



University of Tehran Press

Journal of Environmental Studies

Vol. 50, No. 4, Winter 2025

Print ISSN: 1025-8620

Online ISSN 2345-6922

Homepage: [www.Jes.ut.ac.ir](http://www.Jes.ut.ac.ir)

## Spatiotemporal Variations of Potentially Toxic Elements in Dry Deposition of Hamedan Megacity, West of Iran; Levels and Ecological Risk

Bijan Haghi<sup>1</sup>, Mehrdad Cheraghi<sup>2</sup>, Soheil Sobhanardakani<sup>3</sup>,  
Bahareh Lorestani<sup>4</sup>, Maryam Kiani Sadr<sup>5</sup>

1. Department of the Environment, College of Basic Sciences, Hamedan Branch, Islamic Azad University, Hamedan, Iran. Email: [b.haghi@iauh.ac.ir](mailto:b.haghi@iauh.ac.ir)
2. Corresponding Author, Department of the Environment, College of Basic Sciences, Hamedan Branch, Islamic Azad University, Hamedan, Iran. Email: [cheraghi@iauh.ac.ir](mailto:cheraghi@iauh.ac.ir)
3. Department of the Environment, College of Basic Sciences, Hamedan Branch, Islamic Azad University, Hamedan, Iran. Email: [s\\_sobhan@iauh.ac.ir](mailto:s_sobhan@iauh.ac.ir)
4. Department of the Environment, College of Basic Sciences, Hamedan Branch, Islamic Azad University, Hamedan, Iran. Email: [lorestanib@iauh.ac.ir](mailto:lorestanib@iauh.ac.ir)
5. Department of the Environment, College of Basic Sciences, Hamedan Branch, Islamic Azad University, Hamedan, Iran. Email: [mkianisadr@iauh.ac.ir](mailto:mkianisadr@iauh.ac.ir)

### Article Info

**Article type:**  
Research Article

**Article history:**

Received 12 July 2024  
Received in revised form  
29 December 2024  
Accepted 23 January  
2025  
Available online  
28 February 2025

**Keywords:**

*Dry deposition,  
Ecological risk,  
Pollution index,  
Spatiotemporal variation,  
Toxic elements.*

### ABSTRACT

**Objective:** Airborne particulate matter, especially the fine particles, is known as a potential source of potentially toxic elements (PTEs) for people living in urban communities and can lead to adverse effects such as adhering to the surface of pulmonary epithelial cells and lung alveoli, acute inflammatory reaction on human health through inhalation, oral, and dermal contact routes, and also oxidative stress. Therefore, concern about the quality of dust and atmospheric depositions is vital. Since the similar studies in terms of the ecological risk assessment of arsenic (As), cadmium (Cd), chromium (Cr), manganese (Mn), and lead (Pb) in atmospheric dry deposition have not been previously conducted in the city of Hamedan, this study was performed to assess the spatiotemporal variations and ecological risks of PTEs in the dry deposition of Hamedan Megacity in 2023.

**Method:** In this descriptive cross-sectional study, a total of 144 dry deposition samples were collected from 12 sampling sites across four seasons. Following sample preparation and acid digestion, the concentrations of As, Cd, Cr, Mn, and Pb were determined using inductively coupled plasma-optical emission spectroscopy (ICP-OES). Additionally, various indices, including the pollution index (PI), integrated pollution index (IPI), ecological risk (Er), and the comprehensive potential ecological risk index (RI), were calculated to assess the pollution and ecological risks associated with these elements. Statistical analyses of the results were performed using SPSS statistical software.

**Results:** The results of determining the content of the elements revealed the significant impact of human activities, particularly those of industrial origin and traffic. The PI values indicated that the pollution levels of As, Cd, Cr, Mn, and Pb ranged from "low" to "high." Furthermore, the average IPI value of 1.73 suggested "moderate" pollution conditions in the study area. Ecological risk assessments demonstrated that in all sampled regions and seasons, the Er values for As, Cr, Mn, and Pb were categorized as "low risk," whereas Cd exhibited a "moderate" to "high" risk level. Additionally, the average RI value of 113 indicated a "moderate" level of hazard posed by dry deposition in the studied area. Notably, Cd, accounting for 68.3% of the ecological risk, had the most significant contribution to the overall ecological risk assessment.

**Conclusions:** In conclusion, it is recommended to conduct regular monitoring the concentrations of PTEs and perform ecological and health risk assessments of contaminated dry deposition. Such measures are essential for safeguarding the health of both the environment and the residents.

**Cite this article:** Haghi, B., Cheraghi, M., Sobhanardakani, S., Lorestani, B., & Kiani Sadr, M. (2025). Spatiotemporal Variations of Potentially Toxic Elements in Dry Deposition of Hamedan Megacity, West of Iran; Levels and Ecological Risk. *Journal of Environmental Studies*, 50 (4), 477- 500. <http://doi.org/10.22059/jes.2025.378315.1008511>

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.



DOI: <http://doi.org/10.22059/jes.2025.378315.1008511>

## Introduction

Atmospheric dry and wet depositions are the interfacial interchange mechanisms in the air–soil/water through which atmospheric aerosols or particulate matter (PM) enter terrestrial and aquatic ecosystems. Potentially toxic elements (PTEs) contents in wet and dry atmospheric depositions, particularly respirable dust particle pollution, have been significantly affected by human activities. Notably, atmospheric deposition is one of the important pathways for the transport of metal pollutants from the atmosphere. On the contrary to wet deposition, dry deposition is a dominant process, particularly in urban environments and also areas with little precipitation. The dry deposition not only leads to PTEs pollution in the environmental media (such as plants, soil, and water) and continuous damage to urban ecosystem, but can also present a serious and potential threat to citizens' health through inhalation, ingestion, and dermal contact. Hence, given the importance of atmospheric dry deposition as the primary source and carrier of PTEs as well as the serious and significant impacts of toxic elements associated with it on the ecosystem and public health, the evaluation of the concentration and contamination levels of dry deposition PTEs, as an effective and excellent indicator of urban air quality, has been receiving increasing attention. The level and abundance of PTEs may act as a mirror of existing pollution scenario in a specific area. Due to the fact that the presence of high amounts of PTEs in the environment leads to a potential risk for human health and also for the environment, the main purposes of the present study were: (1) to assess the spatiotemporal variations of PTEs (As, Cd, Cr, Mn, and Pb) levels in dry deposition samples, (2) to determine the PTEs contamination and the ecological risks resulting from them by measuring common contamination indices (i.e. PI, IPI, ER, and RI), and (3) to evaluate the spatiotemporal variations and of analyzed PTEs in the dry deposition of Hamedan Megacity, in the west of Iran in 2023.

## Method

In this descriptive cross-sectional study, a total of 144 atmospheric dry deposition samples were collected during the spring to winter seasons in 2023 from 12 selected sites in the three functional regions of the city of Hamedan including industrial (IND), commercial (COMM) and residential (RES) areas. The atmospheric dry deposition sampling at all sites was conducted in three replicates using high density polyethylene bottles with an opening diameter of 30.0 cm fixed at a height of 1.50 m above ground level. After preparation and acid digestion of samples in the laboratory, tested element contents were determined using inductively coupled plasma-optical emission spectroscopy (ICP-OES). The concentrations of As, Cd, Cr, Mn, and Pb were obtained at wavelengths (nm) of 188.980, 226.502, 267.716, 257.610, and 220.353, respectively. Also, the pollution index (PI), integrated pollution index (IPI), and ecological risk index (RI) were calculated. Moreover, all statistical analyses including Shapiro-Wilk, Leven, One-Way ANOVA and Duncan Multiple Range Tests were performed using the SPSS statistical package. The quality assurance (QA) and quality control (QC) were evaluated using reagent blanks, duplicates (15%), and certified reference materials (RTC, SQC-014, Sigma-Aldrich, Spain). The relative standard deviation of the duplicate specimens achieved less than 5%, and the recovery of the standard materials ranged from 91.2 to 98.7%, indicating good accuracy. The obtained values of limit of detection (LOD) for As, Cd, Cr, Mn, and Pb were 0.061, 0.076, 0.068, 0.065, and 0.058 mg kg<sup>-1</sup>, respectively, and their limits of quantification (LOQ) were found to be 0.185, 0.227, 0.206, 0.197, and 0.172 mg kg<sup>-1</sup>, respectively. To assess PTEs contamination and ecological risks of dry deposition samples, pollution index (PI), integrated pollution index (IPI), ecological risk (Er), and the comprehensive potential ecological risk index (RI), were calculated using equations 1 to 4:

$$PI = \frac{C_{\text{sample}}}{C_{\text{background}}} \quad (1)$$

$$IPI = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n PI_i \quad (2)$$

$$Er_i = Tr_i \left( \frac{C_s^i}{C_b^i} \right) \quad (3)$$

$$RI = \sum_{i=1}^n Er_i \quad (4)$$

## Results

The concentrations of PTEs based on the ANOVA test results varied significantly among seasons and functional regions. The greatest quantities of As, Cd, Mn, and Pb with 5.12, 0.655, 12.6, 73.1 mg kg<sup>-1</sup> were seen in the fall samples; however, the highest concentrations of Cr with 41.6 mg kg<sup>-1</sup> belonged to the spring samples. It has been proven that the variations in climatic conditions and also human activities have a significant role in temporal variations of PTEs in dry deposition. Therefore, the greatest amounts of As, Cd, Mn, and Pb in the fall may be related to the increase in fuel consumption (particularly home heating) as a result of lower temperatures. Besides, with the beginning of the academic year in this season, traffic increases significantly, which can cause an increase in the content of PTEs in fall dry depositions. Similar findings were also reported in some previous studies (Sobhanardakani, 2018a; Kermani et al., 2021; Ali-Taleshi et al., 2022). Also, the highest content of Cr in the spring could mainly be attributed to construction activities as also reported in similar studies (Men et al., 2021; Ariapak et al., 2022). On the other hand, the industrial regions contained the greatest concentrations of As, Cd, Cr, (5.92, 0.794, and 49.9 mg kg<sup>-1</sup>, respectively); whereas, compared with the other two regions, the commercial areas exhibited the highest levels of Mn and Pb with 15.6 mg kg<sup>-1</sup> and 91.5 mg kg<sup>-1</sup>, respectively. Besides, the amounts of all the analyzed PTEs except Mn and Pb in various land uses decreased in the order of industrial > commercial > residential, while for manganese and lead, they ranked in the order of COMM > IND > RES. The remarkable variation of PTE contents between the functional regions could be attributed to the considerable effects of human inputs and the diversity of their emission sources, which was consistent with the findings of another similar study (Li et al., 2021). Meanwhile, the higher contents of As, Cd, and Cr in dry deposition samples of IND regions could be attributed to the local industrial activities including leather products, food and beverage, vehicle repair centers, consistent with findings reported in similar previous studies (Chen et al., 2019; Cai et al., 2022). However, the elevated levels of Mn and Pb in commercial regions would indicate their association with vehicle emissions, as also noted by other researchers (Weerasundara et al., 2018). The mean values of PI (average of whole areas) for the investigated PTEs decreased in the following order: Cd > As > Pb > Cr > Mn. Also, the cumulative mean PI values indicated that the pollution levels of As, Cd, Cr, Mn, and Pb ranged from "low" to "high." Furthermore, the average IPI value of 1.73 suggested "moderate" pollution conditions in the study area. Overall, spatiotemporal changes in pollution indices (PI and IPI) for PTEs in dry deposition would indicate the strong impacts of variations or oscillations of human inputs. These results are consistent with those obtained by other researchers' findings who reported that the spatiotemporal changes in the contents of elements in dry deposition are seriously affected by human activities (Kara et al., 2014; Schiavo et al., 2023; Vizuite-Jaramillo et al., 2024). Also, the RI values for As, Cr, Mn, and Pb were categorized as "low risk," whereas Cd exhibited a "moderate" to "high" risk level. Meanwhile, the RI value of 113 indicated a "moderate" level of hazard posed by atmospheric dry deposition in the studied area. Notably, Cd, accounting for 68.3% of the ecological risk, had the most significant contribution to the overall ecological risk assessment.

## Conclusions

This study emphasizes the need for preventive and corrective measures to mitigate the level of pollution and potential adverse effects on the urban ecosystem. The findings can guide future measures, including implementing strategies such as improving and optimizing traffic management policies and strategies and industrialization process, all of which could play pivotal roles in controlling and reducing PTEs pollution within the studied area. In conclusion, it is recommended to conduct regular monitoring of the concentrations of PTEs and perform ecological and health risk assessments of contaminated dry deposition. Such measures are essential for safeguarding the health of both the environment and the residents.

## Author Contributions

Material preparation, data collection and analysis were performed by Bijan Haghi, Mehrdad Cheraghi, Soheil

Sobhanardakani, Bahareh Lorestani, and Maryam Kiani Sadr. The first draft of the manuscript was written by Bijan Haghi and Soheil Sobhanardakani and all authors commented on previous versions of the manuscript. The corresponding author ensuring that all the listed authors have approved the manuscript before submission, including the metadata.

#### **Data Availability Statement**

The authors declare that they haven't need research data support with this submission. Also, the authors are sure that all data and materials as well as software application or custom code support their published claims and comply with field standards.

#### **Acknowledgements**

The authors are grateful to the Hamedan Branch, Islamic Azad University for providing facilities to conduct and complete this study.

#### **Ethical considerations**

The authors avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct.

#### **Funding**

Not applicable.

#### **Conflict of interest**

The authors declare no conflict of interest.



## پردازش مکانی- زمانی عناصر بالقوه سمی در رسوب خشک هوای کلان‌شهر همدان، غرب ایران؛ تعیین غلظت و ریسک بوم‌شناختی

بیژن حقی<sup>۱</sup>، مهرداد چراغی<sup>۲</sup>✉، سهیل سبجان اردکانی<sup>۳</sup>، بهاره لرستانی<sup>۴</sup>، مریم کیانی صدر<sup>۵</sup>

۱. گروه علوم و مهندسی محیط‌زیست، دانشکده علوم پایه، واحد همدان، دانشگاه آزاد اسلامی، همدان، ایران، رایانامه: [b.haghi@iauh.ac.ir](mailto:b.haghi@iauh.ac.ir)
۲. نویسنده مسئول، گروه علوم و مهندسی محیط‌زیست، دانشکده علوم پایه، واحد همدان، دانشگاه آزاد اسلامی، همدان، ایران، رایانامه: [cheraghi@iauh.ac.ir](mailto:cheraghi@iauh.ac.ir)
۳. گروه علوم و مهندسی محیط‌زیست، دانشکده علوم پایه، واحد همدان، دانشگاه آزاد اسلامی، همدان، ایران، رایانامه: [s\\_sobhan@iauh.ac.ir](mailto:s_sobhan@iauh.ac.ir)
۴. گروه علوم و مهندسی محیط‌زیست، دانشکده علوم پایه، واحد همدان، دانشگاه آزاد اسلامی، همدان، ایران، رایانامه: [lorestanib@iauh.ac.ir](mailto:lorestanib@iauh.ac.ir)
۵. گروه علوم و مهندسی محیط‌زیست، دانشکده علوم پایه، واحد همدان، دانشگاه آزاد اسلامی، همدان، ایران، رایانامه: [mkianisadr@iauh.ac.ir](mailto:mkianisadr@iauh.ac.ir)

| اطلاعات مقاله   | چکیده  |
|---|--|
| <b>نوع مقاله:</b><br>مقاله پژوهشی   | <b>هدف:</b> ذرات معلق در هوا به‌ویژه ذرات ریز به‌عنوان منبع عناصر بالقوه سمی (PTEs) برای افراد ساکن در جوامع شهری شناخته شده است و قرار گرفتن در معرض آن‌ها از طریق استنشاق، گوارش و همچنین تماس پوستی می‌تواند منجر به بروز اثرات نامطلوب ریوی و استرس اکسیداتیو شود. بنابراین، ارزیابی کیفیت و آلودگی گردوغبار و رسوبات جوی ضروری است. بر این اساس، این پژوهش با هدف ارزیابی تغییرات مکانی- زمانی و ریسک بوم‌شناختی عناصر بالقوه سمی (آرسنیک، سرب، کادمیم، کروم و منگنز) رسوب خشک جوی شهر همدان در سال ۱۴۰۲ انجام یافت.  |
| <b>تاریخ دریافت:</b> ۱۴۰۳/۰۴/۲۲   | <b>روش پژوهش:</b> در این پژوهش توصیفی- مقطعی، در مجموع ۱۴۴ نمونه رسوب خشک جوی از ۱۲ مکان نمونه‌برداری طی چهار فصل برداشت شد. پس از آماده‌سازی و هضم اسیدی نمونه‌ها در آزمایشگاه، محتوی عناصر در آن‌ها به‌روش طیف‌سنجی نوری پلاسما جفت شده القایی (ICP-OES) خوانده شد. مقادیر شاخص‌های آلودگی (PI)، آلودگی یکپارچه (IPI)، ریسک بالقوه بوم‌شناختی (Er) و ریسک بالقوه بوم‌شناختی تجمعی (RI) محاسبه شدند.  |
| <b>تاریخ بازنگری:</b> ۱۴۰۳/۱۰/۰۹  | <b>یافته‌ها:</b> نتایج تعیین محتوی عناصر بیان‌گر تأثیر فعالیت‌های انسانی به‌ویژه با منشأ صنعتی و ترافیک بود. محاسبه شاخص PI نشان داد که آلودگی عناصر آرسنیک، سرب، کادمیم، کروم و منگنز، «کم» تا «زیاد» بوده است. همچنین، میانگین مقادیر شاخص IPI با ۱/۷۳، شرایط آلودگی «متوسط» در منطقه مورد مطالعه را نمایندگی کرد. نتایج ارزیابی ریسک بوم‌شناختی نشان داد که در همه مناطق و فصول نمونه‌برداری مقادیر شاخص Er برای عناصر آرسنیک، سرب، کروم و منگنز در طبقه خطر «کم» و برای عنصر کادمیم در طبقه خطر «متوسط» تا «زیاد» قرار داشت. از طرفی، میانگین مقادیر شاخص RI برابر با ۱۱۳ و بیان‌گر سطح خطرزایی بوم‌شناختی تجمعی «متوسط» رسوب خشک جوی در منطقه مورد مطالعه بود. همچنین، کادمیم با ۶۸/۳٪ از بیشترین سهم در ایجاد خطر بوم‌شناختی برخوردار بود. |
| <b>تاریخ انتشار:</b> ۱۴۰۳/۱۲/۱۰   | <b>نتیجه‌گیری:</b> به‌منظور حفظ سلامت محیط و شهروندان نسبت به پایش منظم محتوی عناصر بالقوه سمی و ارزیابی ریسک بوم‌شناختی و سلامت رسوب خشک جوی آلوده به‌ویژه در مناطق با آلودگی زیاد توصیه می‌شود.  |
| <b>کلیدواژه‌ها:</b><br>تغییرات مکانی-زمانی، رسوب خشک جوی، ریسک بوم‌شناختی، شاخص آلودگی، عناصر سمی.  |  |
| <b>استناد:</b> حقی، بیژن؛ چراغی، مهرداد؛ سبجان اردکانی، سهیل؛ لرستانی، بهاره؛ و کیانی صدر، مریم. (۱۴۰۳). پردازش مکانی- زمانی عناصر بالقوه سمی در رسوب خشک هوای کلان‌شهر همدان، غرب ایران؛ تعیین غلظت و ریسک بوم‌شناختی. نشریه محیط‌شناسی، ۵۰ (۴)، ۴۷۷-۵۰۰.<br><a href="http://doi.org/10.22059/jes.2025.378315.1008511">http://doi.org/10.22059/jes.2025.378315.1008511</a> |  |
| <b>ناشر:</b> انتشارات دانشگاه تهران.  | © نویسندگان.   |
|   | DOI: <a href="http://doi.org/10.22059/jes.2025.378315.1008511">http://doi.org/10.22059/jes.2025.378315.1008511</a>   |
|   | DOR: 20.1001.1.10258620.1403.50.4.5.8  |



## ۱. مقدمه

هوای پاک پیش‌نیازی ضروری و اساسی برای حفظ کیفیت محیط‌زیست، رشد و توسعه اقتصادی، سیاسی، اجتماعی و فرهنگی جوامع انسانی است. با این حال، بروز و روند رو به رشد آلودگی هوا به‌عنوان یکی از مهم‌ترین مشکلات محیط‌زیستی بوم‌سامانه‌های شهری نمودی از بازخورد فعالیت‌های ناپایدار انسانی در زیست‌بوم شهری محسوب می‌شود (سبحان اردکانی و همکاران، ۱۳۸۵؛ Lima et al., 2023). در میان آلاینده‌های مختلف هوا، ذرات معلق به‌عنوان مخلوط جامد پیچیده‌ای از مواد معدنی، آلی و زیستی با منشأ طبیعی یا انسان‌پدید، منبع بالقوه انتقال آلودگی و یکی از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر کیفیت هوا و سلامت بوم‌سازگان به‌شمار می‌آید (Kabir et al., 2021). این خصوصاً، ذرات جوی ترسیب شده بر سطوح آبی و خشکی به‌عنوان رسوب خشک یا مرطوب جوی، به‌سبب توزیع گسترده و قابلیت ایجاد آلودگی ثانویه از طریق تبدلات محیطی (هوا، خاک و آب) حایز اهمیتی ویژه هستند (Han et al., 2020; Vithanage et al., 2022). فرونشست‌های جوی، افزون بر انتقال آلاینده‌های جوی به سطوح خشکی و آبی، نقش مهمی در انتشار و انباشت آلاینده‌ها در محیط دارند (Bao et al., 2019; Penezic et al., 2021). در میان انواع آلاینده‌های محیطی متصل به ذرات رسوب جوی، عناصر بالقوه سمی با منشأ طبیعی و انسانی به‌سبب پایداری و سمیت زیاد، نیم‌عمر زیستی طولانی و قابلیت تجمع و انباشت زیستی به‌عنوان یک نگرانی مهم بوم‌شناختی، زیستی و بهداشت عمومی در مقیاس جهانی، سبب تشدید تهدیدات محیط‌زیستی به‌ویژه در کلان‌شهرها شده‌اند (Sobhanardakani and Jamshidi, 2015; Sobhanardakani, 2019; Lv et al., 2023). آرسنیک، سرب، کادمیم، کروم و منگنز از مهم‌ترین و رایج‌ترین عناصر بالقوه سمی در زیست‌بوم شهری به‌شمار می‌آیند که قرار گرفتن در معرض غلظت‌های بیشتر از حد مجاز آن‌ها می‌تواند به اختلالات تنفسی، بیماری‌های قلبی-عروقی، کلیوی، آسیب‌های پوستی و عصبی، اثرات تراژونیک و انواع مختلف سرطان منجر شود (Sabet Aghlidi et al., 2020; Mohebian et al., 2021).

آلاینده‌های فلزی که به‌طور عمده به‌صورت ذرات معلق در جو انتشار می‌یابند، در نهایت از طریق فرونشست‌های خشک و مرطوب جوی بر روی سطح زمین رسوب می‌کنند (Paithankar et al., 2021). در این خصوص، رسوب خشک جوی، فرآیند انتقال گازها و آلاینده‌های ذره‌ای از هوا به سطح زمین بدون وقوع بارش، و رسوب مرطوب جوی نیز به‌مفهوم پاکسازی آلاینده‌های ذره‌ای هوا از طریق بارش برف یا باران است. بر خلاف رسوب مرطوب جوی، رسوب خشک به‌عنوان فرآیندی مستمر که می‌تواند در حدود ۶۰ درصد مجموع آلاینده‌های ذره‌ای جوی را به‌ویژه در مناطق با بارش اندک پاکسازی کند، مهم‌ترین مسیر ورود عناصر کمیاب هوا به محیط محسوب می‌شود (Sobhanardakani, 2018a). با استناد به نتایج تجربی، رسوب خشک جوی ۸۵-۲۵ درصد از کل ورودی عناصر بالقوه سمی به محیط را تشکیل می‌دهد (Ye et al., 2018). به‌طور کلی، انتقال مداوم عناصر فلزی توسط رسوب خشک جوی به ماتریس‌های مختلف محیطی (آب، خاک و گیاه) و انباشت آن‌ها به‌ویژه در زنجیر غذایی تهدیدی بالقوه برای سلامت زیست‌مندان و انسان محسوب می‌شود. به‌علاوه، مواجهه مستقیم شهروندان با ذرات رسوب جوی آلوده به عناصر کمیاب (از طریق بلع، استنشاق و تماس پوستی) می‌تواند منجر به تشدید اثرات نامطلوب عناصر بر سلامت انسان شود (Anake et al., 2017; Juda-Rezler et al., 2021). از این‌رو، رسوب خشک جوی به‌عنوان منبع و حامل آلاینده‌های محیطی، ابزاری مهم در ارزیابی و تعیین ریسک بالقوه بوم‌شناختی و سلامت مرتبط با عناصر کمیاب جوی محسوب می‌شود (Yu-Xiao et al., 2023; Dharaka and Priyantha, 2024).

امروزه، تعیین محتوی عناصر بالقوه سمی در رسوب خشک جوی به‌عنوان یک راهکار مؤثر و اقتصادی برای ارزیابی آلودگی بوم‌سازگان شهری در راستای حفظ کیفیت و سلامت آن توجه فزاینده‌ای را به‌خود جلب کرده است (Selahvarzi et al., 2024). در این راستا، شاخص‌های آلودگی و آلودگی یکپارچه از ابزارهای مناسب و مفید برای تعیین سطح آلودگی و برآوردی جامع از میزان آلودگی رسوب خشک جوی به عناصر بالقوه سمی به‌شمار می‌آیند (Sobhanardakani and Ghoochian, 2016). از سوی دیگر، ارزیابی ریسک بالقوه بوم‌شناختی عناصر بالقوه سمی ابزاری کارآمد برای شناسایی خطرات احتمالی و بالقوه محیط‌زیستی ناشی از انباشت عناصر فلزی است (حسینی و سبحان اردکانی، ۱۴۰۱). همچنین، تعیین تغییرات مکانی و زمانی محتوی و آلودگی عناصر بالقوه سمی رسوب خشک جوی برای درک، تجزیه و تحلیل و کنترل منابع آلودگی حایز اهمیتی ویژه است (Yang et al., 2024).

بنابراین، نظر به اهمیت موضوع و با توجه به توسعه شهری، صنعتی، افزایش ترافیک درون شهری و کاهش بارندگی‌ها از یک سو، و اثرات نامطلوب آلودگی احتمالی رسوب خشک جوی بر کیفیت محیط و سلامت شهروندان، تعیین محتوی عناصر بالقوه سمی در رسوب خشک هوا سپهری شهر همدان از اهمیتی به سزا برخوردار است. این در حالی است که طبق بررسی سوابق، تاکنون مطالعه منسجم و هدفمندی در رابطه با تعیین محتوی و ارزیابی ریسک بوم‌شناختی عناصر بالقوه سمی در رسوب خشک جوی شهر همدان انجام نیافته است. از این رو، این پژوهش برای اولین بار با هدف تعیین محتوی، پردازش مکانی-زمانی و ارزیابی ریسک بوم‌شناختی عناصر بالقوه سمی در رسوب خشک جوی شهر همدان در سال ۱۴۰۲ انجام شد. از طرفی، در خصوص نوآوری این پژوهش نیز می‌توان به ارزیابی تغییرات فصلی میانگین محتوی عناصر سمی مورد بررسی به تفکیک نوع کاربری به عنوان ابزاری مهم برای تسهیل در ارائه سیاست‌های محیط‌زیستی از طریق اقدامات پیشگیرانه و اصلاحی اشاره کرد.

## ۲. ادبیات موضوع و پیشینه پژوهش

ترکیب رسوب خشک جوی شاخصی ارزشمند برای توصیف کیفیت بوم‌سامانه شهری است که از طریق بررسی آن می‌توان به اطلاعات کمی در رابطه با سطوح مختلف آلاینده‌های محیط به‌ویژه عناصر بالقوه سمی دست یافت (Fu et al., 2023). از این رو، تاکنون مطالعه‌های متعددی در رابطه با ارزیابی آلودگی و ریسک بوم‌شناختی عناصر بالقوه سمی رسوب خشک جوی در شهرهای مختلف در سراسر دنیا در راستای حفظ سلامت بوم‌سازگان شهری و شهروندان انجام شده است که در این خصوص می‌توان به پژوهش‌های کارا و همکاران (۲۰۱۴) در شهر آلیاگا ترکیه، ورسودارا و همکاران (۲۰۱۸) در شهر کندی سریلانکا، چن و همکاران (۲۰۱۹) در منطقه تایپو چین، علی طالشی و همکاران (۱۳۹۹) در شهر تهران ایران، ارسلانی و علیجانی (۱۴۰۰) در شهر تهران ایران، امین‌فر، لندی و حجتی (۱۴۰۰) در شهر خرمشهر ایران، اسپچائو و همکاران (۲۰۲۳) در شهر سونورا مکزیک، یواکسیو و همکاران (۲۰۲۳) در جزیره پنزیایو دریای چین شرقی، ما و همکاران (۲۰۲۴) در شهرهای مختلف چین و ویزوت-جارامیلو و همکاران (۲۰۲۴) در شهر هرموسیلو مکزیک اشاره کرد (علی طالشی و همکاران، ۱۳۹۹؛ ارسلانی و علیجانی، ۱۴۰۰؛ امین‌فر، لندی و حجتی، ۱۴۰۰؛ Kara et al., 2014; Weerasundara et al., 2018; Chen et al., 2020; Ma et al., 2024; Vizuete-Jaramillo et al., 2024; Yu-Xiao et al., 2023; Schiavo et al., 2019). با این حال، در تعداد اندکی از آن‌ها نسبت به ارزیابی تغییرات مکانی- زمانی آلودگی فلزی رسوب خشک جوی اقدام شده است (Kermani et al., 2021; Ma et al., 2024).

یوشیائو همکاران (۲۰۲۳) با ارزیابی تغییرات فصلی و منشاء عناصر سمی رسوب خشک جوی در جزیره پنزیایو دریای چین گزارش کردند که منشاء عناصر آرسنیک، روی، سرب، کادمیم، کبالت، کروم، مس، منگنز، نیکل و وانادیم به‌طور عمده انسان‌زاد بوده است و فعالیت‌های صنعتی و ترافیکی به‌عنوان عوامل اصلی آلودگی رسوب خشک جوی معرفی شدند (Yu-Xiao et al., 2023). سلگی و عبداللهی (۱۴۰۱) با بررسی محتوی و آلاینده‌های عناصر بالقوه سمی در رسوبات اتمسفری شهر زاهدان گزارش کردند که کمینه و بیشینه میانگین غلظت عناصر مورد ارزیابی با ۲۷۰ و ۲۰/۷ میلی‌گرم در کیلوگرم به‌ترتیب مربوط به عناصر سرب و کادمیم بوده است. همچنین، آلودگی عناصر مس و روی رسوبات اتمسفری شهر زاهدان در محدوده «کم» و آلودگی عناصر سرب و کادمیم نیز به‌ترتیب در محدوده «زیاد» و «بسیار زیاد» گزارش شد. به‌علاوه، مشخص شد که بیشینه محتوی عناصر روی، سرب، کادمیم و مس مربوط به مناطق مرکزی شهر و ناشی از منابع انسان‌پدید بوده است.

عبداللهی و همکاران (۱۴۰۰) با بررسی تغییرات کمی، شاخص‌های آلودگی و توزیع غلظت عناصر کمیاب سرب و کادمیم در غبار ریزشی شهر زاهدان نتیجه گرفتند که مقادیر شاخص آلودگی عنصر سرب در غبار ریزشی شهر زاهدان در فصول زمستان (۱/۲۱) و بهار (۱/۱۲)، «متوسط» و مقادیر شاخص برای عنصر کادمیم در فصول زمستان (۱۸/۶) و بهار (۱۴/۸)، «زیاد» بوده است. از طرفی، مقدار میانگین شاخص خطر بوم‌شناختی تجمعی در فصول زمستان و بهار به‌ترتیب برابر با ۵۶۴ و ۴۵۰ و بیان‌گر «مخاطره بوم‌شناختی خیلی زیاد» در منطقه مورد مطالعه بود.

رحیمی و همکاران (۱۴۰۰) در پژوهشی نسبت به ارزیابی شاخص‌های آلودگی و غنی‌شدگی عناصر کمیاب حمل شده توسط ذرات

گردوغبار اتمسفری در کلان‌شهرهای استان خوزستان اقدام کردند و با استناد به مقادیر محاسبه شده شاخص آلودگی (PI)، سطوح آلودگی عناصر روی، سرب، کروم، مس، منگنز، منیزیم و نیکل در ذرات گردوغبار اتمسفری شهرهای آبادان، اهواز، دزفول و ماهشهر را در طبقه «کم» گزارش کردند. به‌علاوه، نتایج نشان داد که منشا عنصر آهن زمین‌زاد و عناصر روی، سرب، کروم، مس، منگنز، منیزیم و نیکل ناشی از فعالیت‌های ترافیکی و صنعتی بوده است.

عظیمی یانچشمه و همکاران (۱۳۹۹) با ارزیابی آلودگی و مخاطره بوم‌شناختی عناصر کمیاب در نهشت اتمسفری شهر کرج نتیجه گرفتند که میانگین غلظت عناصر سرب، روی، مس، کروم، نیکل و کبالت در نمونه‌ها به‌ترتیب برابر با ۱۸۴، ۹۳۱، ۹۴/۶، ۹۸/۷، ۸۳/۹ و ۲۱/۰ میکروگرم در گرم بوده است. همچنین، شاخص خطر بوم‌شناختی بیانگر «مخاطره بوم‌شناختی کم» در منطقه مورد مطالعه بود. به‌علاوه، نتایج نشان داد که منبع آلودگی عناصر مورد مطالعه فعالیت‌های انسان‌زاد از قبیل ترافیک، تأسیسات صنعتی و سوختن سوخت‌های فسیلی در منطقه مورد مطالعه بوده است.

سبحان اردکانی (۲۰۱۹) با ارزیابی خطر بوم‌شناختی و سلامت محتوای عناصر بالقوه سمی رسوب خشک جوی شهر کرمانشاه گزارش کرد که میانگین غلظت عناصر کبالت، نیکل و وانادیم در فصل تابستان به‌ترتیب برابر با ۱/۳۵، ۲/۸۵ و ۰/۰۶۰ میلی‌گرم در کیلوگرم و در فصل پاییز نیز به‌ترتیب برابر با ۱/۲۹، ۳/۰۵ و ۰/۰۶۰ میلی‌گرم در کیلوگرم بوده است. همچنین، میانگین مقادیر شاخص نشان داد که نمونه‌ها در هر دو فصل از خطر بالقوه بوم‌شناختی تجمع‌ی کم برخوردار بوده‌اند (Sobhanardakani, 2019).

کای و همکاران (۲۰۲۲) با ارزیابی آلودگی و منشاء‌یابی عناصر بالقوه سمی در رسوب جوی شهر هاندان چین گزارش کردند که بیشینه محتوی عناصر آرسنیک، کادمیم، کروم و مس مربوط به مناطق صنعتی بوده است. همچنین، نتایج نشان داد که تغییرات زمانی محتوی عناصر از روند کاهشی زمستان < بهار < تابستان < پاییز تبعیت کرده است (Cai et al., 2022).

### ۳. روش‌شناسی پژوهش

#### ۳-۱. معرفی منطقه مورد مطالعه

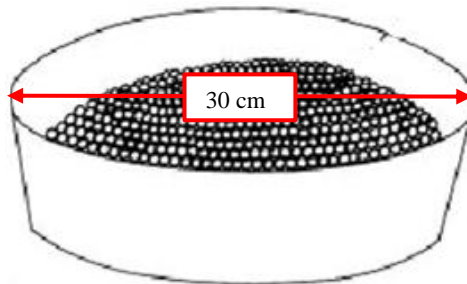
کلان‌شهر همدان با مساحت ۵۶ کیلومترمربع و جمعیت تقریبی ۶۵۲۰۰۰ نفر، بین مدارهای ۴۷ تا ۴۹ درجه طول جغرافیایی شرقی و ۳۳ تا ۳۵ درجه عرض جغرافیایی شمالی و در ارتفاع حدود ۱۸۵۰ متری از سطح دریا، در غرب ایران واقع شده است. میانگین دمای سالانه و بارندگی این شهر به‌ترتیب برابر با ۱۱/۳ درجه سلسیوس و ۳۱۸ میلی‌متر ثبت شده است. شهر همدان به‌عنوان اولین قطب جمعیتی استان، به‌سبب توسعه شهری و برخورداری از زیرساخت‌ها و شبکه حمل‌ونقل جاده‌ای و راه‌های ارتباطی مهم و همچنین افزایش حجم ترافیک درون شهری در معرض آلودگی محیط به‌ویژه از لحاظ محتوی عناصر بالقوه سمی قرار دارد (Hosseini et al., 2020).

#### ۳-۲. نمونه‌برداری از رسوب خشک جوی

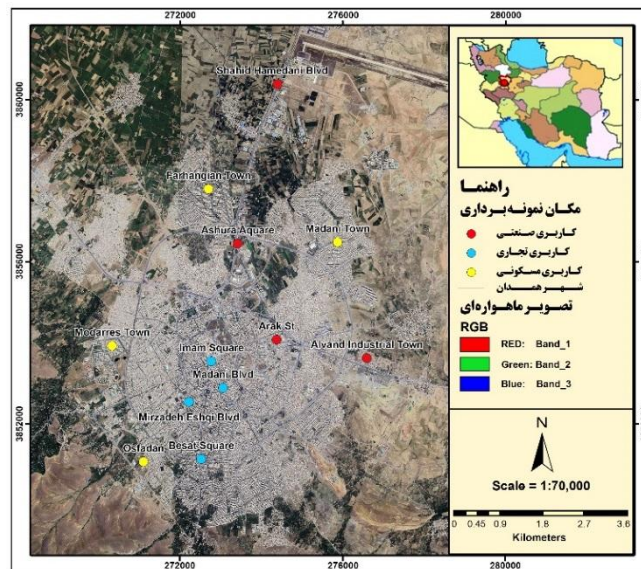
در این پژوهش توصیفی-مقطعی، پس از انجام مطالعه‌های اولیه میدانی و به‌منظور تعیین محتوی، تغییرات مکانی-زمانی، ارزیابی آلودگی و مخاطره‌های محیط‌زیستی عناصر آرسنیک، سرب، کادمیم، کروم و منگنز، نسبت به نمونه‌برداری از رسوب خشک جوی در کاربری‌های مسکونی، تجاری و صنعتی کلان‌شهر همدان اقدام شد. برای بررسی عامل زمان، نمونه‌گیری از رسوب خشک جوی در فصول بهار، تابستان، پاییز و زمستان سال ۱۴۰۲ و از ۱۲ مکان انجام یافت. لازم به ذکر است که تعداد نمونه‌های رسوب خشک جوی با لحاظ کردن محدودیت‌های مالی و زمانی تعیین شدند. نمونه‌برداری در همه مکان‌ها با استفاده از روش نمونه‌گیری تصادفی و توسط ظروف پلی‌اتیلنی با چگالی زیاد و با قطر دهانه ۳۰ سانتی‌متری (تله نمونه‌برداری) انجام شد (شکل ۱، الف). به‌منظور ایجاد شرایط یکنواخت و کاهش عوامل مداخله‌گر احتمالی، تله‌های نمونه‌برداری در همه مکان‌ها بر روی سه پایه‌های ۱/۵ متری و بالاتر از سطح زمین مستقر شدند و نمونه‌های رسوب در فواصل زمانی هفت روزه برداشت و برای تهیه یک نمونه همگن از هر منطقه، نمونه‌های رسوب خشک جمع‌آوری شده هر منطقه با یکدیگر مخلوط و به لوله‌های فالكون ۵۰ میلی‌لیتری با برچسب معین انتقال یافتند (Weerasundara et al., 2018; Liu et al., 2023).



از این رو، تعداد کل نمونه‌های رسوب خشک جوی در مجموع ۱۴۴ عدد (۳۶ نمونه فصل بهار، ۳۶ نمونه فصل تابستان، ۳۶ نمونه فصل پاییز و ۳۶ نمونه فصل زمستان) بود. در نهایت، نمونه‌ها برای انجام سایر مراحل آماده‌سازی به آزمایشگاه منتقل شدند. مختصات جغرافیایی مکان‌های نمونه‌برداری نیز توسط دستگاه موقعیت‌یاب مکانی (GPS) گارمین مدل ETRE 32X ثبت شدند که موقعیت استقرار آن‌ها در شکل ۱ (ب) آورده شده است.



(الف)



(ب)

شکل ۱. (الف) تصویر شماتیک تله رسوب‌گیر و (ب) نقشه موقعیت استقرار مکان‌های نمونه‌برداری (منبع: یافته‌های تحقیق)

### ۳-۳. آماده‌سازی نمونه‌های رسوب خشک جوی و تعیین محتوی عناصر در آن‌ها

در این پژوهش، برای آماده‌سازی نمونه‌ها و آنالیز دستگاهی آن‌ها از مواد شیمیایی و معرف‌هایی با درجه خلوص بالا خریداری شده از شرکت‌های مرک آلمان و سیگما- آلدریج اسپانیا استفاده شد.

نمونه‌های رسوب خشک جمع‌آوری شده پس از حذف حشرات و بقایای گیاهی و خشک شدن در ماکروبو با دمای ۷۰ درجه سلسیوس به ظروف شیشه‌ای با برجسب معین منتقل و در دمای چهار درجه سلسیوس نگهداری شدند (Weerasundara et al., 2018).

برای تعیین غلظت کل عناصر در نمونه‌های مورد مطالعه، یک گرم از هر نمونه رسوب خشک جوی را به‌طور مجزا به بشر ۱۵۰ میلی‌لیتری منتقل شد و پس از افزودن ۱۰ میلی‌لیتر اسید نیتریک ۶۵ درصد به هر بشر، محلول‌ها در دمای ۹۰ درجه سلسیوس، به مدت ۱۰ دقیقه بازروانی<sup>۱</sup> شدند. پس از خنک شدن محلول در دمای اتاق، پنج میلی‌لیتر اسید نیتریک ۶۵ درصد به محلول افزوده شد و ضمن پوشش

1. Reflux

آن توسط شیشه ساعت، مجدداً در دمای ۹۰ درجه سلسیوس به مدت ۳۰ دقیقه عمل بازروانی انجام شد تا حجم محلول بدون جوش خوردن به پنج میلی‌لیتر کاهش یابد. پس از خنک شدن محلول، دو میلی‌لیتر آب دوبار تقطیر و سه میلی‌لیتر پراکسید هیدروژن ۳۰ درصد به محلول افزوده و پس از پوشاندن آن با شیشه ساعت، اجازه داده شد تا واکنش پراکسید-هیدروژن آغاز و مشاهده شود. پس از فروکش کردن واکنش، محلول با شیشه ساعت پوشانده شد و تا رسیدن به حجم پنج میلی‌لیتر در دمای ۹۰ درجه سلسیوس حرارت داده شد. پس از افزودن ۱۰ میلی‌لیتر اسید کلریدریک ۳۰ درصد به محلول و قرار دادن آن روی یک هیتر، محلول به مدت ۱۵ دقیقه در دمای ۹۰ درجه سلسیوس بازروانی شد. محلول پس از سرد شدن توسط کاغذ صافی واتمن ۴۲ به ارلن ۱۰۰ میلی‌لیتری منتقل و با آب دو بار تقطیر به حجم رسانده شد (Sobhanardakani, 2018b). در نهایت، پس از ساخت محلول مادر (استوک) و استاندارد نمک عناصر و کالیبره کردن دستگاه نشر اتمی Varian مدل ES-۷۱۰، محتوی عناصر آرسنیک، سرب، کادمیم، کروم و منگنز در نمونه‌ها خوانده شد. تضمین و کنترل کیفیت<sup>۱</sup> اندازه‌گیری‌ها نیز با استفاده از مرجع استاندارد خاک<sup>۲</sup> خریداری شده از شرکت سیگما-آلدریج اسپانیا بررسی شدند. بر این اساس، مقادیر حد تشخیص برای عناصر آرسنیک، سرب، کادمیم، کروم و منگنز به ترتیب برابر با ۰/۰۶۱، ۰/۰۵۸، ۰/۰۷۶، ۰/۰۶۸ و ۰/۰۶۵ میلی‌گرم در کیلوگرم و مقادیر محدودیت کمی عناصر (میلی‌گرم در کیلوگرم) نیز برای عناصر آرسنیک، سرب، کادمیم، کروم و منگنز به ترتیب برابر با ۰/۱۸۵، ۰/۱۷۲، ۰/۲۲۷، ۰/۲۰۶ و ۰/۱۹۷ به دست آمدند. نتایج حاصل از درصد بازیابی عناصر مورد مطالعه (بین ۹۸/۷-۹۱/۲ درصد) نیز نشان داد که روش مورد استفاده برای تعیین محتوی عناصر بالقوه سمی مورد مطالعه از دقت مناسب برخوردار بوده است.

### ۳-۴. ارزیابی آلودگی رسوب خشک جوی به عناصر بالقوه سمی

در این پژوهش، به منظور ارزیابی سطح آلودگی عناصر بالقوه سمی مورد مطالعه در نمونه‌های رسوب خشک جوی نسبت به محاسبه شاخص‌های آلودگی (PI) و آلودگی یکپارچه (IPI) به ترتیب با استفاده از رابطه‌های ۱ و ۲ اقدام شد (حمزه‌نژاد و خداوردیلو، ۱۳۹۹؛ Hosseini et al., 2022):

$$PI = \frac{C_{\text{sample}}}{C_{\text{background}}} \quad (1)$$

در رابطه ۱،  $C_{\text{sample}}$  و  $C_{\text{background}}$  به ترتیب نشان‌دهنده محتوی عنصر مورد نظر در نمونه رسوب خشک جوی و غلظت عنصر در پوسته زمین (برابر با ۲/۰، ۳۴/۲، ۰/۲۳۰، ۲۰/۸ و ۸۵۰ به ترتیب برای عناصر آرسنیک، سرب، کادمیم، کروم و منگنز) هر دو بر حسب میلی‌گرم در کیلوگرم هستند (عظیم‌زاده و خادمی، ۱۳۹۲؛ سبحان اردکانی و حسینی، ۱۴۰۲ الف). سطوح آلودگی و تفسیر آن‌ها بر اساس مقادیر PI جدول ۱ آورده شده است (Hakanson, 1980).

$$IPI = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n PI_i \quad (2)$$

در رابطه ۲،  $PI_i$  و  $N$  به ترتیب بیان‌گر شاخص آلودگی برای هر عنصر و تعداد عناصر مورد بررسی هستند. جدول ۱ سطوح آلودگی و تفسیر آن‌ها برای شاخص IPI را نشان می‌دهد (حمزه‌نژاد و خداوردیلو، ۱۳۹۹).

### ۳-۵. ارزیابی ریسک بالقوه بوم‌شناختی عناصر

در این پژوهش، به منظور برآورد جامعی از خطرات بالقوه محیط‌زیستی عناصر بالقوه سمی مورد مطالعه در نمونه‌های رسوب خشک جوی، شاخص ریسک بالقوه بوم‌شناختی (Er) و ریسک بالقوه بوم‌شناختی تجمعی (RI) عناصر با استفاده از روابط ۳ و ۴ محاسبه شدند (حسینی و سبحان اردکانی، ۱۴۰۰؛ Li et al., 2021):

1. Quality Assurance/Quality Control  
2. RTC, SQC-014, Sigma-Aldrich, Spain

$$Er_i = Tr_i \left( \frac{C_s^i}{C_b^i} \right) \quad (3)$$

$$RI = \sum_{i=1}^n Er_i \quad (4)$$

در روابط ۳ و ۴،  $E_r$ ،  $C_s$  و  $C_b$  به ترتیب نشان دهنده ضریب خطر بالقوه بوم‌شناختی هر عنصر، غلظت عنصر در نمونه رسوب خشک جوی و غلظت زمینه عنصر بر حسب میلی‌گرم در کیلوگرم هستند. همچنین،  $Tr$  ضریب واکنش سمیت هر عنصر (برابر با ۱۰، ۵، ۳۰، ۲ و ۱ به ترتیب برای عناصر آرسنیک، سرب، کادمیم، کروم و منگنز) را نمایندگی می‌کند (Hakanson, 1980). طبقه‌بندی و تفسیر مقادیر شاخص‌های  $E_r$  و  $RI$  در جدول ۱ آورده شده است (Hakanson, 1980; Hosseini & Sobhanardakani, 2024).

### ۳-۶. پردازش آماری داده‌ها

پردازش آماری داده‌ها با استفاده از نسخه ۱۹ نرم‌افزار SPSS در سطح معنی‌داری ۰/۰۵۰ انجام یافت. برای بررسی نرمال بودن توزیع داده‌ها و برابری واریانس‌ها به ترتیب از آزمون‌های شاپیرو-ویلک<sup>۱</sup> و لوین<sup>۲</sup> استفاده شد. از آزمون تحلیل واریانس بین آزمودنی یک‌طرفه<sup>۳</sup> و آزمون تعقیبی چند دامنه‌ای دانکن<sup>۴</sup> نیز برای مقایسه میانگین محتوی عناصر بین کاربری‌ها و فصول مختلف استفاده شد.

**جدول ۱.** طبقه‌بندی مقادیر شاخص‌های آلودگی (PI)، آلودگی یکپارچه (IPI)، شاخص خطر بالقوه بوم‌شناختی ( $E_r$ ) و شاخص خطر بالقوه بوم‌شناختی تجمعی (RI) عناصر مورد مطالعه (حمزه‌نژاد و خداوردیلو، ۱۳۹۹؛ Hosseini & Sobhanardakani, 2024; Hakanson, 1980)

| شاخص آلودگی یکپارچه (IPI)             |                     | شاخص غنی‌شدگی (PI)                   |                      |
|---------------------------------------|---------------------|--------------------------------------|----------------------|
| طبقه توصیفی                           | محدوده              | طبقه توصیفی                          | محدوده               |
| آلودگی کم                             | $IPI < 1$           | آلودگی کم                            | $PI < 1$             |
| آلودگی متوسط                          | $1 \leq IPI < 2$    | آلودگی متوسط                         | $1 \leq PI < 3$      |
| آلودگی زیاد                           | $IPI \geq 2$        | آلودگی زیاد                          | $3 \leq PI < 6$      |
|                                       |                     | آلودگی خیلی زیاد                     | $PI \geq 6$          |
| شاخص خطر بالقوه بوم‌شناختی تجمعی (RI) |                     | شاخص خطر بالقوه بوم‌شناختی ( $E_r$ ) |                      |
| طبقه توصیفی                           | محدوده              | طبقه توصیفی                          | محدوده               |
| خطر کم                                | $RI < 60$           | خطر کم                               | $E_r < 40$           |
| خطر متوسط                             | $60 \leq RI < 120$  | خطر متوسط                            | $40 \leq E_r < 80$   |
| خطر شدید                              | $120 \leq RI < 240$ | خطر زیاد                             | $80 \leq E_r < 160$  |
| خطر خیلی شدید                         | $RI \geq 240$       | خطر شدید                             | $160 \leq E_r < 320$ |
|                                       |                     | خطر خیلی شدید                        | $E_r \geq 320$       |

### ۴. یافته‌های پژوهش

#### ۴-۱. آمار توصیفی مربوط به تعیین مقادیر عناصر بالقوه سمی در نمونه‌های رسوب خشک جوی

آمار توصیفی مربوط به مقادیر تعیین‌شده عناصر بالقوه سمی در نمونه‌های رسوب خشک جوی در جدول ۲ آورده شده است. بر این اساس، محتوی عناصر آرسنیک، سرب، کادمیم، کروم و منگنز در رسوب خشک جوی به ترتیب در دامنه ۲/۵۵-۶/۶۰، ۴۹/۲-۹۵/۳، ۰/۲۸۹-۰/۲۸۹

1. Shapiro-Wilk
2. Leven
3. One-Way ANOVA
4. Duncan Multiple Range Test

۰/۸۵۶، ۱۹/۵-۵۵/۷ و ۱۸/۵-۴/۵۱ میلی‌گرم در کیلوگرم متغیر بود. بیشینه میانگین محتوی عناصر آرسنیک، کادمیم و کروم به‌ترتیب با ۵/۹۲، ۰/۷۹۴ و ۴۹/۹ میلی‌گرم در کیلوگرم همگی مربوط به نمونه‌های رسوب خشک جوی جمع‌آوری شده از کاربری صنعتی و بیشینه میانگین محتوی عناصر سرب و منگنز به‌ترتیب با ۹۱/۵ و ۱۵/۶ میلی‌گرم در کیلوگرم مربوط به نمونه‌های برداشت شده از مناطق تجاری بود (میانگین چهار فصل نمونه‌برداری). همچنین، بیشینه میانگین محتوی عناصر آرسنیک، سرب، کادمیم و منگنز به‌ترتیب برابر با ۵/۱۲، ۷۳/۱، ۰/۶۵۵ و ۱۲/۶ میلی‌گرم در کیلوگرم و همگی مربوط به نمونه‌های رسوب خشک جوی فصل پاییز بود (میانگین سه کاربری). از طرفی، بیشینه میانگین محتوی عنصر کروم با ۴۱/۶ به نمونه‌های رسوب خشک جوی فصل بهار تعلق داشت. از سوی دیگر، میانگین محتوی عناصر (همه کاربری‌ها و فصول) در نمونه‌ها از روند نزولی سرب < کروم < منگنز < آرسنیک < کادمیم تبعیت کرد. به‌علاوه، روند کاهشی انحراف استاندارد محتوی عناصر در نمونه‌ها به‌صورت سرب < کروم < منگنز < آرسنیک < کادمیم بود. نتایج آزمون تحلیل واریانس یک‌طرفه نیز نشان داد که بین کاربری‌ها و فصول مختلف از حیث میانگین محتوی عناصر آرسنیک، سرب، کادمیم، کروم و منگنز در نمونه‌های رسوب اختلاف معنی‌دار آماری در سطح ۹۵٪ وجود داشته است. روند نزولی میانگین محتوی عناصر آرسنیک، کادمیم و کروم برای کاربری‌های مختلف به‌صورت صنعتی < تجاری < مسکونی و برای عناصر سرب و منگنز نیز به‌صورت تجاری < صنعتی < مسکونی بود. از طرفی، میانگین محتوی عناصر آرسنیک و کادمیم برای فصول مختلف از روند نزولی پاییز < زمستان < بهار < تابستان و برای عناصر سرب و منگنز از روند کاهشی پاییز < تابستان < زمستان < بهار تبعیت کرد. همچنین، روند نزولی میانگین محتوی عنصر کروم برای فصول مختلف به‌صورت بهار < تابستان < پاییز < زمستان بود.

جدول ۲. آمار توصیفی محتوی عناصر مورد مطالعه در نمونه‌های رسوب خشک جوی شهر همدان (منبع: یافته‌های تحقیق)

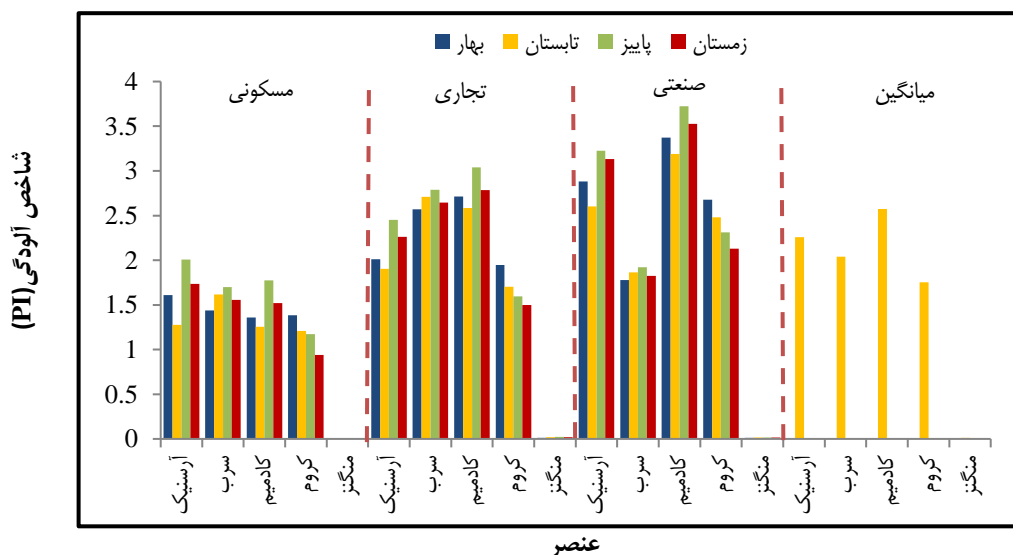
| عناصر  | کاربری  | فصل                          |                             |                             |                             |
|--------|---------|------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
|        |         | بهار                         | تابستان                     | پاییز                       | زمستان                      |
| آرسنیک | مسکونی  | ۳/۳۲ ± ۰/۴۵ <sup>Bc</sup>    | ۲/۵۵ ± ۰/۴۰ <sup>.Cc</sup>  | ۴/۰۱ ± ۰/۲۹ <sup>Ac</sup>   | ۳/۴۷ ± ۰/۵۵ <sup>Bc</sup>   |
|        | تجاری   | ۴/۰۲ ± ۰/۴۸ <sup>Ab</sup>    | ۳/۸۱ ± ۰/۲۹ <sup>Ab</sup>   | ۴/۹۰ ± ۰/۳۷ <sup>Ab</sup>   | ۴/۵۲ ± ۰/۵۹ <sup>Bb</sup>   |
|        | صنعتی   | ۵/۷۶ ± ۰/۳۶ <sup>Ba</sup>    | ۵/۲۱ ± ۰/۴۹ <sup>ca</sup>   | ۶/۴۵ ± ۰/۳۴ <sup>Aa</sup>   | ۶/۶۰ ± ۰/۵۲ <sup>Aa</sup>   |
|        | میانگین | ۴/۳۳ ± ۱/۱۶ <sup>BC</sup>    | ۳/۸۵ ± ۱/۱۶ <sup>C</sup>    | ۵/۱۲ ± ۱/۰۷ <sup>A</sup>    | ۴/۷۵ ± ۱/۲۸ <sup>AB</sup>   |
| سرب    | مسکونی  | ۴۹/۲ ± ۵/۹۳ <sup>Cc</sup>    | ۵۵/۳ ± ۵/۳۵ <sup>ABc</sup>  | ۵۸/۲ ± ۴/۷۴ <sup>Ac</sup>   | ۵۳/۳ ± ۴/۶۸ <sup>BCc</sup>  |
|        | تجاری   | ۸۷/۸ ± ۴/۸۳ <sup>Ba</sup>    | ۹۲/۶ ± ۴/۲۲ <sup>ABa</sup>  | ۹۵/۳ ± ۷/۱۱ <sup>ABa</sup>  | ۹۰/۴ ± ۵/۶۳ <sup>Aa</sup>   |
|        | صنعتی   | ۶۰/۸ ± ۴/۶۸ <sup>Bb</sup>    | ۶۳/۸ ± ۴/۶۴ <sup>ABb</sup>  | ۶۵/۷ ± ۴/۹۶ <sup>Ab</sup>   | ۶۲/۴ ± ۴/۵۵ <sup>ABb</sup>  |
|        | میانگین | ۶۵/۹ ± ۱۷/۲ <sup>A</sup>     | ۷۰/۶ ± ۱۶/۸ <sup>A</sup>    | ۷۳/۱ ± ۱۷/۳ <sup>A</sup>    | ۶۸/۷ ± ۱۶/۸ <sup>A</sup>    |
| کادمیم | مسکونی  | ۰/۳۱۳ ± ۰/۰۲۴ <sup>Cc</sup>  | ۰/۲۸۹ ± ۰/۰۲۵ <sup>Dc</sup> | ۰/۴۰۸ ± ۰/۰۲۸ <sup>Ac</sup> | ۰/۳۵۰ ± ۰/۰۳۰ <sup>Bc</sup> |
|        | تجاری   | ۰/۶۲۴ ± ۰/۰۲۳ <sup>BCb</sup> | ۰/۵۹۴ ± ۰/۰۵۳ <sup>Cd</sup> | ۰/۶۹۸ ± ۰/۰۲۳ <sup>Ab</sup> | ۰/۶۴۱ ± ۰/۰۳۸ <sup>Bb</sup> |
|        | صنعتی   | ۰/۷۷۵ ± ۰/۰۴۳ <sup>Ca</sup>  | ۰/۷۳۴ ± ۰/۰۲۶ <sup>Da</sup> | ۰/۸۵۶ ± ۰/۰۴۹ <sup>Aa</sup> | ۰/۸۱۱ ± ۰/۰۴۴ <sup>Ca</sup> |
|        | میانگین | ۰/۵۷۸ ± ۰/۱۹۸ <sup>AB</sup>  | ۰/۵۳۹ ± ۰/۱۹۱ <sup>BC</sup> | ۰/۶۵۵ ± ۰/۱۹۳ <sup>A</sup>  | ۰/۶۰۰ ± ۰/۱۹۷ <sup>AB</sup> |
| کروم   | مسکونی  | ۲۸/۷ ± ۷/۳۳ <sup>Ac</sup>    | ۲۵/۱ ± ۱۲/۲ <sup>ABc</sup>  | ۲۴/۴ ± ۷/۸۸ <sup>ABc</sup>  | ۱۹/۵ ± ۷/۸۲ <sup>Bc</sup>   |
|        | تجاری   | ۴۰/۵ ± ۶/۱۳ <sup>Ab</sup>    | ۳۵/۴ ± ۹/۶۹ <sup>ABb</sup>  | ۳۳/۲ ± ۷/۲۷ <sup>Bb</sup>   | ۳۱/۱ ± ۹/۱۴ <sup>Bb</sup>   |
|        | صنعتی   | ۵۵/۷ ± ۶/۸۷ <sup>Aa</sup>    | ۵۱/۶ ± ۸/۵۹ <sup>ABa</sup>  | ۴۸/۱ ± ۸/۴۱ <sup>BCa</sup>  | ۴۴/۳ ± ۷/۹۳ <sup>Ca</sup>   |
|        | میانگین | ۴۱/۶ ± ۱۳/۰ <sup>A</sup>     | ۳۷/۴ ± ۱۴/۹ <sup>AB</sup>   | ۳۵/۲ ± ۱۲/۵ <sup>AB</sup>   | ۳۱/۷ ± ۱۳/۱ <sup>B</sup>    |
| منگنز  | مسکونی  | ۴/۵۱ ± ۱/۴۹ <sup>Cc</sup>    | ۵/۳۴ ± ۱/۸۳ <sup>Ac</sup>   | ۵/۸۹ ± ۲/۲۵ <sup>Ac</sup>   | ۴/۶۸ ± ۱/۶۸ <sup>Ac</sup>   |
|        | تجاری   | ۱۱/۲ ± ۲/۱۰ <sup>Ba</sup>    | ۱۷/۲ ± ۲/۷۶ <sup>ABa</sup>  | ۱۸/۵ ± ۱/۴۴ <sup>Aa</sup>   | ۱۵/۷ ± ۳/۷۷ <sup>Ba</sup>   |
|        | صنعتی   | ۹/۷۶ ± ۱/۰۵ <sup>Cb</sup>    | ۱۲/۶ ± ۰/۸۳۸ <sup>ABb</sup> | ۱۳/۴ ± ۱/۲۲ <sup>Ab</sup>   | ۱۱/۹ ± ۱/۰۶ <sup>Bb</sup>   |
|        | میانگین | ۸/۴۹ ± ۳/۳۱ <sup>B</sup>     | ۱۱/۷ ± ۵/۳۱ <sup>A</sup>    | ۱۲/۶ ± ۵/۵۱ <sup>A</sup>    | ۱۰/۸ ± ۵/۲۳ <sup>AB</sup>   |

مقادیر مشخص شده با حروف بزرگ غیرمشترک (A، B، C و ...) در هر ردیف، بیان‌گر وجود تفاوت معنی‌دار آماری ( $p < ۰/۰۵$ ) میانگین محتوی عناصر مورد بررسی در فصول مختلف و مقادیر مشخص شده با حروف کوچک غیرمشترک (a، b، c و ...) در هر ستون، بیان‌گر وجود تفاوت معنی‌دار آماری ( $p < ۰/۰۵$ ) میانگین محتوی عناصر مورد بررسی در کاربری‌های مختلف بر اساس نتایج آزمون‌های تحلیل واریانس یک‌طرفه و چند دامنه‌ای دانکن است.

همچنین، بر اساس نتایج آزمون شاپیرو-ویلک، داده‌های مربوط به محتوی همه عناصر در نمونه‌های رسوب خشک جوی با توجه به سطح معنی‌داری ( $p$ ) بزرگ‌تر از ۰/۰۵، از توزیع نرمال برخوردار بودند.

#### ۲-۴. نتایج محاسبه شاخص آلودگی

با استناد به نتایج محاسبه شاخص آلودگی (شکل ۲)، میانگین مقادیر شاخص PI برای مناطق مسکونی، تجاری و صنعتی به ترتیب در دامنه‌های ۰/۰۰۵-۰/۰۱۳، ۰/۰۱۱-۰/۰۷۲ و ۰/۰۴-۰/۰۱۳ و برای فصول بهار، تابستان، پاییز و زمستان به ترتیب در دامنه‌های ۰/۰۰۵-۰/۰۳۷، ۰/۰۰۶-۰/۰۱۹، ۰/۰۰۷-۰/۰۷۲ و ۰/۰۰۵-۰/۰۵۲ متغیر بودند و شرایط آلودگی «کم تا زیاد» رسوب خشک جوی به عناصر آرسنیک، سرب، کادمیم، کروم و منگنز در همه مکان‌ها و فصول نمونه‌برداری را نشان می‌دهند. همچنین، میانگین مقادیر PI برای عناصر آرسنیک، سرب، کادمیم و کروم به ترتیب برابر با ۰/۲۶، ۰/۰۴، ۰/۵۷ و ۰/۷۵ و بیان‌گر آلودگی «متوسط» رسوب خشک جوی به این عناصر بود ( $PI \leq 3$ ). با این حال، میانگین مقادیر PI برای عنصر منگنز برابر با ۰/۱۳ و نشان‌دهنده آلودگی «کم» رسوب خشک جوی به این عنصر بود ( $PI < 1$ ). همچنین، روند نزولی میانگین مقادیر شاخص آلودگی برای عناصر به صورت کادمیم < آرسنیک < سرب < کروم < منگنز حاصل شد.



شکل ۲. مقادیر شاخص PI عناصر آرسنیک، سرب، کادمیم، کروم و منگنز در نمونه‌های رسوب خشک جوی همدان به تفکیک مکان و فصل نمونه‌برداری (منبع: یافته‌های تحقیق)

#### ۳-۴. نتایج محاسبه شاخص آلودگی یکپارچه

نتایج محاسبه شاخص آلودگی یکپارچه عناصر مورد مطالعه در نمونه‌های رسوب خشک جوی در شکل ۳ آورده شده است. با استناد به نتایج، مقادیر محاسبه شده شاخص IPI نمونه‌های رسوب خشک جوی در کاربری‌های مسکونی و تجاری به ترتیب برابر با ۱/۱۸ و ۱/۸۶ و نشان‌دهنده آلودگی «متوسط» نمونه‌ها بود ( $1 \leq IPI < 2$ ). در همین حال، نمونه‌های رسوب خشک جوی در کاربری صنعتی با میانگین مقادیر شاخص برابر با ۲/۱۴ آلودگی «زیاد» را نشان دادند ( $IPI \geq 2$ ). از طرفی، میانگین مقادیر شاخص IPI در فصول بهار، تابستان، پاییز و زمستان به ترتیب برابر با ۱/۷۲، ۱/۶۳، ۱/۸۵ و ۱/۷۱ و بیان‌گر سطح آلودگی «متوسط» رسوب خشک جوی به عناصر مورد مطالعه بود ( $1 \leq IPI < 2$ ). این در حالی است که مقادیر میانگین شاخص IPI برابر با ۱/۷۳ و نشان‌دهنده سطح آلودگی «متوسط» رسوب خشک جوی در منطقه مورد مطالعه بود.

## ۴-۴. نتایج محاسبه ریسک بالقوه بوم‌شناختی عناصر

نتایج محاسبه ریسک بالقوه بوم‌شناختی عناصر مورد ارزیابی در نمونه‌های رسوب خشک جوی در جدول ۳ آورده شده است. میانگین مقادیر شاخص Er برای مناطق مسکونی، تجاری و صنعتی به ترتیب در دامنه‌های ۵۳/۳-۰/۰۰۵، ۹۱/۱-۰/۰۱۳ و ۱۱۱-۰/۰۱۱ و برای فصول بهار، تابستان، پاییز و زمستان به ترتیب در دامنه‌های ۱۰۱-۰/۰۰۵، ۹۵/۷-۰/۰۰۶، ۱۱۱-۰/۰۰۷ و ۱۰۶-۰/۰۰۶ متغیر بود و بیان‌گر قابلیت خطرزایی بوم‌شناختی «کم تا زیاد» عناصر آرسنیک، سرب، کادمیم، کروم و منگنز رسوب خشک جوی در همه مکان‌ها و فصول نمونه‌برداری است. از طرفی، میانگین مقادیر Er برای عناصر آرسنیک، سرب، کروم و منگنز به ترتیب برابر با ۲۲/۴، ۱۰/۱، ۳/۴۳ و ۰/۰۱۳ و بیان‌گر قابلیت خطرزایی بوم‌شناختی «کم» این عناصر بود ( $Er < 40$ ). با این حال، میانگین مقادیر Er برای عنصر کادمیم برابر با ۷۷/۲ و قابلیت ریسک بوم‌شناختی «متوسط» این عنصر را نمایندگی می‌کند ( $40 \leq Er < 80$ ). همچنین، روند نزولی میانگین مقادیر شاخص Er برای عناصر به صورت کادمیم < آرسنیک < سرب < کروم < منگنز حاصل شد. از سوی دیگر، مقادیر محاسبه شده شاخص RI نمونه‌های رسوب خشک جوی در کاربری مسکونی برابر با ۷۱/۲ و نشان‌دهنده ریسک بوم‌شناختی «متوسط» بود ( $60 \leq RI < 120$ ). در همین حال، نمونه‌های رسوب خشک جوی در کاربری‌های تجاری و صنعتی با میانگین مقادیر RI به ترتیب برابر با ۱۲۱ و ۱۴۶ ریسک بوم‌شناختی «شدید» را نشان دادند ( $120 \leq RI < 240$ ). از طرفی، میانگین مقادیر شاخص RI در فصول بهار، تابستان و زمستان به ترتیب برابر با ۱۰۹، ۱۰۳ و ۱۱۴ و بیان‌گر ریسک بوم‌شناختی «متوسط» بود. این در حالی است که میانگین مقادیر شاخص RI در فصل پاییز برابر با ۱۲۵ و نشان‌دهنده قابلیت خطرزایی بوم‌شناختی «شدید» بود. در همین حال، مقادیر میانگین شاخص RI برابر با ۱۱۳ و بیان‌گر سطح خطرزایی بوم‌شناختی «متوسط» رسوب خشک جوی در منطقه مورد مطالعه بود.

جدول ۳. نتایج ارزیابی ریسک بوم‌شناختی ( $Er$  و  $RI$ ) عناصر مورد مطالعه در نمونه‌های رسوب خشک جوی شهر همدان (منبع: یافته‌های تحقیق)

| فصل                               | مکان نمونه‌برداری | شاخص ریسک بوم‌شناختی ( $Er$ ) |      |        |      |       | شاخص ریسک بوم‌شناختی تجمعی ( $RI$ ) |
|-----------------------------------|-------------------|-------------------------------|------|--------|------|-------|-------------------------------------|
|                                   |                   | آرسنیک                        | سرب  | کادمیم | کروم | منگنز |                                     |
| بهار                              | مسکونی            | ۱۶/۱                          | ۷/۱۹ | ۴۰/۸   | ۲/۷۶ | ۰/۰۰۵ | ۶۶/۹                                |
|                                   | تجاری             | ۲۰/۱                          | ۱۲/۸ | ۸۱/۴   | ۳/۸۹ | ۰/۰۱۳ | ۱۱۸                                 |
|                                   | صنعتی             | ۲۸/۸                          | ۸/۸۹ | ۱۰۱    | ۵/۳۵ | ۰/۰۱۱ | ۱۴۴                                 |
| تابستان                           | میانگین           | ۲۱/۶                          | ۹/۶۴ | ۷۴/۵   | ۴/۰۰ | ۰/۰۰۹ | ۱۰۹                                 |
|                                   | مسکونی            | ۱۲/۸                          | ۸/۰۹ | ۳۷/۷   | ۲/۴۱ | ۰/۰۰۶ | ۶۰/۹                                |
|                                   | تجاری             | ۱۹/۰                          | ۱۳/۵ | ۷۷/۵   | ۳/۴۰ | ۰/۰۲۰ | ۱۱۳                                 |
| پاییز                             | صنعتی             | ۲۶/۰                          | ۹/۳۲ | ۹۵/۷   | ۴/۹۶ | ۰/۰۱۵ | ۱۳۶                                 |
|                                   | میانگین           | ۱۹/۳                          | ۱۰/۳ | ۷۰/۳   | ۳/۵۹ | ۰/۰۱۳ | ۱۰۳                                 |
|                                   | مسکونی            | ۲۰/۱                          | ۸/۵۰ | ۵۳/۳   | ۲/۳۴ | ۰/۰۰۷ | ۸۴/۲                                |
| زمستان                            | تجاری             | ۲۴/۵                          | ۱۳/۹ | ۹۱/۱   | ۳/۱۹ | ۰/۰۲۲ | ۱۳۲                                 |
|                                   | صنعتی             | ۳۲/۲                          | ۹/۶۱ | ۱۱۱    | ۴/۶۳ | ۰/۰۱۵ | ۱۵۸                                 |
|                                   | میانگین           | ۲۵/۶                          | ۱۰/۷ | ۸۵/۴   | ۳/۳۸ | ۰/۰۱۵ | ۱۲۵                                 |
| میانگین چهار فصل                  | مسکونی            | ۱۷/۴                          | ۷/۷۹ | ۴۵/۶   | ۱/۸۸ | ۰/۰۰۶ | ۷۲/۷                                |
|                                   | تجاری             | ۲۲/۶                          | ۱۳/۲ | ۸۳/۶   | ۲/۹۹ | ۰/۰۱۹ | ۱۲۲                                 |
|                                   | صنعتی             | ۲۹/۳                          | ۸/۲۸ | ۱۰۶    | ۳/۳۵ | ۰/۰۱۵ | ۱۴۷                                 |
| میانگین کل (همه فصول و کاربری‌ها) | میانگین           | ۲۳/۹                          | ۹/۷۶ | ۷۸/۷   | ۲/۷۴ | ۰/۰۱۳ | ۱۱۴                                 |
|                                   | مسکونی            | ۱۶/۶                          | ۷/۸۹ | ۴۴/۳   | ۲/۳۵ | ۰/۰۰۶ | ۷۱/۲                                |
|                                   | تجاری             | ۲۱/۶                          | ۱۳/۴ | ۸۳/۴   | ۳/۳۷ | ۰/۰۱۸ | ۱۲۱                                 |
|                                   | صنعتی             | ۲۹/۹                          | ۹/۰۳ | ۱۰۳    | ۴/۵۷ | ۰/۰۱۴ | ۱۴۶                                 |
|                                   | میانگین کل        | ۲۲/۴                          | ۱۰/۱ | ۷۷/۲   | ۳/۴۳ | ۰/۰۱۳ | ۱۱۳                                 |



شکل ۳. مقادیر شاخص IPI عناصر آرسنیک، سرب، کادمیم، کروم و منگنز در نمونه‌های رسوب خشک جوی شهر همدان به تفکیک مکان و فصل نمونه برداری (منبع: یافته‌های تحقیق)

## ۵. بحث

رسوب خشک جوی شاخصی مفید و اقتصادی برای سنجش آلودگی عناصر بالقوه سمی هواسپهر در زیست‌بوم شهری به‌شمار می‌آید. بررسی یافته‌های مربوط به محتوی عناصر مورد مطالعه نشان داد که بیشینه میانگین محتوی عناصر آرسنیک، کادمیم و کروم به‌ترتیب با ۵/۹۲، ۰/۷۹۴ و ۴۹/۹ میلی‌گرم در کیلوگرم مربوط به نمونه‌های رسوب خشک جوی جمع‌آوری شده از مناطق صنعتی، و بیشینه میانگین محتوی عناصر سرب و منگنز به‌ترتیب با ۹۱/۵ و ۱۵/۶ میلی‌گرم در کیلوگرم مربوط به نمونه‌های برداشت شده از کاربری تجاری بود. در این خصوص، می‌توان اذعان داشت که انتشارات مداوم آلاینده‌های فلزی از منابع متحرک و ثابت آلودگی عامل اصلی و عمده احتمالی افزایش محتوی عناصر در مناطق صنعتی و تجاری بوده است. در این خصوص، سلگی و عبداللهی (۱۴۰۱) در بررسی میزان آلاینده‌های عناصر بالقوه سمی در رسوبات اتمسفری شهر زاهدان، گزارش کردند که بیشترین محتوی عناصر سرب و کادمیم مربوط به نمونه‌های برداشت‌شده از مناطق مرکزی شهر با حجم زیاد ترافیک بوده است. همچنین، روی، باتاچاریا و کوماری (۲۰۲۰)، ارسلائی و علیجانی (۱۴۰۰) و کای و همکاران (۲۰۲۲) گزارش کردند که بیش‌ترین محتوی عناصر آرسنیک، روی، سرب، کادمیم، کروم و منگنز مربوط به نمونه‌های رسوب خشک هواسپری برداشت شده از مناطق صنعتی و تجاری بوده است (ارسلائی و علیجانی، ۱۴۰۰: Roy, Bhattacharya; Kumari, 2020; Cai et al., 2022). از طرفی، نتایج سنجش میانگین محتوی عناصر در فصول مختلف نشان داد که بیشینه میانگین محتوی عناصر آرسنیک، سرب، کادمیم و منگنز به‌ترتیب برابر با ۵/۱۲، ۷۳/۱، ۰/۶۵۵ و ۱۲/۶ میلی‌گرم در کیلوگرم بود و همگی به نمونه‌های فصل پاییز تعلق داشت (میانگین از سه کاربری). از طرفی، بیشینه میانگین محتوی عنصر کروم با ۳۷/۴ میلی‌گرم در کیلوگرم مربوط به نمونه‌های رسوب خشک جوی فصل بهار بود. در مطالعه مشابه، ما و همکاران (۲۰۲۴) نیز با ارزیابی تغییرات زمانی- مکانی عناصر کمیاب در رسوب جوی سراسر چین اذعان داشتند که بیشینه میانگین غلظت عناصر آرسنیک، سرب، کادمیم و نیکل مربوط به فصول سرد بوده است. همچنین، بیشینه انحراف استاندارد محتوی عناصر در نمونه‌های مورد مطالعه مربوط به عنصر سرب بود. این موضوع افزون بر این که نشان‌دهنده گستره زیاد تغییرات محتوی سرب در نمونه‌های رسوب خشک جوی است، می‌تواند بیان‌گر تاثیر تغییرات فصلی و نوسانات منابع انتشار بر محتوی این عنصر در منطقه مورد مطالعه باشد (Ma et al., 2024). در این خصوص، سیستانی و همکاران (۱۳۹۶) نیز بیشینه انحراف استاندارد غلظت عناصر در خاک‌های مجاور صنایع فولاد کرمان را مربوط به عناصر روی و سرب و متاثر از شرایط آب‌وهوایی و فاصله از منبع آلودگی گزارش کردند.

نتایج آزمون تحلیل واریانس یک‌طرفه نشان داد که بین کاربری‌ها و فصول مختلف از حیث میانگین محتوی عناصر آرسنیک، سرب،

کادمیم، کروم و منگنز در نمونه‌های رسوب خشک جوی اختلاف معنی‌دار آماری در سطح ۹۵ درصد وجود داشته است. در این خصوص، می‌توان اذعان داشت که نوسانات منابع انتشار ناشی از تغییرات فصلی و فعالیت‌های شهری به احتمال زیاد تأثیر قابل‌توجهی بر محتوی عناصر آرسنیک، سرب، کادمیم، کروم و منگنز رسوب خشک جوی شهر همدان داشته است. آرسنیک شاخص احتراق سوخت فسیلی، و کادمیم و کروم نیز شاخص‌های اصلی فعالیت‌های صنعتی محسوب می‌شوند (Men et al., 2019; Ali-Taleshi, Feiznia, & Masiol, 2022; Kaghazchi & Soleimani, 2023).

همچنین، انتشارات ترافیکی (منابع احتراقی و غیراحتراقی) و ساخت‌وسازهای شهری از دیگر منابع مهم عناصر آرسنیک، کادمیم و کروم در زیست‌بوم شهری هستند (فرزان و سبحان اردکانی، ۱۳۹۵؛ Men et al., 2021). بنابراین، افزایش محتوی این عناصر در مناطق صنعتی را می‌توان با انتشارات ناشی از صنایع مختلف به‌ویژه جوشکاری و آبکاری فلزات، محصولات پلاستیکی، چرمی، همچنین کارگاه‌های تعمیرات و نقاشی خودرو در منطقه مورد مطالعه مرتبط دانست. چن و همکاران (۲۰۱۹) و کای و همکاران (۲۰۲۲) نیز با ارزیابی آلودگی عناصر بالقوه سمی در رسوب خشک جوی لیه و هندان، چین گزارش کردند که بیشترین غلظت عناصر آرسنیک، سرب، کادمیم و کروم مربوط به نمونه‌های رسوب خشک جوی برداشت شده از مناطق صنعتی و ناشی از فعالیت‌های نساجی، ذوب فلزات و ریخته‌گری، تولید رنگدانه، پلاستیک و صنایع غذایی بوده است (Chen et al., 2019; Cai et al., 2022). از طرفی، انتشار سرب در محیط به‌عنوان شاخص فعالیت‌های حمل‌ونقل عمدتاً ناشی از منابع غیر احتراقی (ذرات حاصل از استهلاک و فرسایش لنت ترمز، بدنه خودرو و نشت روان‌کننده‌ها) است (حسینی و سبحان اردکانی، ۱۴۰۲؛ Sabzevari & Sobhanardakani, 2018). همچنین، منگنز به‌سبب استفاده در سوخت (گازوئیل و بنزین) به شکل متیل‌سیکلوپنتادینیل منگنز تری کربونیل به‌طور عمده با انتشارات احتراقی وسایل نقلیه مرتبط است (سبحان اردکانی و حسینی، ۱۴۰۲؛ Hammood, Chamani & Sobhanardakani, 2024). از این‌رو، حجم زیاد ترافیک و انتشارات ناشی از منابع احتراقی و غیر احتراقی را به احتمال زیاد می‌توان با افزایش محتوی سرب و منگنز در مناطق تجاری مرتبط دانست. نتایج پژوهش ورسودارا و همکاران (۲۰۱۸) نیز که با هدف ارزیابی خطر سلامتی عناصر بالقوه سمی در رسوب جوی شهر کندی، سریلانکا انجام یافت، نشان داد که انتشارات مداوم ناشی از ترافیک (نشت روان‌کننده‌ها، سایش و خوردگی قطعات خودرو) و ساخت‌وساز شهری منابع عمده افزایش محتوی روی، سرب، کادمیم، کروم، مس، منگنز و نیکل در رسوب جوی منطقه مورد مطالعه بوده است (Weerasundara et al., 2018). همچنین، قلی‌زاده و همکاران (۲۰۱۹) با ارزیابی خطر بوم‌شناختی و بهداشتی عناصر بالقوه سمی جوی و با استناد به تغییرات مکانی محتوی عناصر گزارش کردند که بیشینه محتوی عناصر روی، سرب، کادمیم و مس مربوط به نمونه‌های رسوب خشک برداشت شده از مناطق صنعتی و پایانه‌های مسافربری و مرتبط با فعالیت‌های انسانی از قبیل تأسیسات صنعتی و ترافیک شهری در منطقه مورد مطالعه بوده است (Gholizadeh et al., 2019). از طرفی، بیشینه محتوی عناصر آرسنیک، سرب، کادمیم و منگنز در فصل پاییز در مقایسه با فصول دیگر را می‌توان با کاهش دمای هوا و افزایش مصرف سوخت فسیلی (به‌ویژه گرمایش ساختمانی) و همچنین، افزایش قابل‌توجه حجم ترافیک هم‌زمان با شروع سال تحصیلی در این فصل مرتبط دانست. در همین حال، انتشارات ناشی از افزایش فعالیت‌های ساخت‌وساز شهری به‌ویژه تخریب و بازسازی ساختمان‌ها و زیرساخت‌های شهری را می‌توان به‌عنوان عامل اصلی و عمده احتمالی افزایش محتوی عنصر کروم در فصل بهار در نظر گرفت. کرمانی و همکاران (۲۰۲۱) و علی‌تالشی، فیض‌نیا و ماسیول (۲۰۲۲) با ارزیابی آلودگی و تغییرات فصلی - مکانی عناصر بالقوه سمی رسوبات جوی کلان‌شهر تهران، ایران، بیشینه محتوی عناصر آرسنیک، روی، سرب، کادمیم و منگنز را در نمونه‌های رسوب جوی فصل پاییز و ناشی از افزایش مصرف سوخت فسیلی و حجم ترافیک گزارش کردند (Kermani et al., 2021; Ali-Taleshi, 2022; Feiznia & Masiol, 2022). نتایج پژوهش من و همکاران (۲۰۲۱) و آریاپاک، جلالیان و هنرجو (۲۰۲۲) نیز که با هدف ارزیابی تغییرات زمانی - مکانی، آلودگی و منشایابی عناصر بالقوه سمی در رسوب خشک جوی شهرهای تهران و پکن انجام یافت، نشان داد که بیشترین محتوی عنصر کروم مربوط به نمونه‌های رسوب خشک جوی فصل بهار و ناشی از فعالیت‌های ساخت‌وساز شهری بوده است (Men et al., 2021; Ariapak, Jalalian & Honarjoo, 2022). همچنین، پنزیک و همکاران (۲۰۲۱) و هوانگ و همکاران (۲۰۲۲) با ارزیابی آلودگی عناصر بالقوه سمی رسوبات جوی منطقه ساحلی شرق آدریاتیک (مدیترانه) و دلتای رودخانه مروارید (چین) افزایش محتوی عناصر بالقوه سمی رسوب جوی در مناطق صنعتی - تجاری و فصول سرد را با فعالیت‌های شهری و به‌ویژه انتشارات صنعتی، ترافیکی و احتراق



سوخت فسیلی مرتبط دانستند (Penezić et al., 2021; Huang et al., 2022). به علاوه، کارا و همکاران (۲۰۱۴)، اسپچائو و همکاران (۲۰۲۳) و ویزوت- جارامیلو و همکاران (۲۰۲۴) نیز با ارزیابی تغییرات فصلی رسوب خشک عناصر بالقوه سمی در شهرهای آلیگا، ترکیه، سونورا، مکزیک و هرموسیلو، مکزیک گزارش کردند که تغییرات در ویژگی‌های آب و هوایی (مانند دما و بارش) و فعالیت‌ها و انتشارات انسانی (مانند نوسانات فصلی فعالیت‌های عمرانی، صنعتی و حمل‌ونقل) بر محتوی عناصر فلزی رسوب خشک جوی تأثیرگذار بوده است (Kara et al., 2014; Schiavo et al., 2023; Vizquete-Jaramillo et al., 2024).

شاخص‌های PI و IPI ابزارهای مناسبی برای تعیین سطح و برآوردی جامع از میزان آلودگی عناصر بالقوه سمی در ماتریس‌های مختلف محیطی به‌شمار می‌آیند (حمزه‌نژاد و خداوردیلو، ۱۳۹۹). میانگین مقادیر محاسبه شده PI بیان‌گر آلودگی «کم» تا «زیاد» رسوب خشک جوی به عناصر آرسنیک، سرب، کادمیم، کروم و منگنز در همه کاربری‌ها و فصول مورد مطالعه بود. از طرفی، بیشینه میانگین مقادیر PI برای عناصر آرسنیک و کادمیم با ۳/۲۲ و ۳/۷۲ به ترتیب مربوط به مناطق صنعتی و فصل پاییز بود. این در حالی است که بیشینه میانگین مقادیر PI برای عناصر سرب و منگنز با ۲/۷۹ و ۰/۰۲۲ به ترتیب مربوط به کاربری تجاری و فصل پاییز بود. از سوی دیگر، بیشینه میانگین مقادیر PI برای عنصر کروم با ۲/۶۸ به مناطق صنعتی و فصل بهار تعلق داشت. افزون بر این، مقادیر محاسبه شده شاخص IPI، آلودگی «متوسط تا زیاد» رسوب خشک جوی به عناصر آرسنیک، سرب، کادمیم، کروم و منگنز در مناطق مسکونی، تجاری و صنعتی را نشان داد. از طرفی، میانگین مقادیر شاخص IPI بیان‌گر سطح آلودگی «متوسط» رسوب خشک جوی به عناصر مورد مطالعه در فصول بهار، تابستان، پاییز و زمستان بود. همچنین، بیشینه میانگین مقدار IPI به ترتیب با ۲/۱۴ و ۱/۸۵ مربوط به مناطق صنعتی و فصل پاییز بود. از این رو، می‌توان اذعان داشت که فعالیت‌های انسان‌پدید (صنعتی، ترافیکی و عمرانی)، تغییرات فصلی و نوسانات منابع انتشار به احتمال زیاد تأثیر قابل توجهی بر آلودگی عناصر بالقوه سمی در رسوب خشک جوی شهر همدان داشته است. در این خصوص، رحیمی و همکاران (۱۴۰۰) نیز سطح آلودگی عناصر روی، سرب، کروم، مس، منگنز، منیزیم و نیکل در شهرهای آبادان، اهواز، دزفول و ماهشهر را «کم» و ناشی از فعالیت‌های انسان‌زاد (صنعتی و ترافیکی) گزارش کردند. از طرفی، ما و همکاران (۲۰۲۴) با ارزیابی مکانی- زمانی و منابع عناصر بالقوه سمی در رسوب جوی در سراسر چین، افزایش آلودگی عناصر آرسنیک، سرب، کادمیم، کروم و نیکل در فصول سرد را به‌طور عمده ناشی از فعالیت‌های انسانی به‌ویژه انتشارات ترافیکی و احتراق سوخت فسیلی گزارش کردند (Ma et al., 2024).

شاخص RI ابزاری مفید برای ارزیابی و برآورد خطرات بالقوه بوم‌شناختی ناشی از آلودگی عناصر بالقوه سمی است (Hosseini & Sobhanardakani, 2024). میانگین مقادیر محاسبه شده Er بیان‌گر قابلیت خطرناکی بوم‌شناختی «کم» عناصر آرسنیک، سرب، کروم و منگنز رسوب خشک جوی در همه مکان‌ها و فصول نمونه‌برداری بود. این در حالی است که میانگین مقادیر Er برای عنصر کادمیم، ریسک بوم‌شناختی «متوسط تا زیاد» رسوب خشک جوی در همه کاربری‌ها و فصول مورد مطالعه را نشان داد. از طرفی، بیشینه میانگین مقادیر Er برای عناصر آرسنیک، کادمیم و کروم به ترتیب با ۲۹/۹، ۱۰۳ و ۴/۵۷ مربوط به مناطق صنعتی بود. با این حال، بیشینه میانگین مقادیر Er برای عناصر سرب و منگنز به ترتیب برابر با ۱۳/۴ و ۰/۰۱۸ و به کاربری تجاری تعلق داشت. از سوی دیگر، بیشینه میانگین مقادیر Er برای عناصر آرسنیک، سرب، کادمیم و منگنز به ترتیب با ۲۵/۶، ۱۰/۷، ۸۵/۴ و ۰/۰۱۵ مربوط به فصل پاییز و برای عنصر کروم با ۴/۰۰ مربوط به فصل بهار بود. همچنین، میانگین مقادیر شاخص Er برای عناصر از روند نزولی کادمیم < آرسنیک < سرب < کروم < منگنز تبعیت کرد. در این خصوص، می‌توان اذعان داشت که عناصری با محتوی و یا ضریب پاسخ سمیت (Tr) بیشتر، سهم عمده‌ای در ایجاد خطرات بوم‌شناختی داشته‌اند. از طرفی، مقادیر محاسبه شده شاخص RI بیان‌گر ریسک بوم‌شناختی تجمعی «متوسط تا شدید» عناصر آرسنیک، سرب، کادمیم، کروم و منگنز رسوب خشک جوی در همه مکان‌ها و فصول نمونه‌برداری بود. همچنین، بیشینه میانگین مقدار RI به ترتیب با ۱۴۶ و ۱۲۵ مربوط به مناطق صنعتی و فصل پاییز بود. از سوی دیگر، میانگین مقدار شاخص RI با ۱۱۳، نشان‌دهنده مخاطره بوم‌شناختی «متوسط» رسوب خشک جوی منطقه مورد مطالعه بود. همچنین، عنصر کادمیم با ۶۸/۳ درصد از بیشترین سهم در ایجاد خطر بوم‌شناختی تجمعی برخوردار بود. از این رو، می‌توان اذعان داشت که کادمیم نگران‌کننده‌ترین آلاینده فلزی در رسوب خشک جوی شهر همدان است که باید نسبت به کنترل منابع احتمالی انتشار آن در منطقه مورد مطالعه به‌منظور تدوین راهبردهای مدیریتی مؤثرتر اقدام شود. چن و همکاران (۲۰۱۹) نیز با بررسی محتوی، خطرات و منابع بالقوه عناصر کمیاب در رسوب جوی منطقه رودخانه لیه در شرق چین و با

استناد به مقادیر میانگین Er گزارش کردند که قابلیت خطرزایی بوم‌شناختی برای عناصر کادمیم، سرب و کروم به ترتیب «شدید»، «متوسط» و «کم» بوده است (Chen et al., 2019). از طرفی، لی و همکاران (۲۰۲۱) با استناد به میانگین مقادیر شاخص در رسوب خشک جوی تایهو، چین، اذعان داشتند که مقادیر شاخص RI عناصر روی، سرب، کادمیم و کروم در طبقه خطر بوم‌شناختی «خیلی شدید» قرار داشته و عنصر کادمیم با ۷۷/۸ درصد از بیشترین سهم در ایجاد مخاطره بوم‌شناختی تجمعی برخوردار بوده است (Li et al., 2021).

#### ۶. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این پژوهش، محتوی، ریسک بوم‌شناختی و تغییرات مکانی-زمانی عناصر بالقوه سمی رسوب خشک جوی کلان‌شهر همدان ارزیابی شد. با استناد به نتایج حاصل، نمونه‌های رسوب خشک برداشت‌شده از کاربری صنعتی از بیشینه میانگین محتوی عناصر آرسنیک، کادمیم و کروم (به ترتیب با ۵/۹۲، ۰/۷۹۴ و ۴۹/۹ میلی‌گرم در کیلوگرم) و کاربری تجاری از بیشینه محتوی عناصر سرب منگنز (به ترتیب با ۵/۹۱ و ۶/۱۵ میلی‌گرم در کیلوگرم) برخوردار بودند که تاثیر منابع انسان‌زاد نظیر ترافیک، جوشکاری و آبکاری فلزات، محصولات پلاستیکی، چرمی، همچنین کارگاه‌های تعمیرات و نقاشی خودرو در آلودگی رسوب را به اثبات می‌رساند. از طرفی، میانگین مقادیر محاسبه شده شاخص PI در محدوده ۱/۷۵ تا ۲/۵۷ متغیر بود و نشان داد که آلودگی عناصر آرسنیک، سرب، کادمیم، کروم و منگنز در منطقه مورد مطالعه در محدوده «کم» تا «زیاد» بوده است. همچنین، میانگین مقادیر شاخص IPI نمونه‌های گردوغبار نیز با ۱/۷۳، شرایط آلودگی «متوسط» در منطقه مورد مطالعه را نشان داد. از سوی دیگر، میانگین مقادیر محاسبه شده شاخص Er برای عناصر آرسنیک، سرب، کروم و منگنز به ترتیب برابر با ۲۲/۴، ۱۰/۱، ۳/۴۳ و ۰/۰۱۳ و بیان‌گر خطرزایی بوم‌شناختی «کم» و برای عنصر کادمیم با ۷۷/۲ ریسک بوم‌شناختی «متوسط» را نمایندگی کرد. همچنین، ریسک بوم‌شناختی عناصر از روند کاهشی کادمیم < آرسنیک < سرب < کروم < منگنز تبعیت کرد. به علاوه، میانگین مقادیر RI برابر با ۱۱۳ و نشان‌دهنده سطح خطرزایی بوم‌شناختی تجمعی «متوسط» رسوب خشک جوی در منطقه مورد مطالعه بود. از طرفی، کادمیم با ۶۸/۳ درصد از بیشترین سهم در ایجاد خطر بوم‌شناختی برخوردار بود. یافته‌ها نشان می‌دهند که با هدف کاهش سطح آلودگی انسان‌پدیده و حفظ سلامت زیست‌بوم شهری و شهروندان به‌ویژه در مناطق با سطح آلودگی زیاد، تمهیدات پیشگیرانه و اصلاحی باید مدنظر قرار گیرند. در این خصوص، بهبود و بهینه‌سازی سیاست‌ها و راهبردهای مدیریت ترافیک و زیرساخت‌های صنعتی برای کاهش آلودگی موثر خواهد بود. همچنین، نظر به این که کادمیم از بیشترین سهم در مخاطره بالقوه بوم‌شناختی تجمعی عناصر برخوردار بود؛ لذا، نسبت به کنترل منابع انتشار این عنصر از جمله انتشارات صنعتی و ترافیکی و پایش منظم و دوره‌ای نمونه‌های رسوب خشک جوی به‌ویژه در مناطقی با سطح آلودگی زیاد توصیه می‌شود. در نهایت، از آنجا که اجرای این پژوهش با محدودیت‌های زمانی و منابع مالی مواجه بود، مطالعه سایر عناصر بالقوه سمی و ارزیابی ریسک‌های محیط‌زیستی و بهداشتی آن‌ها برای حفظ سلامت بوم‌سازگان و شهروندان پیشنهاد می‌شود.

#### ملاحظات اخلاقی

این پژوهش مستخرج از رساله دکتری تخصصی مصوب واحد همدان دانشگاه آزاد اسلامی با کد به شماره ۲۲۱۶۲۷۹۸۷۴۲-۲۲۱۶۲۷۹۸۷۴۲-۵۰۷۶۱۷۷۷۲۰۵۰۷۶۱۹۴۸۸۴ است که نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این پژوهش علمی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تأیید همه آنهاست.

#### مشارکت نویسندگان

جمع‌آوری داده‌ها: بیژن حقی، مهرداد چراغی و سهیل سبحان اردکانی؛ تهیه گزارش پژوهش: بیژن حقی، مهرداد چراغی، سهیل سبحان اردکانی، بهاره لرستانی و مریم کیانی صدر؛ تحلیل داده‌ها: بیژن حقی، مهرداد چراغی و سهیل سبحان اردکانی  
مشارکت نویسندگان در مقاله مستخرج از پایان‌نامه تقریباً به شکل زیر می‌باشد:  
نویسنده اول: تهیه و آماده‌سازی نمونه‌ها، انجام آزمایش و گردآوری داده‌ها، انجام محاسبات، تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها، تحلیل و تفسیر اطلاعات و نتایج، تهیه پیش‌نویس مقاله  
نویسندگان دوم و سوم: استاد راهنمای رساله، طراحی پژوهش، نظارت بر مراحل انجام پژوهش، بررسی و کنترل نتایج، اصلاح، بازبینی و نهایی‌سازی مقاله

## تعارض منافع

بنابر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

## حامی مالی

بنابر اظهار نویسندگان این مقاله حامی مالی ندارد.

## سپاسگزاری

از معاونت محترم پژوهش و فناوری واحد همدان دانشگاه آزاد اسلامی به خاطر همکاری در اجرای پژوهش حاضر سپاسگزاری می‌شود.

## منابع

- ارسلانی، فاطمه؛ و علیجانی، بهلول (۱۴۰۰). عوامل موثر در ایجاد غلظت فلزات سنگین در گردوغبار هوای کلانشهر تهران و مخاطرات آن. مدیریت مخاطرات محیطی، ۸ (۴)، ۳۲۱-۳۳۵.
- امین‌فر، رضا؛ لندی، احمد؛ و حجتی، سعید (۱۴۰۰). پهنه‌بندی پراکنش برخی فلزات سنگین در ذرات گرد و غبار اطراف کانون هویزه-خرمشهر و شناسایی منشأ احتمالی این فلزات. تحقیقات کاربردی خاک، ۹ (۴)، ۱-۱۴.
- حسینی، نیره السادات؛ و سبحان اردکانی، سهیل (۱۴۰۰). ارزیابی اثر حجم ترافیک بر آلودگی و خطر بالقوه بوم‌شناختی عناصر روی، سرب و نیکل در خاک‌های حاشیه برخی جاده‌های برون شهری همدان. پژوهش‌های خاک، ۳۵ (۲)، ۱۱۹-۱۳۴.
- حسینی، نیره السادات؛ و سبحان اردکانی، سهیل (۱۴۰۱). ارزیابی آلودگی و خطر بالقوه بوم‌شناختی عناصر سرب، کادمیم، کروم و نیکل در خاک سطحی حاشیه برخی جاده‌های کلان‌شهر همدان، مجله مهندسی بهداشت محیط، ۹ (۳)، ۳۴۹-۳۶۴.
- حسینی، نیره السادات؛ و سبحان اردکانی، سهیل (۱۴۰۲). ارزیابی محتوی و منشا آلودگی فلزات سنگین در خاک سطحی حاشیه جاده: مطالعه موردی. مجله پژوهش در بهداشت محیط، ۹ (۲)، ۱۹۷-۲۱۴.
- حمزه‌نژاد، رقیه؛ و خداوردیلو، حبیب (۱۳۹۹). ارزیابی کمی آلودگی فلزات سنگین در خاک، تحقیقات کاربردی خاک، ۸ (۲)، ۳۷-۵۲.
- فرزان، مینا؛ و سبحان اردکانی، سهیل (۱۳۹۵). بررسی آلودگی رواناب سطحی حاصل از بارندگی در نقاط پرتراфик شهر همدان به عناصر آهن، سرب و کادمیم در سال ۱۳۹۲. مجله تحقیقات نظام سلامت، ۱۲ (۲)، ۲۰۸-۲۱۳.
- رحیمی، مسلم؛ محمدی روزبهانی، مریم؛ پاینده، خوشناز؛ نظریور، احد؛ و پناهپور، ابراهیم (۱۴۰۰). بررسی شاخص‌های آلودگی و غنی‌شدگی فلزات سنگین حمل شده توسط ذرات گرد و غبار اتمسفری در کلان‌شهرهای استان خوزستان. سلامت و محیط زیست، ۱۴ (۲)، ۲۹۹-۳۱۸.
- سبحان اردکانی، سهیل؛ و حسینی، نیره السادات (۱۴۰۲ الف). بررسی آلودگی و مخاطره سلامت برخی عناصر بالقوه سمی در خاک سطحی محیط کنار جاده‌ای. تحقیقات کاربردی خاک، ۱۱ (۴)، ۱۱۲-۱۲۵.
- سبحان اردکانی، سهیل؛ و حسینی، نیره السادات (۱۴۰۲ ب). ارزیابی سمیت و خطر سلامت مرتبط با عناصر بالقوه سمی (روی، سرب، کادمیم و کروم) خاک حاشیه جاده‌ای شهر همدان. محیط‌شناسی، ۴۹ (۱)، ۷۱-۹۰.
- سبحان اردکانی، سهیل؛ اسماعیلی ساری، عباس؛ چراغی، مهرداد؛ طیبی، لیما؛ و قاسمیپوری، محمود (۱۳۸۵). تعیین کیفیت بهداشتی هوای تهران در سال ۱۳۸۳ با استفاده از شاخص کیفیت هوا. فصلنامه علوم و تکنولوژی محیط‌زیست، ۸ (۴)، ۳۳-۳۸.
- سلگی، عیسی و عبداللهی، سارا (۱۴۰۱). بررسی میزان آلاینده‌های فلزات سنگین در رسوبات اتمسفری شهر زاهدان با استفاده از شاخص‌های آلودگی. مخاطرات محیط طبیعی، ۱۱ (۳۲)، ۷۳-۸۶.
- سیستانی، ندا؛ معین‌الدینی، مظاهر؛ خراسانی، نعمت‌اله؛ حمیدیان، امیرحسین؛ علی‌طالشی، محمدصالح؛ و عظیمی یانچشمه، رخساره (۱۳۹۶). آلودگی فلزات سنگین در خاک‌های مجاور صنایع فولاد کرمان: ارزیابی غنای فلزی و درجه آلودگی. سلامت و محیط زیست، ۱۰ (۱)، ۷۵-۸۶.

عبداللهی، سارا؛ عظیم‌زاده، حمیدرضا؛ اختصاصی، محمدرضا؛ و مصلح‌آرانی، اصغر (۱۴۰۰). بررسی تغییرات کمی، شاخص‌های آلودگی و توزیع غلظت فلزات سنگین Cd و Pb در غبار ریزشی (مطالعه موردی: شهر زاهدان). فصلنامه علوم محیطی، ۱۹(۱)، ۱-۱۸.

علی‌طالشی، محمدصالح؛ معین‌الدینی، مظاهر؛ فیض‌نیا؛ سادات؛ شهبازی، رضا؛ و اسکوتیزاتو، استفانیا (۱۳۹۹). خصوصیت و منشأیابی آلودگی فلزات سنگین در ذرات غبار ترسیب‌شده اتمسفری شهر تهران در سال ۱۳۹۷. مجله پژوهش در بهداشت محیط، ۶(۱)، ۵۶-۶۹.

عظیم‌زاده، بهروز؛ و خادمی، حسین (۱۳۹۲). تخمین غلظت زمینه برای ارزیابی آلودگی برخی فلزات سنگین در خاک‌های سطحی بخشی از استان مازندران. آب و خاک، ۳(۳)، ۵۴۸-۵۵۹.

عظیمی یانچشمه، رخساره؛ معین‌الدینی، مظاهر؛ فیض‌نیا، سادات؛ و شهبازی، رضا (۱۳۹۹). ارزیابی آلودگی محیط‌زیستی عناصر کمیاب در نهشت اتمسفری شهر کرج با استفاده از ضریب غنی‌شدگی و شاخص مخاطره اکولوژیکی در سال ۱۳۹۷. مجله مهندسی بهداشت محیط، ۷(۳)، ۳۵۶-۳۷۵.

## References

- Abdollahi, S., Azimzadeh, H., Ekhtesasi, M., & Mosleh-Arani, A. (2021). Evaluation of quantitative changes, pollution indexes and distribution of heavy metals Pb and Cd in the dust falling (case study: Zahedan city). *Environmental Sciences*, 19(1), 1-18 [In Persian]. doi: 10.52547/envs.29142
- Ali Taleshi, M.S., Moeinaddini, M., Feiznia, S., Shahbazi, R., & Squizzato, S. (2020). Characterization and source identification of heavy metals in atmospheric deposited dust of Tehran in 2018. *Journal of Research in Environmental Health*, 6(1), 56-69 [In Persian]. doi: 10.22038/jreh.2020.44168.1335
- Ali-Taleshi, M.S., Feiznia, S., & Masiol, M. (2022). Seasonal and spatial variations of atmospheric depositions-bound elements over Tehran megacity, Iran: Pollution levels, PMF-based source apportionment and risks assessment. *Urban Climate*, 42, 101113. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2022.101113>
- Aminfar, R., Landi, A., & Hojati, S. (2022). Source identification and distribution mapping of some heavy metals in dust particles collected around the Hoveyze-Khorramshahr dust center. *Applied Soil Research*, 9(4), 1-14 [In Persian].
- Anake, W.U., Ana, G.R., Williams, A.B., Fred-Ahmadu, O.H., & Benson, N.U. (2017). Chemical speciation and health risk assessment of fine particulate bound trace metals emitted from Ota Industrial Estate, Nigeria. *In IOP Conference Series: Earth and Environmental*, 68(1), 012005.
- Ariapak, S., Jalalian, A., & Honarjoo, N. (2022). Source identification, seasonal and spatial variations of airborne dust trace elements pollution in Tehran, the capital of Iran. *Urban Climate*, 42, 101049. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2021.101049>
- Arsalani, F., & Alijani, B. (2021). Identification of effective factors concentration of heavy metals in the dust existing in the air of Tehran metropolis. *Environmental Management Hazards*, 8(4), 321-335 [In Persian]. doi:10.22059/jhsci.2021.329792.673
- Azimi Yancheshmeh, R., Moeinaddini, M., Feyz, N. S., & Shahbazi, R. (2020). Assessment of the environmental pollution of trace elements in atmospheric deposition of Karaj City using enrichment factor and ecological risk index in 2018. *Journal of Environmental Health Engineering*, 7(3), 356-375 [In Persian]. <http://jehe.abzums.ac.ir/article-762-1-fa.html>
- Azimzadeh, B., & Khademi, H. (2013). Estimation of background concentration of selected heavy metals for pollution assessment of surface soils of Mazandaran province, Iran. *Journal of Water and Soil*, 27(3), 548-559 [In Persian]. doi: 10.22067/jsw.v0i0.26055
- Bao, L., Wang, S., Sun, H., Huang, W., Wang, G., & Nan, Z. (2019). Assessment of source and health risk of metal (loid) s in indoor/outdoor dust of university dormitory in Lanzhou City, China. *Environmental Science and Pollution Research*, 26:32333-32344. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-06365-7>
- Cai, A., Zhang, H., Zhao, Y., Wang, X., Wang, L., & Zhao, H. (2022). Quantitative source apportionment of heavy metals in atmospheric deposition of a typical heavily polluted city in Northern China: Comparison of PMF and UNMIX. *Frontiers in Environmental Science*, 10, 950288. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.950288>
- Chen, L., Zhou, S., Wu, S., Wang, C., & He, D. (2019). Concentration, fluxes, risks, and sources of heavy metals in atmospheric deposition in the Lihe River watershed, Taihu region, eastern China. *Environmental Pollution*, 255, 113301. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113301>
- Dharaka, B.D.P., & Priyantha, N. (2024). Atmospheric quality through analysis of dry and wet deposition at selected locations in Kandy and Gampaha districts of Sri Lanka. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 17(1), 71-87. <https://doi.org/10.1007/s11869-023-01431-z>
- Farzan, M., & Sobhanardakani, S. (2016). Analysis of Fe, Pb, and Cd content of surface runoff in regions with high traffic intensity in Hamedan, Iran, in 2014. *Journal of Health System Research*, 12(2), 208-213 [In Persian]. <http://hsr.mui.ac.ir/article-1-855-fa.html>
- Fu, Y., Tang, Y., Shu, X., Hopke, P.K., He, L., Ying, Q., Xia, Z., Lei, M. & Qiao, X. (2023). Changes of atmospheric metal (loid) deposition from 2017 to 2021 at Mount Emei under China's air pollution control strategy. *Atmospheric Environment*, 302, 119714.
- Gholizadeh, A., Taghavi, M., Moslem, A., Neshat, A.A., Najafi, M.L., Alahabadi, A., Ahmadi, E., Ebrahimi aval, H., Ahmadi Asour, A., Rezaei, H., Gholami, S., & Miri, M. (2019). Ecological and health risk assessment of exposure to atmospheric heavy metals. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 184, 109622. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.109622>
- Hakanson, L. (1980). An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach. *Water Research*, 14(8), 975-1001. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(80\)90143-8](https://doi.org/10.1016/0043-1354(80)90143-8)
- Hammood, M.A., Chamani, A., & Sobhanardakani, S. (2024). Health risk assessment of heavy metal exposure from indoor dust: A case study of residential buildings in Isfahan, Iran. *Environmental Health Engineering and Management Journal*, 11(1), 39-50. <http://ehemj.com/article-1-1303-en.html>
- Hamzenejhad, R., & Khodaverdiloo, H. (2020). Quantitative assessment of soil heavy metals pollution. *Applied Soil*

- Research*, 8(2), 37-52 [In Persian].
- Han, D., Shen, H., Duan, W. & Chen, L. (2020). A review on particulate matter removal capacity by urban forests at different scales. *Urban Forestry & Urban Greening*, 48:126565. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2019.126565>
- Hosseini, N.S., Sobhanardakani, S., Cheraghi, M., Lorestani, B., & Merrikhpour, H. (2020). Heavy metal concentrations in roadside plants (*Achillea wilhelmsii* and *Cardaria draba*) and soils along some highways in Hamedan, west of Iran. *Environmental Science and Pollution Research*, 27, 13301-13314. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-07874-6>
- Hosseini, N.S., & Sobhan Ardakani, S. (2021). Evaluation of the impact of traffic volume on pollution and potential ecological risk of Zn, Pb, and Ni in suburban roadside soils in Hamedan, Iran. *Iranian Journal of Soil Research*, 35(2), 119-134 [In Persian]. doi: 10.22092/ijsr.2021.353667.586
- Hosseini, N.S., & Sobhanardakani, S. (2022). Pollution and potential ecological risk assessment of Pb, Cd, Cr and Ni in surface soils along some roads of city of Hamedan. *Journal of Environmental Health Engineering*, 9(3), 349-364 [In Persian]. <http://jehe.abzums.ac.ir/article-1-942-en.html>
- Hosseini, N.S., & Sobhan Ardakani, S. (2023). Assessment of level and source identification of heavy metals in the surface soil of the roadside: A case study. *Journal of Research in Environmental Health*, 9(2), 197-214 [In Persian]. doi: 10.22038/jreh.2023.66952.1537
- Hosseini, N.S., & Sobhanardakani, S. (2024). Concentration, sources, potential ecological and human health risks assessment of trace elements in roadside soil in Hamedan metropolitan, west of Iran. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 104(17), 5962–5985. <https://doi.org/10.1080/03067319.2022.2135997>
- Hosseini, N.S., Sobhanardakani, S., Cheraghi, M., Lorestani, B., & Merrikhpour, H. (2022). Expansive herbaceous species as bio-tools for elements detection in the vicinity of major roads of Hamedan, Iran. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 19(3), 1611-1624. <https://doi.org/10.1007/s13762-021-03183-8>
- Huang, C., Zhang, L., Meng, J., Yu, Y., Qi, J., Shen, P., Li, X., Ding, P., Chen, M. & Hu, G. (2022). Characteristics, source apportionment and health risk assessment of heavy metals in urban road dust of the Pearl River Delta, South China. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 236:113490. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2022.113490>
- Juda-Rezler, K., Zajusz-Zubek, E., Reizer, M., Maciejewska, K., Kurek, E., Bulska, E., & Klejnowski, K. (2021). Bioavailability of elements in atmospheric PM<sub>2.5</sub> during winter episodes at Central Eastern European urban background site. *Atmospheric Environment*, 245, 117993. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117993>
- Kabir, M.H., Kormoker, T., Islam, M.S., Khan, R., Shammi, R.S., Tusher, T.R., Proshad, R., Islam, M.S. & Idris, A.M. (2021). Potentially toxic elements in street dust from an urban city of a developing country: ecological and probabilistic health risks assessment. *Environmental Science and Pollution Research*, 28, 57126-57148. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-14581-3>
- Kaghazchi, M.E., & Soleimani, M. (2023). Changes in ecological and health risk assessment indices of potentially toxic elements associated with ambient air particulate matters (PM<sub>2.5</sub>) in response to source, land use and temporal variation in Isfahan city, Iran. *Urban Climate*, 49, 101520. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2023.101520>
- Kara, M., Dumanoglu, Y., Altioek, H., Elbir, T., Odabasi, M., & Bayram, A. (2014). Seasonal and spatial variations of atmospheric trace elemental deposition in the Aliaga industrial region, Turkey. *Atmospheric Research*, 149, 204-216. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2014.06.009>
- Kermani, M., Asadgol, Z., Gholami, M., Jafari, A. J., Shahsavani, A., Goodarzi, B., & Arfaeinia, H. (2021). Occurrence, spatial distribution, seasonal variations, potential sources, and inhalation-based health risk assessment of organic/inorganic pollutants in ambient air of Tehran. *Environmental Geochemistry and Health*, 43, 1983-2006. <https://doi.org/10.1007/s10653-020-00779-w>
- Li, Y., Zhou, S., Jia, Z., Liu, K., & Wang, G. (2021). Temporal and spatial distributions and sources of heavy metals in atmospheric deposition in western Taihu Lake, China. *Environmental Pollution*, 284, 117465. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.117465>
- Lima, L.H.V., do Nascimento, C.W.A., da Silva, F.B.V., & Araújo, P.R.M. (2023). Baseline concentrations, source apportionment, and probabilistic risk assessment of heavy metals in urban street dust in Northeast Brazil. *Science of the Total Environment*, 858, 159750. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159750>
- Liu, P., Wu, Q., Hu, W., Tian, K., Huang, B., & Zhao, Y. (2023). Effects of atmospheric deposition on heavy metals accumulation in agricultural soils: Evidence from field monitoring and Pb isotope analysis. *Environmental Pollution*, 330, 121740. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.121740>
- Lv, D., Liu, Y., Ren, L., Huo, J., Zhao, J., Lu, R., Huang, Y., & Duan, L. (2023). Assessment of atmospheric heavy metal pollution in Qinghai-Tibet Plateau: Using mosses as biomonitor. *Journal of Hazardous Materials*, 459, 132181. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.132181>
- Ma, X., Sha, Z., Li, Y., Si, R., Tang, A., Fangmeier, A., & Liu, X. (2024). Temporal-spatial characteristics and sources of heavy metals in bulk deposition across China. *Science of the Total Environment*, 926, 171903. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.171903>

- Men, C., Liu, R., Wang, Q., Guo, L., Miao, Y., & Shen, Z. (2019). Uncertainty analysis in source apportionment of heavy metals in road dust based on positive matrix factorization model and geographic information system. *Science of the Total Environment*, 652, 27. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.212>
- Men, C., Wang, Y., Liu, R., Wang, Q., Miao, Y., Jiao, L., Shoaib, M., & Shen, Z. (2021). Temporal variations of levels and sources of health risk associated with heavy metals in road dust in Beijing from May 2016 to April 2018. *Chemosphere*, 270, 129434. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.129434>
- Mohebian, M., Sobhanardakani, S., Taghavi, L., & Ghoddousi, J. (2021). Analysis and potential ecological risk assessment of heavy metals in the surface soils collected from various land uses around Shazand Oil Refinery Complex, Arak, Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 14, 1-16. <https://doi.org/10.1007/s12517-021-08349-9>
- Paithankar, J.G., Saini, S., Dwivedi, S., Sharma, A., & Chowdhuri, D.K. (2021). Heavy metal associated health hazards: An interplay of oxidative stress and signal transduction. *Chemosphere*, 262, 128350. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128350>
- Penezić, A., Milinković, A., Alempijević, S.B., Žužul, S., & Frka, S. (2021). Atmospheric deposition of biologically relevant trace metals in the eastern Adriatic coastal area. *Chemosphere*, 283:131178. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131178>
- Rahimi, M., Mohammadi Roozbahani, M., Payandeh, K., Nazarpour, A., & Panahpour, E. (2021). Investigation of pollution and enrichment indices of heavy metals transported by atmospheric dust particles in the metropolis of the cities of Khuzestan province, *Iranian Journal of Health and Environment*, 14(2), 299-318 [In Persian]. <http://ijhe.tums.ac.ir/article-6557-1-fa.html>
- Roy, A., Bhattacharya, T., & Kumari, M. (2020). Air pollution tolerance, metal accumulation and dust capturing capacity of common tropical trees in commercial and industrial sites. *Science of the Total Environment*, 722, 137622. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137622>
- Sabet Aghlidi, P., Cheraghi, M., Lorestani, B., Sobhanardakani, S., & Merrikhpour, H. (2020). Analysis, spatial distribution and ecological risk assessment of arsenic and some heavy metals of agricultural soils, case study: South of Iran. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 18(2), 665-676. <https://doi.org/10.1007/s40201-020-00492-x>
- Sabzevari, E., & Sobhanardakani, S. (2018). Analysis of selected heavy metals in indoor dust collected from city of Khorramabad, Iran: A case study. *Jundishapur Journal of Health Sciences*, 10(3), 67382. <https://doi.org/10.5812/jjhs.67382>
- Schiavo, B., Meza-Figueroa, D., Morton-Bermea, O., Vizueté-Jaramillo, E., & Robles-Morua, A. (2023). Seasonal variation of mercury in settled dust from brick kiln pollution in Sonora, Mexico: Ecological risk and human health implication. *Atmospheric Pollution Research*, 14(7), 101787. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2023.101787>
- Selahvarzi, M., Sobhan Ardakani, S., Hemmasi, A.H., Taghavi, L., & Ghoddousi, J. (2024). Analysis, spatial distribution and ecological risk assessment of heavy metals in surface soils, the case of Khorramabad, Iran. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 104(20), 8955-8976. <https://doi.org/10.1080/03067319.2023.2217749>
- Sistani, N., Moeinaddini, M., Khorasani, N., Hamidian, A. H., Ali-Taleshi, M. S., & Yancheshmeh, R. A. (2017). Heavy metal pollution in soils nearby Kerman steel industry: metal richness and degree of contamination assessment. *Iranian Journal of Health and Environment*, 10(1), 75-86 [In Persian]. <http://ijhe.tums.ac.ir/article-1-5754-fa.html>
- Sobhan Ardakani, S., Esmaili Sari, A., Cheraghi, M., Tayebi, L., & Ghasempouri, S.M. (2007). Determination of Tehran air quality using the Air Quality Index in 2004. *Journal of Environmental Science and Technology*, 8(4), 33-38 [In Persian].
- Sobhanardakani, S., & Ghoochian, M. (2016). Analysis of heavy metals in surface sediments from Agh Gel Wetland, Iran. *Iranian Journal of Toxicology*, 34, 41-46. <http://ijt.arakmu.ac.ir/article-1-467-en.html>
- Sobhanardakani, S. (2018a). Human health risk assessment of potentially toxic heavy metals in the atmospheric dust of city of Hamedan, west of Iran. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(28), 28086-28093. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-2818-0>
- Sobhanardakani, S. (2018b). Ecological risk assessment of heavy metals in the atmospheric dry deposition of Hamedan City. *Journal of Kermanshah University of Medical Sciences*, 22(1), 69642. <https://doi.org/10.5812/jkums.69642>
- Sobhanardakani, S. (2019). Ecological and human health risk assessment of heavy metal content of atmospheric dry deposition, a case study: Kermanshah, Iran. *Biological Trace Element Research*, 187(2), 602-610. <https://doi.org/10.1007/s12011-018-1383-1>
- Sobhanardakani, S., & Jamshidi, K. (2015). Assessment of metals (Co, Ni and Zn) content in the sediments of Mighan Wetland using geo-accumulation index. *Iranian Journal of Toxicology*, 9(30), 1386-1390.
- Sobhan Ardakani, S., & Hosseini, N.S. (2023). Assessing the toxicity and related health risks of potentially toxic elements (Zn, Pb, Cd, and Cr) in the roadside soils of city of Hamedan. *Journal of Environmental Studies*, 49(1), 71-90 [In Persian]. doi: 10.22059/jes.2023.350468.1008366



- Sobhan Ardakani, S., & Hosseini, N.S. (2024). Investigating the contamination level and health risk of potentially toxic elements in surface soil of the roadside environment. *Applied Soil Research*, 11(4), 112-125. [In Persian].
- Solgi, E., & Abdollahi, S. (2022). Investigation of heavy metals contamination in atmospheric deposition of Zahedan City by using pollution indices. *Journal of Natural Environmental Hazards*, 11(32), 73-86 [In Persian].
- Vithanage, M., Bandara, P.C., Novo, L.A., Kumar, A., Ambade, B., Naveendrakumar, G., Ranagalage, M., & Magana-Arachchi, D.N. (2022). Deposition of trace metals associated with atmospheric particulate matter: Environmental fate and health risk assessment. *Chemosphere*, 303, 135051. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.135051>
- Vizueté-Jaramillo, E., Robles-Morua, A., Meza-Figueroa, D., Schiavo, B., & Gonzalez-Grijalva, B. (2024). Seasonal quantification of Zn<sup>2+</sup>, Pb<sup>2+</sup> and Cu<sup>2+</sup> in urban dusts in a semiarid city in northwest Mexico. *Atmospheric Pollution Research*, 15(5), 102074. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2024.102074>
- Weerasundara, L., Magana-Arachchi, D.N., Ziyath, A.M., Goonetilleke, A., & Vithanage, M. (2018). Health risk assessment of heavy metals in atmospheric deposition in a congested city environment in a developing country: Kandy City, Sri Lanka. *Journal of Environmental Management*, 220, 198-206. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.04.036>
- Yang, Y., Lu, X., Yu, B., Wang, Z., Wang, L., Lei, K., Zuo, L., Fan, P., & Liang, T. (2024). Exploring the environmental risks and seasonal variations of potentially toxic elements (PTEs) in fine road dust in resource-based cities based on Monte Carlo simulation, geo-detector and random forest model. *Journal of Hazardous Materials*, 473, 134708. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.134708>
- Ye, L., Huang, M., Zhong, B., Wang, X., Tu, Q., Sun, H., Wang, C., Wu, L., & Chang, M. (2018). Wet and dry deposition fluxes of heavy metals in Pearl River Delta Region (China): Characteristics, ecological risk assessment, and source apportionment. *Journal of Environmental Sciences*, 70, 106-123. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2017.11.01>
- Yu-Xiao, L., Shu-Han, L., Li, L., Shu-Di, Y., Bin-Yu, L., Chen, W., Shih-Chieh, H., & Shuh-Ji, K. (2023). Seasonal variations, source apportionment and dry deposition of chemical species of total suspended particulate in Pengjia Yu Island, East China Sea. *Marine Pollution Bulletin*, 187, 114608. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.114608>