تولوئن در هوا

پس از تهیه تراکم استاندارد از تولوئن، انجام فرآیند نمونه برداری در فاز آزمایشگاهی با استفاده از سیستم نمونه برداری که نمای کلی آن در شکل ۱ نشان داده شد، انجام گرفت. میزان دبی و حجم نمونه برداری و سایر الزامات مربوط به نمونه برداری از تولوئن براساس روش استاندارد نمونه برداری از هیدروکربن های آروماتیک (NIOSH 1501) بوده است (۱۲). قابل ذکر است که نمونه برداری از هر دو لوله جاذب تجاری (مرجع) و داخلی به صورت همزمان مطابق شکل ۱ صورت گرفت.

به منظور انجام نمونه برداری، کیسه حاوی تراکم استاندارد تهیه شده به روش استاتیک در مدار نمونه برداری قرار گرفت. دو سر لوله های جاذب نمونه بردار داخلی و تجاری (مرجع) با قطر یکسان شکسته شده و مطابق شکل ۳ از یک سو به شلنگ تفلون اتصال یافته به کیسه، و از سوی دیگر به تنظیم کننده ی هوا متصل شدند. نحوه ی قرار گیری لوله های جاذب به گونه ای بود که بخش دارای جاذب بیشتر در مسیر هوای کیسه، و بخش دارای جاذب کمتر (بخش عقبی) به تنظیم کننده ی هوا منتهی می شدند. جاذب ها به صورت افقی قرار گرفته و پس از تنظیم و یکسان کردن دبی (۰/۲ میلی لیتر بر

جاذب در لوله های نمونه بردار ساخت داخل و نوع تجاری با استفاده از آزمون آنالیز عنصری EDAX با استفاده از دستگاه مدل MIRA III ساخت شرکت TESCOAN-USA همراه با دتکتور SAMX تعیین شد.

بررسی اثر تراکم آلاینده بر کارایی و ظرفیت جذب در لوله های جاذب نمونه بردار (ساخت داخل و تجاری) در فاز آزمایشگاهی ساخت تراکم معین

در این مرحله تراکم های استاندارد ورودی مختلف از تولوئن تهیه شد و تأثیر آن بر راندمان جذب هر یک از لوله های جاذب زغال فعال ساخت داخل و نوع تجاری مورد بررسی قرار گرفت. جهت تهیه غلظت های معین تولوئن از سیستم استاتیک یا بسته با استفاده از کیسه های تدارک ۸ لیتری تهیه شد.

ابتدا کیسه های تدارک چند مرتبه با گاز خنثی نیتروژن پر و خالی شده و شستشو شدند. سپس جهت به حداقل رساندن جذب سطحی کیسه ها، مقادیر مشخصی از تولوئن در حد تراکم بهینه سازی شده به وسیله سرنگ میکرولیتری به داخل کیسه ها تزریق، و به مدت ۲۴ ساعت نگهداری شده و پس از آن هوای داخل آن ها خالی شد. در نهایت به منظور ساخت تراکم استاندارد مورد نظر، هوای تمیز به حجم ۸ لیتر وارد کیسه ها شده و به وسیله سرنگ میکرولیتری تراکم مشخصی از تولوئن به داخل کیسه ها تزریق شد. برای به حداقل رساندن تأثیر رطوبت، بعد از پمپ دمنده، فیلتر سیلیکاژل نصب گردید. تراکم های استاندارد ساخته شده از تولوئن از نصف مقدار حد مجاز

1. Central Composite Design (CCD)



دقیقه مطابق با متد (NIOSH 1501) توسط فلومترها در هر شاخه، عمل نمونه برداری به صورت همزمان انجام پذیرفت.

تعیین زمان بهینه ماند<sup>۱</sup> جهت بازیافت نمونه از لوله های جاذب نمونه بردار

به منظور تعیین میزان ماندگاری آلاینده بر روی لوله های جاذب نمونه بردار و امکان از دست رفتن و یا مهاجرت بخشی از آلودگی به بخش عقبی لوله ها، آنالیز و استخراج آلاینده نمونه برداری شده در زمان های صفر (بلافاصله پس از نمونه برداری) الی سی روز پس از اتمام نمونه برداری انجام شد. در نتیجه، با استفاده از روش طراحی مرکب مرکزی (CCD) برای هر یک از انواع جاذب های زغال فعال نوع ساخت داخل و نوع تجاری به عنوان مرجع، تعداد ۱۳ نوبت نمونه برداری همزمان صورت گرفت. با در نظر گرفتن زمان بازیافت به عنوان یک فاکتور اصلی در مطالعه حال حاضر، در اطلاعات هر یک از نوبت های نمونه برداری، زمان آنالیز آن نیز مشخص شد. برای نگهداری لوله های جاذب جهت آنالیز در روزهای ۱۵ و ۳۰، درپوش پلاستیکی در دو طرف لوله قرار گرفت و پس از انتقال به کولباکس مخصوص به یخچال منتقل شدند.

پس از انجام نمونه برداری ها، به منظور بازیافت آلاینده از روش NIOSH 1501 استفاده گردید. بدین ترتیب که ابتدا زغال فعال بخش جلویی و عقبی لوله های نمونه بردار در دو ویال جداگانه قرار گرفتند. سپس مقدار یک میلی لیتر از CS<sub>2</sub> به هر ویال تزریق شد. پس از این که ویال های حاوی نمونه های زغال فعال طی ۳۰ دقیقه در شیکر با ۲۰۰ RPM قرار گرفت، محتویات هر ویال با پیپت یکبار مصرف به ویال جدیدی منتقل شد و ویال های جدید کدبندی شدند. پس از اجرای برنامه دمایی مبتنی بر آنالیز هیدروکربن های آروماتیک بر روی دستگاه GC-MS، ویال های تهیه شده به داخل اتوسمپلر انتقال یافت و عملیات آنالیز نمونه ها به ترتیب انجام شد (۱۲).

#### 1. Stability

بررسی اعتبارسنجی روش آنالیز و عملکرد جاذب های زغال فعال

به منظور بررسی اعتبارسنجی روش آنالیز از شاخص هایی همچون حد تشخیص و حد کمیت، مقدار carry over، صحت و دقت نتایج آنالیز برای لوله های جاذب نمونه بردار استفاده گردید. بدین منظور ابتدا جهت تعیین مقادیر حد تشخیص و حد کمیت از منحنی کالیبراسیون دستگاه گاز کروماتوگرافی در ۵ غلظت استاندارد تزریقی به دستگاه استفاده شد. جهت بررسی دقت نتایج حاصل از مقادیر واجذب بدست آمده در فاز آزمایشگاهی برای لوله های زغال فعال ساخت داخل از درصد ضریب تغییرات (%C.V) استفاده شد. این ضریب نشان دهنده میزان پراکندگی داده ها به مقادیر میانگین می باشد. هر چه ضریب تغییرات کمتر باشد، دقت نتایج بیشتر است. برای تعیین صحت نتایج و عملکرد جاذب زغال فعال ساخت داخل، از درصد میانگین خطای نسبی استفاده شد. از این رو با تعیین مقدار شباهت عملکرد نتایج حاصل از مقادیر واجذب جاذب ساخت داخل با جاذب هم نوع ساخت شرکت SKC به عنوان مرجع مقایسه، مقدار صحت نتایج محاسبه می شود.

بررسی کارآیی جذب لوله های جاذب نمونه بردار (ساخت داخل و تجاری) در فاز میدانی

به منظور بررسی عملکرد لوله های جاذب نمونه بردار داخلی و نیز بررسی و مقایسه آن با لوله های جاذب نمونه بردار تجاری در شرایط واقعی نمونه برداری، بخشی از پژوهش در فاز میدانی در جایگاه های سوخت صورت گرفت و نتایج با یکدیگر مقایسه شدند. در فاز میدانی با توجه به ماهیت حضور تولوئن و ترکیبات آلی فرار در جایگاه های سوخت، از ۶ نفر از اپراتورهای حاضر در محل، هنگام بیشینه حضور مراجعین در جایگاه (بیشترین زمان مواجهه) نمونه برداری فردی به صورت همزمان از هر دو نوع لوله نمونه بردار جاذب زغال فعال صورت گرفت. جهت کاهش خطا هر نوبت نمونه برداری سه مرتبه تکرار شد. سپس نتایج با یکدیگر مقایسه شد.

### یافته‌ها

بررسی ویژگی‌های ساختاری لوله‌های نمونه‌بردار جاذب ساخت داخل و تجاری

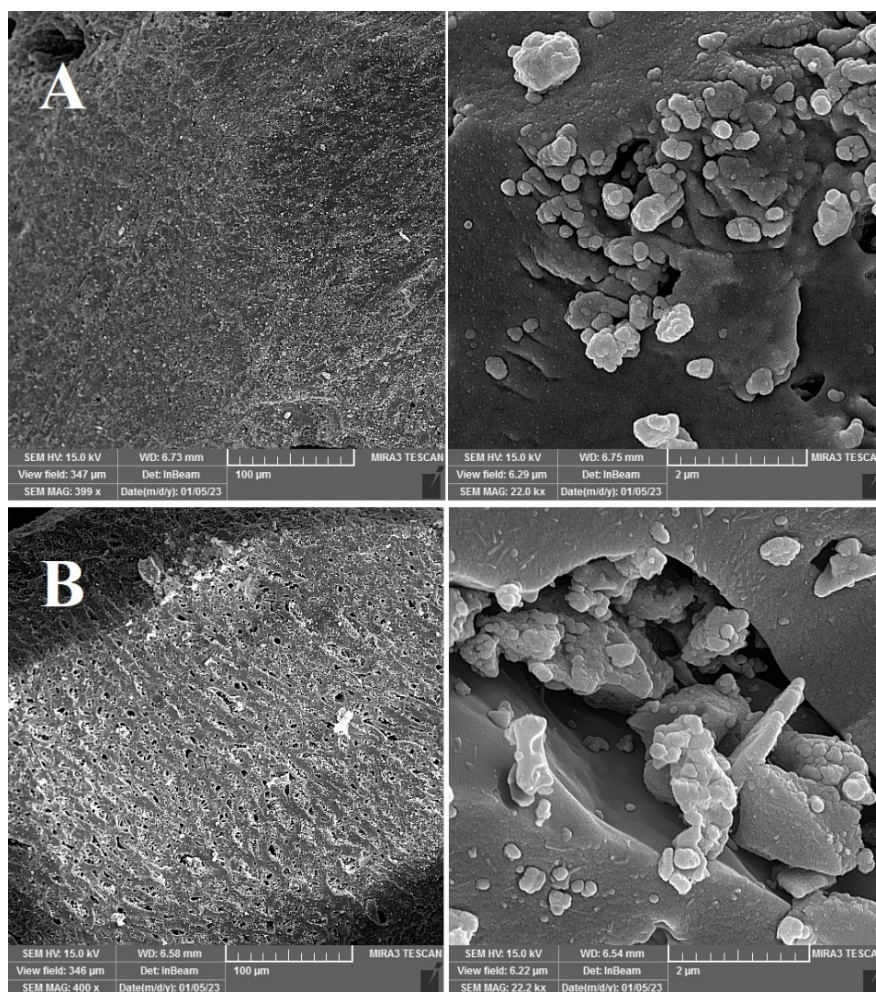
تصاویر گرفته‌شده با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح لوله‌های جاذب زغال فعال ساخت داخل و تجاری در شکل ۲ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود، ساختار متخلخل، وجود شیار و ذرات در محدوده‌ی نانومتر و میکرومتر بر روی هر دو جاذب مشهود می‌باشد.

نتایج حاصل از تست BET جهت تعیین سطح ویژه، میانگین قطر منافذ و حجم کل منافذ در جدول ۲ ارائه شده است. ایزوترم‌های جذب و واجذب آزمون BET برای

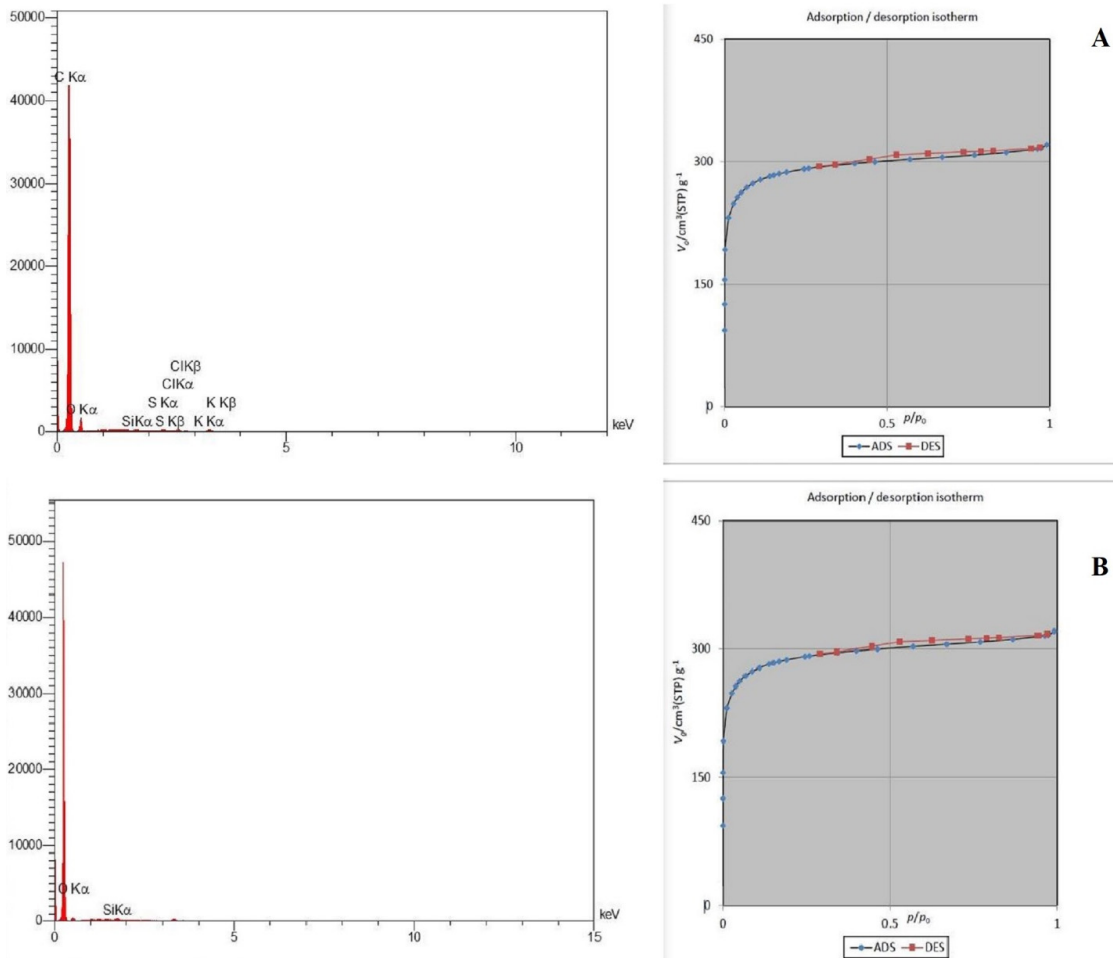
هر دو جاذب در شکل ۵ نشان داده شده است. مقدار حجم کل منافذ و نمودار توزیع اندازه حفرات نیز مطابق با جدول ۲ به دست آمده است.

نمودار آزمون EDAX جهت بررسی آنالیز عنصری و نمودار ایزوترم جذب/واجذب (BET) جاذب‌های نمونه‌بردار زغال فعال ساخت داخل و تجاری در شکل ۳ نشان داده شده است.

علاوه بر آن، درصد وزنی عناصر تشکیل‌دهنده هر دو نوع لوله در جدول شماره ۳ نشان داده شده است. همان‌طور که از جدول شماره ۳ می‌توان دید، در لوله جاذب تجاری، بیشتر از ۹۰ درصد ساختار جاذب فوق از کربن و کمتر از ۱۰ درصد آن از عناصر اکسیژن و سیلیس تشکیل شده است.



شکل ۲: تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (A) جاذب زغال فعال ساخت داخل (B) جاذب زغال فعال تجاری



شکل ۳: گراف آزمون EDAX در سمت چپ و نمودار ایزوترم جذب/واحدب سمت راست (A) لوله جاذب داخلی (B) تجاری

تجاری در شکل ۵ گزارش شده است.

نتایج حاصل از بررسی اعتبارسنجی روش آنالیز و جاذب های زغال فعال

به منظور بررسی حد تشخیص<sup>۱</sup> و حد کمیت<sup>۲</sup> در این مطالعه از منحنی کالیبراسیون ابزار کروماتوگرافی گازی استفاده شد که این مقادیر به ترتیب  $0.12 \mu\text{g/ml}$  و  $0.37 \mu\text{g/ml}$  تعیین شد. در این روش ارتباط خطی در محدوده  $0.5$  تا  $25 \mu\text{g/gm}$  با ضریب همبستگی  $0.98$  یافت شد. دقت و صحت روش با تزریق و آنالیز نمونه های استاندارد در چهار غلظت معین مختلف ( $5, 10, 15$  و  $20$

1. LOD
2. LOQ

بررسی اثرات تراکم آلاینده بر کارایی و ظرفیت جذب

در لوله های جاذب نمونه بردار

سطوح تراکمی آلاینده، در سه سطح از نصف مقدار حد مجاز مواجهه تولوئن تا دو برابر آن توسط روش طراحی مرکب مرکزی برآورد گردید و نمونه برداری صورت گرفت و مقادیر جذبی در هر سطح در هر دو نوع لوله جاذب نمونه بردار زغال فعال مقایسه شد (جدول ۴). نتایج بدست آمده مربوط به فاز آزمایشگاهی پژوهش بوده است.

نتایج حاصل از بررسی اثر همزمان زمان بازیافت و مقدار تراکم آلاینده ورودی بر مقدار تولوئن واجذب شده بر روی سطح جاذب های زغال فعال ساخت داخل و نوع

جدول ۳: درصد عناصر تشکیل دهنده لوله های جاذب نمونه بردار داخلی و تجاری براساس آنالیز عنصری

درصد وزنی عناصر تشکیل دهنده						
K	Cl	S	Si	O	C	نوع لوله جاذب نمونه بردار
۰	۰	۰	۱/۳۷	۸/۴۲	۹۰/۲۱	لوله جاذب نمونه بردار تجاری
۰/۳۱	۰/۴۶	۰/۳۳	۰/۹۴	۸/۸۹	۸۹/۰۷	لوله جاذب نمونه بردار ساخت داخل

جدول ۴: نوبت های برآورد شده توسط روش طراحی مرکب مرکزی و نتایج واجذب هر یک از لوله های نمونه بردار ساخت شرکت SKC و ساخت داخل

ردیف	std	زمان بازیافت نمونه (روز)	مقدار تراکم آلاینده (mg/m <sup>3</sup> )	مقدار جذب (mg/m <sup>3</sup> )
۱	۵	۰	۹۴/۲۱	داخلی
۲	۱۰	۱۵	۹۴/۲۱	SKC
۳	۴	۳۰	۱۵۰	۸۷/۳۴
۴	۲	۳۰	۳۷/۶۸	۱۰۰/۳
۵	۱	۰	۳۷/۶۸	۲۶/۵۱
۶	۱۱	۱۵	۹۴/۲۱	۳۳/۳۱
۷	۶	۳۰	۹۴/۲۱	۷۴/۶۵
۸	۷	۱۵	۳۷/۶۸	۶۹/۳۵
۹	۸	۱۵	۱۵۰	۳۰/۷۱
۱۰	۱۲	۱۵	۹۴/۲۱	۱۱۹/۳۱
۱۱	۹	۱۵	۹۴/۲۱	۷۷/۹۵
۱۲	۳	۰	۱۵۰	۸۱/۶۱
۱۳	۱۳	۱۵	۹۴/۲۱	۱۳۲/۲
				۶۴/۲۸

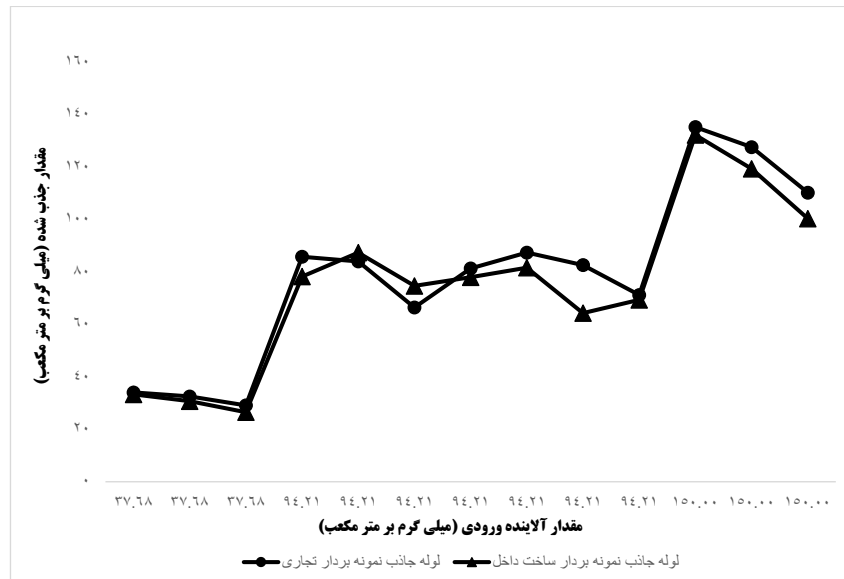
نسبی بهره گرفته شد. این مقدار برای جاذب زغال فعال ساخت داخل ۸/۲۴ درصد به دست آمد که نشان دهنده صحت ۹۱/۷۶ درصدی جاذب زغال فعال ساخت داخل نسبت به نتایج جاذب ساخت شرکت SKC می باشد.

بررسی کارآیی لوله های جاذب نمونه بردار با توجه به زمان بازیافت در فاز میدانی

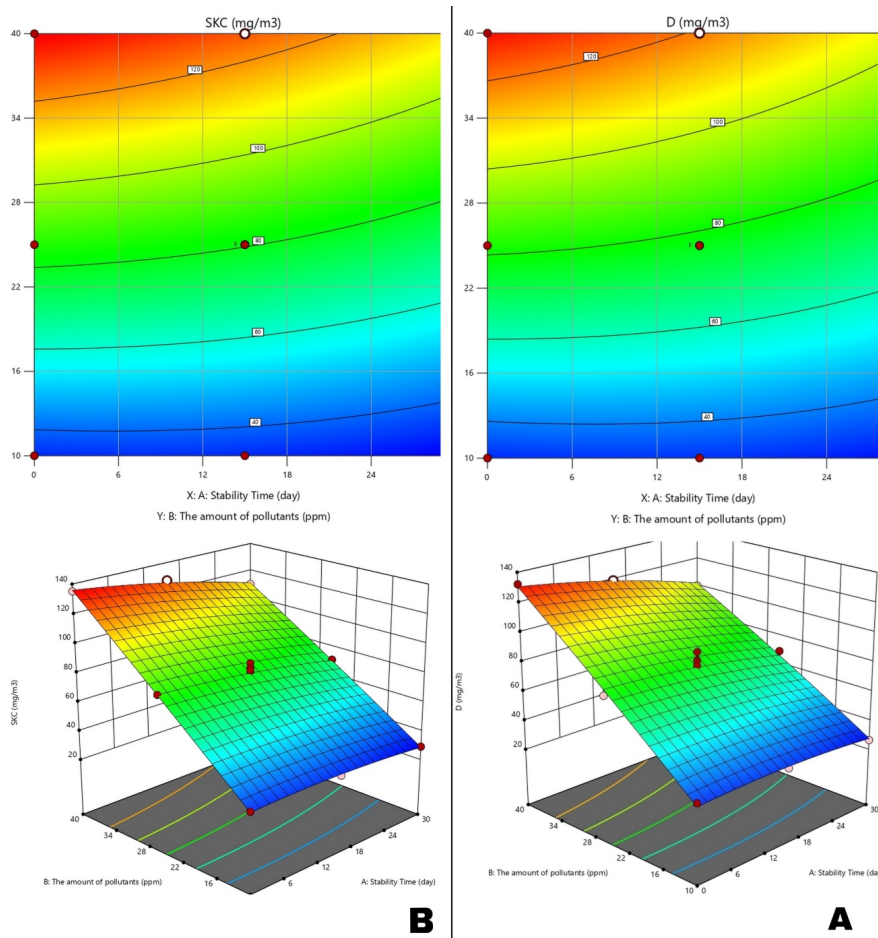
نتایج حاصل از نمونه برداری در فاز میدانی توسط جاذب های زغال فعال ساخت داخل و نوع تجاری و همچنین نتایج حاصل از بازیافت نمونه ها در سه بازه زمانی در نظر گرفته شده (بازه زمانی صفر، ۱۵ و ۳۰ روز) پس از نمونه برداری در شکل ۶ نشان داده شده است. میانگین مقدار گزارش شده در سه بازه زمانی تعریف شده

پی پی ام) ارزیابی شد. بازیابی بین ۹۵ الی ۱۰۵ درصد با انحراف استاندارد نسبی کمتر از ۵ درصد بود. مقدار carry over نیز کمتر از یک درصد برآورد گردید.

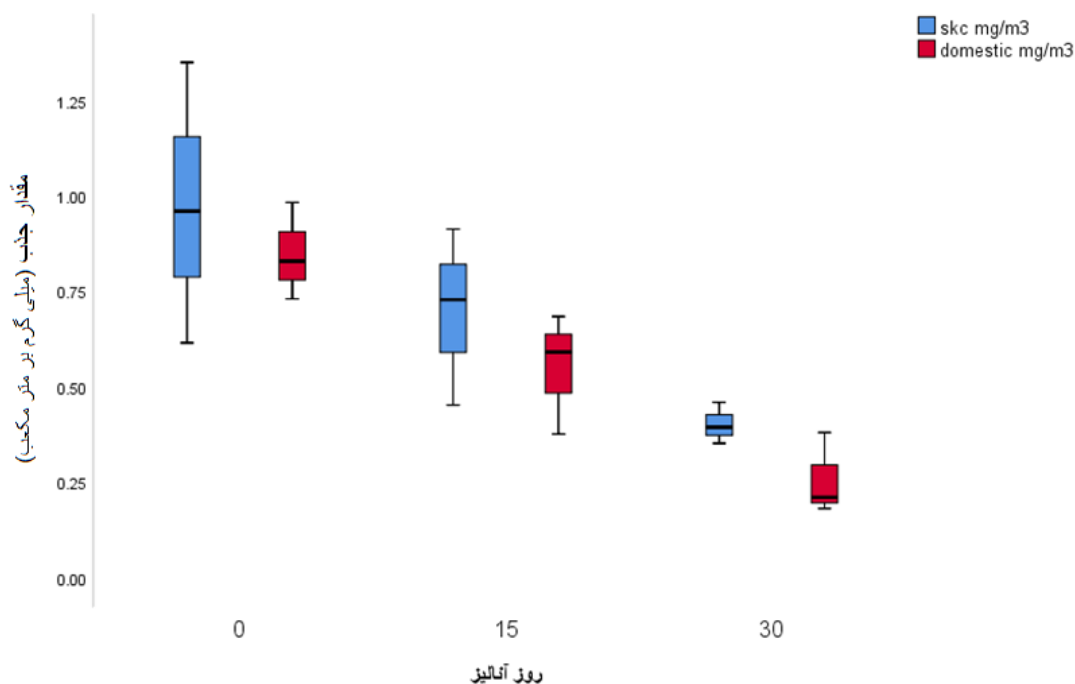
با توجه به ضریب تغییرات (CV/.) بدست آمده برای نتایج حاصل از مقادیر واجذب، این مقدار برای لوله جاذب زغال فعال ساخت داخل ۹/۲۳ درصد و برای جاذب SKC ۸/۰۲ درصد به دست آمد که به ترتیب نشان دهنده دقت ۹۰/۷۷ درصدی برای جاذب ساخت داخل و دقت ۹۱/۹۸ درصدی برای جاذب ساخت شرکت SKC است. همان طور که گفته شد به منظور بررسی صحت نتایج ارائه شده برای جاذب زغال فعال ساخت داخل، از نتایج حاصل از مقادیر واجذب جاذب هم نوع ساخت شرکت SKC به عنوان مرجع قابل ارائه جهت محاسبه درصد میانگین خطای



شکل ۴: مقدار جاذب لوله های جاذب نمونه بردار ساخت داخل و نوع تجاری در تراکم های مختلف از تولوئن



شکل ۵: منحنی سه بعدی پاسخ سطح جذب تولوئن برحسب زمان بازیافت نمونه و مقدار ورودی آلاینده در A-جاذب زغال فعال ساخت داخل B-جاذب زغال فعال تجاری



شکل ۶: مقدار جذب تولوئن نمونه برداری شده و نتایج بازیافت حاصل از آن در فواصل زمانی مشخص

قطر منافذ جاذب ساخت داخل و مدل تجاری که به ترتیب مقادیر ۱/۷۵۳ و ۱/۸۵ نانومتر را نشان داد، می‌توان طبق دسته بندی اتحادیه جهانی شیمی محض و کاربردی<sup>۱</sup> برای مواد متخلخل، هر دو جاذب را در دسته مواد متخلخل نوع یک یعنی میکرو منفذها قرار داد (۱۵). این مورد بررسی‌های حاصل از نتایج عکس برداری با میکروسکوپ الکترونی SEM را تایید می‌کند.

همان‌طور که نتایج حاصل از گراف‌های آزمون EDAX (شکل ۳) و جدول ۳ آنالیز عنصری لوله‌های جاذب نمونه بردار زغال فعال نوع تجاری و ساخت داخل نشان می‌دهد، بیشتر از ۹۰ درصد ساختار جاذب‌های فوق از کربن و کمتر از ۱۰ درصد آن از عناصر اکسیژن و سیلیس تشکیل شده است. بررسی مطالعات پیشین نیز نشان می‌دهند که ترکیب فوق ثابت نبوده و بستگی به نحوه و کیفیت فرآیند آماده سازی و فعال سازی کربن ترکیب دارد و اغلب با توجه به تغییرات فرآیند آماده‌سازی

برای لوله جاذب نمونه بردار زغال فعال تجاری به ترتیب ۰/۹۷۵، ۰/۶۹۵ و ۰/۴۰۱ میلی گرم بر مترمکعب و برای لوله جاذب نمونه بردار ساخت داخل به ترتیب ۰/۸۴۸، ۰/۵۵ و ۰/۲۵۷ میلی گرم بر مترمکعب بدست آمد.

### بحث

همان‌طور که از نتایج جدول شماره ۲ مشاهده می‌شود، مقدار سطح ویژه لوله جاذب نمونه بردار زغال فعال ساخت داخل با لوله جاذب نمونه بردار نوع تجاری تفاوت اندکی با یکدیگر دارند. نتایج حاصل از مطالعات لی و همکاران و همچنین اصیلیان و همکاران نیز سطح ویژه بستر لوله‌های جاذب زغال فعال ساخت شرکت SKC را به ترتیب مقدار ۱۰۰۴ و  $800 \text{ m}^2\text{g}^{-1}$  گزارش نمودند، که با نتایج بدست آمده از این مطالعه با مقادیر  $1078/8 \text{ m}^2\text{g}^{-1}$  برای جاذب زغال فعال تجاری و  $1071/3 \text{ m}^2\text{g}^{-1}$  برای جاذب ساخت داخل نزدیک بوده و هم‌خوانی دارند (۱۳). همچنین بر اساس اطلاعات بدست آمده از میانگین

1. International Union of Pure and Applied Chemistry

حد مجاز مواجهه تا دو برابر آن را در بین دو جاذب از لحاظ آماری نشان می‌دهد. بیشترین غلظت آلاینده واجذب شده توسط لوله های جاذب نمونه بردار تجاری  $132/2 \text{ ug/L}$  و در لوله های جاذب ساخت داخل  $135/12 \text{ ug/L}$  در روز ۰ (بلافاصله بعد از نمونه برداری) بدست آمد. کمترین غلظت آلاینده واجذب شده نیز به ترتیب  $29/12 \text{ ug/L}$  و  $33/31 \text{ ug/L}$  در روز ۳۰ به دست آمد. نتایج فوق نشان دهنده ی شباهت بالای ۹۷ درصدی بیشینه جذب در غلظت های بالا در روزهای ابتدایی و شباهت ۸۷ درصدی در کمترین تراکم ورودی در دو جاذب در روزهای انتهایی آنالیز است. از این رو مقادیر حاصل از جذب بیشینه با نتایج حاصل از آزمون BET نیز هم خوانی دارد.

در ارتباط با تاثیر زمان بازیافت بر روی هر دو جاذب مقدار ( $p\text{-value} < 0/05$ ) گزارش شد، که می توان نتیجه گرفت، مقدار تولوئن واجذب شده از لوله های جاذب زغال فعال با گذشت زمان کاهش می یابد. با بررسی نمودارهای دو بعدی و نمودار سه بعدی (شکل ۵) که به ترتیب ارتباط بین الگوی تراکم ورودی و زمان بازیافت را در جاذب های زغال فعال ساخت داخل و ساخت شرکت SKC نشان می دهند، می توان گفت که شیب خط تغییرات تولوئن واجذب شده در تراکم های پایین تر، کمتر از شیب خط در تراکم های بالاتر است. شیب تغییر مقدار تولوئن گزارش شده در تمامی غلظت ها از روز صفر ۰ تا ۱۵ بسیار کمتر از شیب تغییرات از روز ۱۵ الی ۳۰ روز است که این مطلب نشان دهنده پایداری نسبی هر دو لوله های جاذب زغال فعال تا محدوده ۱۵ روز پس از نمونه برداری است. تغییرات شیب غلظتی بین دو جاذب تفاوت بیشتر بین ارتباط زمان بازیافت و مقدار تولوئن واجذب شده را در جاذب زغال فعال ساخت داخل نسبت به مدل تجاری نشان می دهد (شکل ۵).

طی مطالعات منتشر شده توسط NIOSH تمامی لوله های نمونه بردار حاوی VOC ها به جز استایرن و نفتالن در صورتی که طی شرایط نگهداری دمایی ۵ درجه سانتیگراد و از ۷ الی ۳۰ روز پس از عملیات نمونه برداری

و فعال سازی کربن، تعداد و درصد وزنی عناصر شناسایی شده متفاوت خواهد بود (۱۶-۱۸) در مطالعه Reduane و همکاران نیز نشان داده شد که ساختار تشکیل دهنده جاذب زغال فعال عمدتاً متشکل از کربن و اکسیژن می باشد. طی این مطالعه ارتباط بین خواص جذبی بهتر با افزایش درصد وزنی کربن در جاذب های زغال فعال طی عملیات ساخت و فعال سازی مختلف نشان داده شد. از سوی دیگر آنان به ارتباط معکوس میان گروه های اکسیژنی و عوامل مداخله گر بر کارایی جذب در جاذب زغال فعال دست یافتند که با توجه به نتایج حاصل از آنالیز عنصری مطالعه حاضر و بررسی درصد وزنی کربن دو جاذب زغال فعال ساخت شرکت SKC و ساخت داخل که به ترتیب ۹۰/۲۱ و ۸۹/۰۷ درصد را نشان دادند می توان توانایی جذب بهتر را به صورت نامحسوسی در جاذب زغال فعال ساخت شرکت SKC به دلیل خلوص بالا تر کربن انتظار داشت که با نتایج حاصل از بیشینه جذب همخوانی دارد (۱۹).

نتایج آزمایش BET نشان داد که قطر اکثر منافذ هر دو جاذب در محدوده ی میکرو منفذها (قطر کمتر/ مساوی ۲ نانومتر) هستند و ملکول های جذب شونده میتوانند در تمامی سطوح منفذ جذب شوند. قطر ملکولی تولوئن در محدوده ی ۰/۶۵ تا ۰/۸۵ نانومتر متغیر است (۲۰). در مطالعه ای Rodenas و همکاران در بخشی از مطالعه خود، رفتار کربن های فعال با توزیع اندازه منافذ مختلف و گروه های اکسیژن سطحی برای جذب بنزن و تولوئن در غلظت های مختلف را مورد بررسی قرار دادند. آن ها ارتباط معناداری را بین ظرفیت جذب و تعداد میکرو منفذها در هر جاذب پیدا کردند که در مطالعه حاضر نیز این مهم در هر دو جاذب زغال فعال و شباهت در بافت هر دو ثابت شد (۲۱).

با توجه به شکل ۵ اثر تراکم های ورودی تولوئن با مقدار جذب شده آن بر روی سطح جاذب زغال فعال ساخت داخل و مدل تجاری (ساخت شرکت SKC) ارتباط معناداری را نشان داد که صحت چیدمان آزمایشگاهی و عملکرد مشابه در میزان تراکم ورودی در مقادیر نصف

در مقدار نتایج بدست آمده از میزان جذب در روزهای ۰ تا ۳۰ روز دارد.

با استفاده از آزمون Independent Samples T Test عملکرد کلی دو جاذب ساخت شرکت SKC و ساخت داخل در بازه زمانی ۰ الی ۳۰ روز تعیین شد که این مقدار دارای تفاوت معناداری نبود ( $0.42 > 0.05$ ). این نتایج نشان دهنده ارتباط معنی‌دار زمان استخراج آلاینده و تغییرات تراکم در لوله جاذب ساخت داخل و عدم ارتباط فاکتور فوق با لوله جاذب ساخت شرکت SKC می‌باشد. نتیجه به‌دست آمده برای لوله جاذب ساخت شرکت SKC در مغایرت با فاز آزمایشگاهی قرار دارد. طی مطالعه Esteve-Turrillas و همکاران (۲۰۰۷) تراکم تولوئن در جایگاه‌های سوخت به‌ویژه در طول زمان سوخت‌گیری وسایل بنزینی با مدت مواجهه ۴۰ دقیقه الی ۲ ساعت، میزان مواجهه با بخارات تولوئن در حدود ۲۲۰۰ میکروگرم بر مترمکعب هوا به‌دست آمد (۲۶). همچنین مصدق مهرجردی و همکاران تحت انجام مطالعه‌ای مقدار مواجهه با تولوئن در فضای جایگاه‌های سوخت شهر یزد را که با استفاده از کیسه‌های تدار و فیبر SPME نمونه برداری کردند، برابر با  $40.5 \pm 60.7$  میکروگرم بر مترمکعب به‌دست آوردند (۲۷). مقادیر گزارش شده از هر دو جاذب زغال فعال ساخت شرکت SKC و ساخت داخل در مطالعه حاضر نیز با توجه به تغییرات ناگهانی غلظتی مرتبط با پیک کاری در جایگاه‌های سوخت به مطالعات ذکر شده نزدیک بود.

### نتیجه‌گیری

نتایج این مطالعه نشان داد سطح ویژه، حجم کل و قطر منافذ، در جاذب زغال فعال ساخت داخل در مقایسه با مدل تجاری بسیار به یکدیگر شباهت دارند. این نتایج با اختلاف بسیار کمی از لحاظ کارایی جذب به نفع جاذب ساخت شرکت SKC بودند. این مورد با نتایج حاصل از آنالیز عنصری با استفاده از آزمون EDAX که مقادیر کم ناخالصی را در جاذب‌های زغال فعال ساخت داخل در مقایسه با مدل تجاری تشخیص داد همسو بود.

آنالیز شوند، ۷۵ درصد تراکم اولیه جذب شده را گزارش می‌کنند (۲۵) درصد کاهش نسبت به مقدار اولیه) که به عنوان یک بازیابی قابل قبول گزارش می‌شود (۲۲-۲۴). با توجه به این که در مطالعه حال حاضر کاهش مقادیر تولوئن واجذب شده در روز ۳۰ نسبت به روز صفر ارتباط معنا داری را نشان داد، اما درصد کاهش این مقدار برای زغال فعال ساخت شرکت SKC در بیشینه تراکم ورودی ۱۸/۵ درصد و در کمترین تراکم ورودی ۱۴/۴۷ درصد گزارش شد. همچنین این مقادیر برای جاذب زغال فعال ساخت داخل در بیشینه تراکم ورودی ۲۴/۱ درصد و برای کمترین تراکم ورودی ۲۰/۳۹ درصد به‌دست آمد که از نظر عملکرد شباهت نزدیکی با مطالعه فوق دارد.

قسمت عقبی تمامی لوله‌هایی جاذب جهت گزارش امکان وجود نقطه شکست، آنالیز شدند. در قسمت عقبی هیچ یک از نمونه‌های زغال فعال ساخت شرکت SKC و ساخت داخل در تراکم‌های ورودی مختلف، آلاینده‌ای شناسایی نشد. غلظت گزارش شده در بخش عقبی تمامی جاذب‌های نگهداری شده تا روز ۳۰ کمتر از یک میکروگرم گزارش شد. از این رو می‌توان نتیجه گرفت که کاهش مقادیر واجذب شده در بخش جلویی جاذب‌ها در روز ۳۰ به دلیل مهاجرت ماده جذب شونده از بخش جلویی به بخش عقبی لوله‌ها نبوده و این فرضیه رد می‌شود. امکان تداخل در سطح جاذب و عدم استخراج کامل جذب شونده از روی سطح جاذب تنها با حلال  $CS_2$  و عدم امکان استفاده از گرما می‌تواند از جمله دلایلی باشد که نیاز به بررسی و بحث بیشتر در سطح میکروسکوپی و شیمیایی دارد (۲۵).

نتایج حاصل از آزمون One Way Anova برای بررسی عملکرد جذب توسط هر جاذب در روزهای ۰ (بلافاصله پس از نمونه برداری) الی ۳۰ به کار برده شد. با توجه به مقدار عددی ( $0.05 > 0.084 = p\text{-value}$ ) برای جاذب تجاری می‌توان نتیجه گرفت تفاوت در میزان جذب در بازه‌های زمانی تعریف شده معنادار نبوده و همچنین در ارتباط با جاذب ساخت داخل این مقدار ( $0.05 < 0.05$ ) به‌دست آمد که نشان از معنادار بودن تفاوت ( $p\text{-value} =$



کارایی لوله‌های جاذب در تراکم‌های ورودی کمتر تولوئن را تایید کرد که این موضوع نشان دهنده احتمال خطای بیشتر در غلظت‌های کمتر آلاینده است. تاثیر زمان بر روی میزان آلاینده گزارش شده از جاذب‌های زغال فعال در فاز میدانی نشان داد که با گذشت زمان این فاکتور بر روی جاذب زغال فعال ساخت داخل بر خلاف جاذب مدل تجاری تاثیر گذاشته و ارتباط معنادار است. این مورد با توجه به متغیر بودن غلظت‌ها و همچنین خطای بیشتر در تراکم‌های کمتر آلاینده ورودی در فاز میدانی، می‌تواند قابل توجیه باشد.

در ارتباط با تعیین کارایی جاذب لوله‌های جاذب زغال فعال ساخت داخل در سه سطح تراکمی نتایج مشابهی با نتایج حاصل از جاذب زغال فعال مدل تجاری به دست آمد. اما به طور کلی میانگین مقادیر واجذب شده تولوئن از لوله‌های جاذب زغال فعال ساخت شرکت SKC بیشتر از جاذب زغال فعال ساخت داخل بود. عملکرد لوله‌های جاذب در بررسی مقادیر واجذب شده با گذشت زمان بازیافت ارتباط معناداری را در جهت عکس نشان داد ( $p\text{-value} < 0.05$ ). مطالعه حاضر وجود تغییرات ناگهانی بیشتر هنگام بررسی

## REFERENCES

- Marganda S, Ashar T. The effect of toluene exposure on central nervous disorder among printing workers. 2018.
- Wolkoff P. Volatile organic compounds. Indoor Air, Suppl. 1995;3:1-73.
- Mellouki A, Wallington T, Chen J. Atmospheric chemistry of oxygenated volatile organic compounds: impacts on air quality and climate. Chemical reviews. 2015;115(10):3984-4014.
- Hormozi M, Mirzaei R, Nakhaee A, Payandeh A, Izadi S, Haghghi JD, et al. Quantification of urinary metabolites of toluene and xylene isomers as biological indices of occupational exposure in printing industry workers. Health Scope. 2019;8(1).
- Arslan Ş, Uzunhasan I, Kocas BB, Cetinkal G, Arslan Ş, Kocas C, et al. Effect of chronic toluene exposure on heart rhythm parameters. Pacing and Clinical Electrophysiology. 2018;41(7):783-7.
- Tsao J-H, Hu Y-H, How C-K, Chern C-H, Yen DH-T, Huang C-I. Atrioventricular conduction abnormality and hyperchloremic metabolic acidosis in toluene sniffing. Journal of the Formosan Medical Association. 2011;110(10):652-4.
- Gunes F, Akbal E, Sen H, Temiz A. Dilated Cardiomyopathy and ventricular tachyarrhythmia due to toluene exposure. Int J Clin Res. 2013;1:22-3.
- Heidari M, Bahrami A, Ghasvand A, Ghorbani Shahna F, Soltanian A, Rafieiemam M. Application of Needle Trap Device Packed with Polydimethylsiloxane for Determination of Carbon Tetrachloride and Trichloroethylene in Air. Avicenna Journal of Clinical Medicine. 2014;21(1):32-40.
- Beykmohamadloo P, Yarahmadi R, Asilyan H, Ashtarinezhad A, Esmaili M. Modification of activated carbon by cold plasma and its effect on the adsorption of toluene. 2019.
- Samarghandi MR, Hadi M, Azizian S, Solaimany Aminabad M. Behavior parameters of pinecone derived activated carbon column for dye adsorption from aqueous solutions. Journal of Environmental Studies. 2012;37(60):117-28.
- Comparison of chemical, morphological and adsorptive properties of physically-activated carbons produced from walnut shell and peach core. Journal of Separation Science and Engineering. 2017;9(1):69-79.
- Prevention. CfDca. Hydrocarbons, Aromatic 1501. Cincinnati, OH.; 2003.
- Lee Y-S, Maitlo HA, Kim K-H, Kwon EE, Lee M-H, Kim J-C, et al. Utilization of activated carbon as an effective replacement for a commercialized three-bed sorbent (Carbopack) to quantitate aromatic hydrocarbons in ambient air. Environmental Research. 2019;179:108802.
- ASILIAN H, Khavaneen A, Hamoud I. Sampling of Benzene in The Air Using Natural Modified Iranian Zeolite (Purpose is Replacing of Activated Carbon). 2010.
- Thommes M, Kaneko K, Neimark AV, Olivier JP, Rodriguez-Reinoso F, Rouquerol J, et al. Physisorption of gases, with special reference to the evaluation of surface area and pore size distribution (IUPAC Technical

- Report). Pure and applied chemistry. 2015;87(9-10):1051-69.
16. Mopoung S, Moonsri B, Palas W, Khumpai S. Characterization and Properties of Activated Carbon Prepared from Tamarind Seeds by KOH Activation for Fe(III) Adsorption from Aqueous Solution. ScientificWorldJournal. 2015;2015:415961.
17. Wang J, Wu Z, Niu Q, Liu L, Yang L, Fu M, et al. Highly efficient adsorptive removal of toluene using silicon-modified activated carbon with improved fire resistance. Journal of Hazardous Materials. 2021;415:125753.
18. Corapcioglu MO, Huang CP. The surface acidity and characterization of some commercial activated carbons. Carbon. 1987;25(4):569-78.
19. Melouki R, Ouadah A, Llewellyn PL. The CO<sub>2</sub> adsorption behavior study on activated carbon synthesized from olive waste. Journal of CO<sub>2</sub> Utilization. 2020;42:101292.
20. Zhang W, Qu Z, Li X, Wang Y, Ma D, Wu J. Comparison of dynamic adsorption/desorption characteristics of toluene on different porous materials. Journal of Environmental Sciences. 2012;24(3):520-8.
21. Lillo-Ródenas MA, Cazorla-Amorós D, Linares-Solano A. Behaviour of activated carbons with different pore size distributions and surface oxygen groups for benzene and toluene adsorption at low concentrations. Carbon. 2005;43(8):1758-67.
22. Cassinelli ME, O'Connor P. NIOSH manual of analytical methods: National Institute for Occupational Safety and Health; 1994.
23. Taylor DG, Kupel RE, Bryant JM. Documentation of the NIOSH validation tests: US Department of Health, Education, and Welfare, Public Health Service ...; 1977.
24. Safety NIFO, Health. Hydrocarbons, aromatic: Method 1501. National Institute for Occupational Safety and Health Washington DC; 2003.
25. Kim YH, Kim KH. Extent of sample loss on the sampling device and the resulting experimental biases when collecting volatile fatty acids (VFAs) in air using sorbent tubes. Anal Chem. 2013;85(16):7818-25.
26. Esteve-Turrillas FA, Pastor A, de la Guardia M. Assessing air quality inside vehicles and at filling stations by monitoring benzene, toluene, ethylbenzene and xylenes with the use of semipermeable devices. Analytica Chimica Acta. 2007;593(1):108-16.
27. Mosaddegh Mehrjerdi MH, Tahmasebi N, Barkhordari FiroozAbadi A, Fallahzadeh H, Esmailian S, Soltanzadeh K. The investigation of exposure to benzene, toluene, ethylbenzene and xylene (BTEX) with Solid Phase Microextr action Method in gas station in Yazd province. ISMJ. 2014;16(6):419-27.