

Investigating the correlation of heavy metals (Zn, Cr, Pb, Co, Cd) and PM10 suspended particles in dust and assessing their health risk in Zabol city

Mohsen Farahi¹, Ali Mohammadian Behbahani^{2*} , Hamid Reza Asgari³, Reza Dahmardeh Behrooz⁴, Dimitris .G.Kaskaoutis⁵

1. PhD. student of desert management and control, Faculty of Pasture and Watershed Management, Gorgan, Iran
 2. **Corresponding Author**, Assistant Professor, Department of Desert Management, Faculty of Pasture and Watershed Management, Gorgan, Iran
 Email: ali.mohammadian@gau.ac.ir ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4813-8151>
 3. Associate Professor Department of Desert Management, Faculty of Pasture and Watershed Management, Gorgan, Iran
 4. Assistant Professor, Department of Environment, Faculty of Natural Resources, Zabol, Iran
 5. Assistant Professor, Institute for Environmental Research and Sustainable Development, Athens, Greece

Article Info	ABSTRACT
<p>Article type: Research Article</p> <p>Article history: Received: 09 December 2023 Revised: 17 January 2024 Accepted: 18 February 2024 Published: 21 March 2026</p> <p>Keywords: Dust, chromium, PM10, Carcinogenic risk, Zabol.</p>	<p>Particles in suspension represent one of the most significant pathways through which humans encounter various environmental pollutants, particularly heavy metals. This study aims to investigate the correlation between heavy elements Co, Cd, Cr, Zn, and Pb and PM10 particles, as well as to assess their health risks in the city of Zabol. In this research, 60 dust samples were collected using TCR sampling devices during dust storms and winds over 120 days from late April to mid-September in Zabol. Subsequently, five elements, namely chromium, zinc, lead, cobalt, and cadmium, were analyzed using ICP-OES. Pearson correlation test was employed to examine the correlation between heavy metal concentrations in dust and the PM10 particle concentrations. The statistical analysis results revealed a significant correlation between chromium and PM10 concentration. The average concentration of PM10 particles in Zabol shows the critical situation of this city. Furthermore, the average Ecological Risk Index (ER) for the studied heavy metals in dust samples followed the order Zn > Pb > Cd > Cr and showed a decreasing trend. On the one hand, the highest and lowest levels of non-carcinogenic risk for all heavy metals were obtained in the children age group, with values of 1.14×10^{-2} (mg/kg) and 8.25×10^{-16} (mg/kg), respectively. In the adult age group, the highest and lowest levels were found to be 1.23×10^{-3} and 3.42×10^{-15} (mg/kg) for cadmium and chromium, respectively. The average concentration of heavy metals in the dust indicated that Zabol is contaminated with heavy metals. This metal concentration can be attributed to various factors, including the extraction and transport of elements from the Hamoun dry marsh, the dispersion of PM10 particles by 120-day winds from northern and northeastern regions or higher latitudes, industrial activities, urban traffic, and population density.</p>

How to Cite: Farahi, M. , Mohammadian Behbahani, A. , Asgari, H. R. , Dahmardeh Behrooz, R. and Kaskaoutis, D. G. (2026). Investigating the correlation of heavy metals (Zn, Cr, Pb, Co, Cd) and PM10 suspended particles in dust and assessing their health risk in Zabol city. *Journal of Natural Environmental Hazards*, 15(47), 1-22.



© The Author/Authors

Publisher: University of Sistan and Baluchestan

DOI: 10.22111/jneh.2024.47416.2010

EXTENDED ABSTRACT

INTRODUCTION

Air pollution has emerged as one of the significant environmental challenges facing human societies, particularly in developing countries (Zhang et al., 2020). This issue has become a serious crisis in Iran, which is situated in the dry and semi-dry belt of the world. According to the World Health Organization, approximately 7 million people worldwide die each year due to diseases related to air pollution (Dehghani, 2017). Numerous studies have shown that major sources of air pollution include motor vehicles and polluting industries. For instance, industrial activities and heavy traffic can lead to increased concentrations of heavy metals such as lead and cadmium in dust, which have toxic effects on human health (Manasreh, 2010). Previous research has indicated that children are more affected by these pollutants than adults, posing serious health risks to them (Bist and Choudhari, 2022; Kabatas et al., 2018). Given the increasing phenomenon of dust storms and particulate matter in the Middle East, particularly in Zabol County, this study aims to determine the concentrations of heavy metals (chromium, zinc, lead, cobalt, and cadmium) in dust and assess their impact on human health. The research hypotheses include that high concentrations of these metals are associated with increased health risks, which will be greater for children than for adults. This study aims to identify the relationship between heavy metal concentrations and their effects on human health. The results of this research could serve as a basis for environmental and health-related decision-making and provide strategies for reducing air pollution.

DATA AND METHODS

Study Area

The Zabol region is located in the northern part of Sistan and Baluchestan Province, bordered by Afghanistan to the north and east, South Khorasan Province to the west, and Zahedan County to the south (Figure 1). This region has a population of approximately 300,000 and an area of about 15,197 square kilometres. The climate of this area is desert and dry, with an average of over 160 days per year characterized by winds carrying dust, which has led to the degradation of its ecosystem (Haidarinasab, 2019; Mirzazahi, 2018).

Sampling and Sample Analysis

To investigate the concentration of heavy metals in the dust of Zabol City, 60 samples were collected on dusty days from May to September. The city centre was selected as the sampling location due to its geographical conditions and population concentration. PM10 particles were separated using TCR sampling devices (Han et al., 2023). Five elements—chromium, zinc, lead, cobalt, and cadmium—were analyzed using an ICP-OES device (Leong et al., 2008). Additionally, 45 soil samples were collected from areas surrounding Zabol County (Wang et al., 2021).

Statistical Analysis

Data were analyzed using SPSS.20 software to examine statistical distribution, including range, mean, standard deviation, and skewness. The normality of the data was assessed using the Shapiro-Wilk test, and correlations among elements were determined using Pearson's correlation in R software.

Ecological Risk Index (RI)

To evaluate the environmental risk posed by metals present in dust samples, potential ecological risk indices were utilized (Miao et al., 2022; Rahmat et al., 2022).

Cancer Risk and Non-Cancer Risk Assessment

This assessment consists of two main components: cancer risks and non-cancer risks, conducted according to health risk assessment methods established by the United States Environmental Protection Agency (USEPA) (King et al., 2015). The daily intake values of metals through three primary pathways—ingestion, inhalation, and dermal absorption—were calculated.

Non-cancer risk (HI) for children and adults was computed using relevant equations. Additionally, cancer risk indices for lead, chromium, and arsenic were calculated based on EPA guidelines.

These methods are designed to determine the concentration of heavy metals in Zabol dust and assess their impact on human health.

RESULTS AND DISCUSSION

Correlation Between Metals and PM10 Concentration

The results of the Pearson correlation matrix indicated significant correlations above 70% between the metals cadmium and cobalt, manganese and cobalt, manganese and cadmium, lead and cobalt, and lead with cadmium. Additionally, the highest concentration correlation was observed between chromium and PM10.

Potential Ecological Risk

The average concentrations of heavy metals in Zabol dust were 1.17 (zinc), 0.66 (chromium), 2.01 (lead), 0.69 (cobalt), and 0.09 (cadmium) mg/kg, respectively. The concentrations of all elements, except zinc, were lower than background levels, indicating low urban traffic in Zabol. The potential ecological risk was calculated based on the Hakanson method. The results showed that the average Er for heavy metals decreased in the order of Zn > Pb > Cd > Cr, with zinc, lead, cadmium, and chromium having low ecological risk potential.

Cancer Risk and Non-Cancer Risk Assessment

The assessment of human health risks was conducted through ingestion, inhalation, and dermal contact. The highest and lowest non-cancer risk (HQ) values for children were associated with cadmium and chromium, respectively. Chromium posed a high risk for both age groups, while cobalt was classified as having a high risk for both groups. The overall non-cancer risk (HI) indicated that this risk was high for adults and very high for children.

CONCLUSION

In this study, the concentration of heavy metals (Zn, Cr, Pb, Co, Cd) in the dust of Zabol City was examined. The results showed that the concentrations of lead and zinc were the highest, with zinc concentrations in the samples exceeding background levels. The origin of the dust in Zabol is linked to both local and external sources, such as the dry Hamoun wetland and the central desert of Iran. Additionally, human factors such as industrial facilities and traffic also influence the concentration of heavy metals. The research further indicated that Zabol City faces a critical situation regarding PM10 particles, with concentrations of these particles increasing to dangerous levels. The concentration of heavy metals in Zabol dust is associated with various factors, including the 120-day winds, industrial activities, and urban traffic. The results highlighted the necessity for preventive measures to reduce the risks associated with heavy metals, especially for more vulnerable children. Chromium was identified as a serious threat to the health of Zabol residents. These findings underscore the need for special attention to the pathways of element absorption through ingestion and emphasize the importance of control measures.

REFERENCES**References (in Persian)**

- Arslani, Fatemeh, Alijani, Bahloul, Akbari, Mehri, Mohammad Khan, Shirin. (2019). Investigating the heavy elements (Pb, Ni, Cu, Cr and Cd) present in the falling dust of Tehran city. *Earth Science Research*, 11(44):15-36. [In Persian]
- Asud, SeydReza. (2019). Comparison and health risk assessment of selected elements in indoor and outdoor dust in Ahvaz, Zabol and South Pars region. PhD thesis, Tarbiat Modares University. 94 p. [In Persian]
- Hamidianpour, Mohsin, Mofidi, Abbas, Sahih, Mohammad (2015). Analysis of the nature and structure of Bad Sistan. *Iranian Journal of Geophysics*, 10(2): 83-109. [In Persian]
- Khashtabeh, Reyhaneh, Akbari, Mortada, Heydari, Awa, Najafpur, Ali Asghar, (2023): The effect of iron ore mining on the concentration of some heavy metals and the zoning of soil pollution, a case study: Sangan iron ore mine, Khaf-Iran. *Water and Soil magazine*. 37(1): 77-94. [In Persian]
- Firozian, Sara, and Saeadabadi, Muhammad Sadiq, (2016): Investigating the social effects and harms of fine dust (a case study of Sistan city). International research conference in engineering, science and technology. Period 4. Pandar Hamaish Institute of Pars. [In Persian]
- Qanawati, Navid (2018): Assessment of the risk of heavy metals on human health in the street dust of Abadan city. *Health and Environment Quarterly*. 11(1): 63-74. [In Persian]
- Mazloumi, S., Esmaili Sari, A., Bahrami Far, N., and Moin Aldini, M. (2016): Evaluation of the presence of metals and semi-metals in the street dust of west and east of Tehran. *Health and environment*. 10(2): 281-292. [In Persian]
- Taati, A., Salehi M.H., Mohammadi, J. Mohajer, R. (2019): Assessment of pollution level, non-carcinogenic and carcinogenic risk of heavy metals on human health in surface soils of industrial areas of Arak, Iran. *Health and environment*. 13(2): 335-348. [In Persian]

References (in English)

- Ahmadi, S., Ezeliara, C.D., Sharki, S.H., Osagie, C., Ghosh, S., Igwegbe, C.A. and Khan, N.A. (2022). Assessment of health impacts attributed to PM10 exposure during 2015–2017 in Zabol City, Iran. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 19(5), pp.4123-4136.
- Ali, M.U., Yu, Y., Yousaf, B., Munir, M.A.M., Ullah, S., Zheng, C., Kuang, X. and Wong, M.H. (2021). Health impacts of indoor air pollution from household solid fuel on children and women. *Journal of hazardous materials*, 416, p.126127.
- Bai, B., Bai, F., Sun, C., Nie, Q., & Sun, S. (2023); Adsorption mechanism of shell powders on heavy metal ions Pb²⁺/Cd²⁺ and the purification efficiency for contaminated soils. *Frontiers in Earth Science*, 10, p.1071228.
- Behrooz, R.D., Kaskaoutis, D.G., Grivas, G. and Mihalopoulos, N. (2021). Human health risk assessment for toxic elements in the extreme ambient dust conditions observed in Sistan, Iran. *Chemosphere*, 262, p.127835.
- Bist, P., and Choudhary, S. (2022); Impact of heavy metal toxicity on the gut microbiota and its relationship with metabolites and future probiotics strategy: a review. *Biological Trace Element Research*, 200(12), pp.5328-5350.
- Chabukdhara, M. and Nema, A.K. (2013). Heavy metals assessment in urban soil around industrial clusters in Ghaziabad, India: probabilistic health risk approach. *Ecotoxicology and environmental safety*, 87, pp.57-64.
- Cirelli, P., Bilo, F., Tsuji, K., Matsuyama, T., Siviero, G., Pisani, L., Zacco, A., Depero, L.E., Eichert, D., Borgese, L. (2022). Assessment of calibration methods for Pb-loaded aerosol filters analyzed with X-ray fluorescence under grazing incidence. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 192, p.106414.
- Dehghani, S., Moore, F., Keshavarzi, B. and Beverley, A.H. (2017). Health risk implications of potentially toxic metals in street dust and surface soil of Tehran, Iran. *Ecotoxicology and environmental safety*, 136, pp.92-103.
- Fei, X., Lou, Z., Xiao, R., Lv, X. and Christakos, G. (2023). Contamination and health risk assessment of heavy metal pollution in soils developed from different soil parent materials. *Exposure and Health*, 15(2), pp.395-408
- Hakanson, L. (1980). An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach. *Water Research*, 14(8), pp.975-1001.
- Han, Q., Wang, M., Xu, X., Li, M., Liu, Y., Zhang, C., Li, S. and Wang, M. (2023). Health risk assessment of heavy metals in road dust from the fourth-tier industrial city in central China based on Monte Carlo simulation and bioaccessibility. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 252, p.114627.
- Heydari Nasab, M., Karam, A., Negaresh, H. and Pahlavanravi, A. (2019). Morphometric Analysis of Sand Dunes and the Speed of Their Displacement in Sistan Plain. *The Journal of Geographical Research on Desert Areas*, 7(1), pp.149-164.
- Javid, A., Nasiri, A., Mahdizadeh, H., Momtaz, S.M., Azizian, M. and Javid, N. (2021). Determination and risk assessment of heavy metals in air dust fall particles. *Environmental Health Engineering And Management Journal*, 8(4), pp.319-327.
- Kabatas, B., Pierce, R.B., Unal, A., Rogal, M.J. and Lenzen, A. (2018). April 2008 Saharan dust event: Its contribution to PM10 concentrations over the Anatolian Peninsula and relation with synoptic conditions. *Science of the Total Environment*, 633, pp.317-328.
- Leung, A.O., Duzgoren-Aydin, N.S., Cheung, K.C., Wong, M.H. (2008); Heavy metals concentrations of surface dust from e-waste recycling and its human health implications in southeast China. *Environmental science & technology*, 42(7), pp.2674-2680.
- Liu, X.X., Hu, X., Cao, Y., Pang, W.J., Huang, J.Y., Guo, P., Huang, L. (2019). Biodegradation of phenanthrene and heavy metal removal by acid-tolerant *Burkholderia fungorum* FM-2. *Frontiers in microbiology*, 10, p.408.

- Luo, H., Wang, Q., Guan, Q., Ma, Y., Ni, F., Yang, E. and Zhang, J. (2022). Heavy metal pollution levels, source apportionment and risk assessment in dust storms in key cities in Northwest China. *Journal of Hazardous Materials*, 422, p.126878.
- Madadi, R., Mohamadi, S., Rastegari, M., Karbassi, A., Rakib, M.R.J., Khandaker, M.U., Faruque, M.R.I. and Idris, A.M., (2022). Health risk assessment and source apportionment of potentially toxic metal (loid) s in windowsill dust of a rapidly growing urban settlement, Iran. *Scientific reports*, 12(1), p.19736.
- Madiha, Z., Rashid, A., Ayesha, A., Yasir, Sh., Liaqat, A., Mahpara, F., Khalid, A. and Shuangfei, L. (2022). Health and environmental effects of heavy metals. *Journal of King Saud University-Science*, 34(1), p.101653.
- Manasreh, W., Hailat, I. and El-Hasan, T.M. (2010). Heavy metal and anionic contamination in the water and sediments in Al-Mujib reservoir, central Jordan. *Environmental Earth Sciences*, 60, pp.613-621.
- Miao, F., Zhang, Y., Li, Y., Fang, Q. & Zhou, Y. (2022). Implementation of an integrated health risk assessment coupled with spatial interpolation and source contribution: A case study of soil heavy metals from an abandoned industrial area in Suzhou, China. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, pp.1-15.
- Mirakzehi, K., Pahlavan-Rad, M.R., Shahriari, A. and Bameri, A. (2018). Digital soil mapping of deltaic soils: A case of study from Hirmand (Helmand) river delta. *Geoderma*, 313, pp.233-240.
- Miri, A., Maleki, S. and Middleton, N. (2021). An investigation into climatic and terrestrial drivers of dust storms in the Sistan region of Iran in the early twenty-first century. *Science of the Total Environment*, 757, p.143952.
- Miri, A., Shirmohammadi, E. and Sorooshian, A. (2023). Impacts of dust storms on indoor and outdoor bioaerosol concentration in the Sistan region of Iran. *Journal of Building Engineering*, 76. p.107302.
- Najmeddin, A., Moore, F., Keshavarzi, B. and Sadegh, Z. (2018). Pollution, source apportionment and health risk of potentially toxic elements (PTEs) and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in urban street dust of Mashhad, the second largest city of Iran. *Journal of Geochemical Exploration*, 190. pp.154-169
- Panqing, Y., Abliz, A., Xiaoli, S., Aisaiduli, H. (2023); Human health-risk assessment of heavy metal-contaminated soil based on Monte Carlo simulation. *Scientific Reports*, 13(1), p.7033.
- Patel, D.K. and Jain, M.K. (2022). Health risk assessment of trace elements in the ambient air along the roadside in Dhanbad, India. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 19(5), pp.4107-4122.
- Qing X, Yutong Z, Shenggao L. (2015). Assessment of heavy metal pollution and human health risk in urban soils of steel industrial city (Anshan), Liaoning, Northeast China. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 120:377-85.
- Rahmat, M.A., Ismail, A.F., Rodzi, N.D., Aziman, E.S., Idris, W.M.R., Lihan, T. (2022); Assessment of natural radionuclides and heavy metals contamination to the environment: Case study of Malaysian unregulated tin-tailing processing industry. *Nuclear Engineering and Technology*, 54(6), pp.2230-2243.
- Rashki, A., Kaskaoutis, D.G. and Sepehr, A. (2018). Statistical evaluation of the dust events at selected stations in Southwest Asia: From the Caspian Sea to the Arabian Sea. *Catena*, 165, pp.590-603.
- Ravankhah, N., Mirzaei, R., Masoum, S. (2016). Human health risk assessment of heavy metals in surface soil. *Journal of Mazandaran University of Medical Sciences*. 26(136): 109-120.
- Rehman, A., Liu, G., Yousaf, B., Zia-ur-Rehman, M., Ali, M.U., Rashid, M.S., Farooq, M.R. and Javed, Z. (2020). Characterizing pollution indices and children health risk assessment of potentially toxic metal (oid) s in school dust of Lahore, Pakistan. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 190, p.110059.
- Safiur Rahman, M., Prashant Kumar, Mohammad Ullah, Yeasmin N. Jolly, Shirin Akhter, Jamiul Kabir, Bilkis A. Begum, Abdus Salam. (2021). Elemental analysis in surface soil and dust of roadside academic institutions in Dhaka city, Bangladesh and their impact on human health. *Environmental Chemistry and Ecotoxicology* 3 - 197-208.
- Shahsavani, A., Tobías, A., Querol, X., Stafoggia, M., Abdolshahnejad, M., Mayvaneh, F., Guo, Y., Hadei, M., Hashemi, S.S., Khosravi, A. and Namvar, Z. (2020). Short-term effects of particulate matter during desert and non-desert dust days on mortality in Iran. *Environment International*, 134, p.105299.
- Shan, W., Yin, Y., Lu, H. and Liang, S. (2009). A meteorological analysis of ozone episodes using the HYSPLIT model and surface data. *Atmospheric Research*, 4(93), pp.767-776.
- Wang, X., Qin, Y., Qin, J., Yang, Y., Qi, T., Chen, R., Tan, J. and Xiao, K. (2021). The interaction laws of atmospheric heavy metal ions and water-soluble organic compounds in PM_{2.5} based on the excitation-emission matrix fluorescence spectroscopy. *Journal of Hazardous Materials*, 402, p.123497.
- Wei, X., Gao, B., Wang, P., Zhou, H., Lu, J. (2015); Pollution characteristics and health risk assessment of heavy metals in street dust from different functional areas in Beijing, China. *Ecotoxicology and environmental safety*, 112.,186-192.
- Yarmoradi, Z., Nasiri, B., Mohammadi, G.H. and Karampour, M. (2020). Long-term characteristics of the observed dusty days and its relationship with climatic parameters in East Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 13(6), p.242.
- Zhang, W., Chang, W.J., Zhu, Z.C. and Hui, Z. (2020). Landscape ecological risk assessment of Chinese coastal cities based on land use change. *Applied Geography*, 117, p.102174.
- Zong, Y., Xiao, Q., Malik, Z., Lu, S. (2023). Exploring Environment Pollution and Risk Assessment of Heavy Metals in Road Dusts from a Typical Steel-Industrial City (Anshan), Northeastern China. *Water, Air, & Soil Pollution*. 234(1): p.34.

مجله علمی پژوهشی مخاطرات محیط طبیعی، دوره ۱۵، شماره ۴۷، شماره پیاپی ۱، فروردین ۱۴۰۵

بررسی همبستگی فلزات سنگین (Zn, Cr, Pb, Co, Cd) و ذرات معلق PM₁₀ موجود در گردوغبار و ارزیابی ریسک سلامت آنها در شهر زابل

محسن فراهی^۱، علی محمدیان بهبهانی^۲ , حمیدرضا عسگری^۳، رضا دهمرده بهروز^۴، دیمیتریس کاسکاویتیس^۵

۱. دانشجوی دکتری مدیریت و کنترل بیابان، دانشکده مرتع و آبخیزداری، گرگان

۲. استادیار گروه مدیریت مناطق بیابانی، دانشکده مرتع و آبخیزداری، گرگان (نویسنده مسئول)

ایمیل: ali.mohammadian@gau.ac.ir / <https://orcid.org/0000-0002-4813-8151>

۳. دانشیار گروه مدیریت مناطق بیابانی، دانشکده مرتع و آبخیزداری، گرگان

۴. استادیار گروه محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی، زابل

۵. استادیار، موسسه تحقیقات محیطی و توسعه پایدار، آتن، یونان

اطلاعات مقاله	چکیده
<p>نوع مقاله: مقاله پژوهشی</p> <p>تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۹/۱۸</p> <p>تاریخ ویرایش: ۱۴۰۲/۱۰/۲۷</p> <p>تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۱/۲۹</p> <p>تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۱/۰۱</p> <p>واژه‌های کلیدی: گردوغبار، کروم، PM₁₀، خطر سرطان‌زایی، زابل.</p>	<p>ذرات معلق یکی از مهم‌ترین مسیره‌های مواجهه انسان با انواع آلودگی‌های محیطی به ویژه فلزات سنگین است. هدف از این مطالعه بررسی همبستگی بین عناصر سنگین Zn, Cr, Cd, Co و Pb و ذرات PM₁₀ و ارزیابی ریسک سلامت آن‌ها در شهر زابل است. در این تحقیق جهت شناسایی و تعیین غلظت عناصر سنگین مورد نظر، ۶۰ نمونه گرد و غبار با استفاده از دستگاه‌های نمونه‌بردار TCR در زمان رخداد طوفان‌ها و بادهای ۱۲۰ روزه از اواخر اردیبهشت تا اواسط شهریور در شهر زابل تهیه شد. سپس پنج عنصر کروم، روی، سرب، کبالت و کادمیوم توسط دستگاه ICP-OES تحلیل شدند. جهت بررسی همبستگی بین عناصر سنگین گرد و غبار و غلظت ذرات PM₁₀ از آزمون همبستگی پیرسون استفاده شد. نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل آماری نشان داد بین فلز کروم و غلظت PM₁₀ بیشترین همبستگی معنی‌دار وجود دارد. میانگین غلظت ذرات PM₁₀ در شهر زابل نشان دهنده وضعیت بحرانی این شهر است، همچنین نتایج میانگین شاخص ریسک اکولوژیکی (ER) برای فلزات سنگین مورد مطالعه در نمونه‌های گرد و غبار به صورت Zn>Pb>Cd>Cr بوده و روند کاهشی دارد. از طرفی بیشترین و کمترین میزان خطر غیر سرطان‌زایی در گروه سنی کودکان برای فلزات سنگین مطالعه شده به ترتیب ۱/۱۴×۱۰^{-۲} و ۸/۲۵×۱۰^{-۱۶} (mg/kg) و در گروه سنی بزرگسالان ۱/۲۳×۱۰^{-۳} و ۱۵-۳/۴۲×۱۰^{-۱۰} (mg/kg) بوده و بیشترین مقدار مربوط به فلز کادمیوم و کروم به دست آمد. میانگین غلظت فلزات سنگین در گرد و غبار شهرستان زابل نشان داد که شهر زابل از فلزات سنگین آلوده است. این غلظت فلزات می‌تواند به عوامل مختلفی، از جمله برداشت و انتقال عناصر از تالاب خشک هامون، انتشار ذرات PM₁₀ به‌وسیله بادهای ۱۲۰ روزه از سمت مناطق شمال و شمال شرقی یا عرض‌های بالاتر، فعالیت‌های صنعتی، ترافیک شهری و میزان جمعیت مربوط باشد.</p>
<p>استناد: فراهی، محسن، محمدیان بهبهانی، علی، عسگری، حمیدرضا، دهمرده بهروز، رضا و کاسکاویتیس، دیمیتریس. (۱۴۰۵). بررسی همبستگی فلزات سنگین (Zn, Cr, Pb, Co, Cd) و ذرات معلق PM₁₀ موجود در گردوغبار و ارزیابی ریسک سلامت آنها در شهر زابل. مخاطرات محیط طبیعی، ۱۵(۴۷)، ۱-۲۲.</p>	
<p>© نویسنده/ نویسندگان DOI: 10.22111/jneh.2024.47416.2010 ناشر: دانشگاه سیستان و بلوچستان</p>	



مقدمه

آلودگی هوا یکی از چالش‌های عمده در جوامع انسانی است که به‌عنوان مسئله‌ای جدی و حیاتی مورد توجه است و یکی از مهم‌ترین مشکلات زیست‌محیطی در زندگی شهرنشینی امروز، آلودگی هوا است که به‌خصوص در کشورهای درحال توسعه بسیار مشهود است (ژانگ^۱ و همکاران، ۲۰۲۰). گردوغبار و ریزگردها از جمله پدیده‌های بارز در مناطق خشک و نیمه‌خشک و یا مناطق همجوار با این مناطق هستند که تأثیرات منفی بر سلامت و محیط‌زیست را به‌همراه دارند (خشتابه و همکاران، ۱۴۰۲). زیرا ذرات گردوغبار، بر اساس منشأ و مسیر حرکت خود، توانمندی زیادی در حمل فلزات سنگین دارند (لوو^۲ و همکاران، ۲۰۲۲). در سال‌های اخیر، پدیده گردوغبار و هجوم ریزگردها در خاورمیانه به‌طور چشمگیری افزایش یافته است و به همین دلیل، ایران نیز به‌علت قرارگرفتن در کمربند خشک و نیمه‌خشک جهان، به‌طور مداوم در معرض ریزگردها و گردوغبارهای محلی و مناطق فرامنطقه‌ای مختلف قرار دارد (دهقانی^۳، ۲۰۱۷). باد لوار^۴ که از آسیای مرکزی تا سواحل شمالی دریای عرب می‌وزد، به‌دلیل متوسط مدت طولانی آن در فصل تابستان به باد ۱۲۰ روزه معروف است و ویژگی غالب هواشناسی و اقلیمی منطقه شرق ایران است (حمیدیان پور و همکاران، ۱۳۹۵). شهرستان‌های بیرجند و زابل تحت تأثیر بادهای ۱۲۰ روزه قرار دارند که به‌طور عمومی در فصل تابستان و در ماه‌های خرداد تا شهریور شروع به وزش می‌کنند. این بادهای از وجود یک ناحیه کم‌فشار در شرق ایران و یک ناحیه پرفشار در شمال شرق ایران و دریای خزر ناشی می‌شوند و شرق خراسان در مسیر این بادهای قرار دارد (میری و همکاران، ۲۰۲۳). فرایند شکل‌گیری طوفان‌های گردوغبار از کشور پاکستان آغاز شده و پس از عبور از منطقه شرق خراسان و غرب افغانستان، به منطقه سیستان و در نهایت به پاکستان و دریای عمان می‌رسد (راشکی^۵ و همکاران، ۲۰۱۸). بر اساس گزارش سازمان جهانی بهداشت، هر سال حدود ۷ میلیون نفر در سراسر جهان به‌علت بیماری‌های مرتبط با آلودگی هوای خارجی و داخلی جان خود را از دست می‌دهند. به همین دلیل، نگرانی‌ها درباره مسئله آلودگی هوا در سال‌های اخیر به یک مسئله بحرانی در زمینه سلامت و محیط‌زیست تبدیل شده است. افزایش فعالیت‌های صنعتی، تعداد وسایل نقلیه در جاده‌ها و جمعیت در شهرهای بزرگ و گردوغبار باعث آلودگی هوا می‌شود و فلزات سنگین موجود در گردوغبار می‌توانند از طریق بلعیدن، استنشاق و جذب پوستی وارد بدن انسان شوند (سفیور رحمان^۶ و همکاران، ۲۰۲۱). اغلب فلزات سنگین حتی در غلظت‌های کم سمی هستند و زندگی بیولوژیکی را تهدید می‌کنند (مدیها^۷ و همکاران، ۲۰۲۲). معمولاً فلزات سنگین موجود در غبارهای خیابانی می‌توانند ناشی از ترافیک سنگین، صنایع، فرسایش ساختمان‌ها، فرسایش لاستیک و قطعات استفاده‌شده در خودروها، فعالیت‌های معدنی و احتراق سوخت‌های فسیلی باشند (مناسره^۸، ۲۰۱۰). فلزات سنگین مانند سرب، روی، مس، کادمیوم، آرسنیک و کروم به‌دلیل خاصیت سمی و تجمع‌زیستی، از جمله مهم‌ترین و جدی‌ترین عوامل آلودگی محیط‌زیست را تشکیل می‌دهند (جاوید^۹ و همکاران، ۲۰۲۱). استفاده بیش‌ازحد از فلزات سنگین می‌تواند منجر به مسمومیت‌های حاد و مزمن، از جمله آسیب به سیستم عصبی مرکزی، ترکیب خون، ریه، کلیه، کبد و حتی مرگ

¹ Zhang

² Luo

³ Dehghani

⁴ Lower wind

⁵ Rashki

⁶ Safiur Rahman

⁷ Madiha

⁸ Manasreh

⁹ Javid

گرد (علی^۱ و همکاران، ۲۰۲۱). این فلزات به دلیل عدم قابل تجزیه بودن و تأثیرات فیزیولوژیکی بر انسان و سایر موجودات زنده، حتی در غلظت‌های کم، اهمیت قابل توجهی دارند (وانگ^۲ و همکاران، ۲۰۲۱؛ بای^۳ و همکاران، ۲۰۲۳). غلظت بالای فلزات سنگین در محیط‌زیست، باعث اثرات منفی بسیار زیادی بر سلامت انسان می‌شود که بیشتر از طریق بلع، تنفس و جذب پوستی صورت می‌گیرد (مظلومی، ۱۳۹۶). کودکان نسبت به بزرگسالان، مقدار بیشتری از این فلزات را جذب می‌کنند و این باعث ایجاد اختلال در رفتارهای متابولیکی آن‌ها می‌شود (بیست و چودهاری^۴، ۲۰۲۲؛ کاباتاس^۵ و همکاران، ۲۰۱۸). بهبود کیفیت هوای شهری و کنترل ذرات PM₁₀ از اهمیت بسیاری برخوردار است تا سلامت افراد و محیط‌زیست شهری حفظ شود (فیروزیان و همکاران، ۱۳۹۵). با توجه به ترکیب پیچیده ذرات معلق در گردوغبار، تعیین اینکه کدام خصوصیت از آن‌ها باعث ایجاد چه نوع اثرات منفی بر سلامت انسان‌ها می‌شود، بسیار دشوار است و اطلاعات کافی و جامع در این زمینه وجود ندارد و مهم‌ترین قدم در ارزیابی گسترش و شدت آلودگی فلزات سنگین در مناطق آلوده، تعیین غلظت فلزات سنگین است (لیو^۶ و همکاران، ۲۰۱۴). بررسی‌های بسیاری در ارتباط با ارزیابی آلودگی فلزات سنگین ناشی از فعالیت‌های مختلف صنعتی با استفاده از شاخص‌های بیان‌شده انجام شده است، طاعتی و همکاران (۱۳۹۹)، به ارزیابی سطح آلودگی، ریسک غیر سرطان‌زایی و سرطان‌زایی فلزات سنگین بر سلامت انسان در خاک‌های سطحی مناطق صنعتی اراک، ایران پرداختند و بیان نمودند که خطر غیر سرطانی برای کودکان و بزرگسالان در مسیر بلع بیشتر از جذب پوستی و تنفس است. در پژوهشی ده‌مده به‌روز و همکاران (۱۴۰۰)، به ارزیابی خطر عناصر سمی بر سلامت انسان در شرایط گردوغبار شدید محیطی در سیستان پرداختند. بر اساس نتایج آن‌ها در این منطقه خطرات استنشاق غیر سرطان‌زا (شاخص خطر HI > 1) برای کودکان و بزرگسالان بسیار بالا بوده و خطرات سرطان‌زا نیز بالاتر از آستانه قابل قبول می‌باشد. خطرات سرطان‌زایی نیز برای مسیر بلع هم برای کودکان و هم بزرگسالان بالا می‌باشد. در پژوهشی ابراهیمی و همکاران (۲۰۲۲)، تغییرات PM₁₀ و ارتباط آن با گردوغبار و اقلیم در بیرجند را مورد بررسی قرار دادند. بر اساس نتایج آن‌ها، غلظت PM₁₀ و روند فرکانس روزهای گردوغبار مشابه می‌باشند و میانگین دما و سرعت باد روندی مشابه غلظت PM₁₀ را دارند و PM₁₀ با گردوغبار و اکثر متغیرهای آب و هوایی مرتبط است. نزدیک‌ترین همبستگی PM₁₀ با روزهای غبارآلود، در مقیاس زمانی فصلی و ماهانه می‌باشد. نجم‌الدین^۷ و همکاران (۲۰۱۹)، نمونه‌های گردوغبار خیابانی از مناطق صنعتی، مسکونی و با ترافیک سنگین در شهر مشهد را جمع‌آوری نمودند و بیان نموده‌اند که خطرات افزایشی سرطان در طول زندگی و قرار گرفتن در معرض گردوغبار برای کودکان و بزرگسالان ساکن در شهر مشهد نشان‌دهنده خطر سرطان‌زایی بالقوه بالایی است. پژوهشی که توسط شهسونی^۸ و همکاران (۲۰۲۰) در ایران انجام دادند، اثرات کوتاه‌مدت ذرات معلق در روزهای گردوغبار کویری و غیر کویری بر مرگومیر را ارزیابی نمودند. نتایج آنان نشان داد که غلظت‌های بالاتر PM₁₀ و فراوانی روزهای گردوغبار در اهواز نسبت به تهران بیشتر است. میری و همکاران (۲۰۲۱) در منطقه سیستان ایران عوامل اقلیمی و زمینی مرتبط با طوفان‌های گردوغبار را بررسی نمودند. نتایج آنان نشان داد که در دوره ۲۰۰۰-۲۰۰۴، شاهد فعالیت شدید گردوغبار بوده‌ایم و بیشترین میانگین

¹ Ali

² Wang

³ Bai

⁴ Bist and Choudhary

⁵ Kabatas

⁶ Liu

⁷ Najmeddin

⁸ Shahsavani

سرعت باد و کمترین بارش، رطوبت، پوشش گیاهی و پوشش آبی در این دوره مشاهده شده است. احمدی^۱ و همکاران (۲۰۲۲)، ارتباط بین قرار گرفتن در معرض PM₁₀ و بیماری‌های قلبی عروقی و تنفسی را در شهر زابل بررسی کردند. طبق نتایج آن‌ها، در طول تابستان میانگین غلظت PM₁₀ بیشترین مقدار خود را نشان می‌دهد که ممکن است به تعلیق ذرات معلق در حضور امواج گرما نسبت داده شود. پاتل^۲ و همکاران (۲۰۲۲)، در منطقه دنباد هند، به بررسی ارزیابی خطر سلامتی عنصر کمیاب در هوای محیط در امتداد جاده پرداختند. نتایج آنان نشان داد که مقدار شاخص خطر سرب برای کودکان به دلیل قرار گرفتن در معرض چند مسیری در تمام مکان‌های پایش بیشتر از ۱ بود و خطر سمی غیر سرطانی در آینده در کودکان را ایجاد خواهد کرد. هان^۳ و همکاران (۲۰۲۳)، به ارزیابی خطر سلامتی فلزات سنگین در گردوغبار جاده‌ای در چین پرداختند و نتیجه گرفتند از میان تمامی عناصر آلاینده، کادمیوم بیشترین اهمیت را دارد. با توجه به این که بادهای ۱۲۰ روزه یکی از مهم‌ترین عواملی هستند که باعث تجمع آلودگی در شهر زابل می‌شوند (یارمردای^۴ و همکاران، ۲۰۲۰) و به‌طور عمومی در فصل تابستان و در ماه‌های خرداد تا شهریور شروع به وزش می‌کنند (میری^۵ و همکاران، ۲۰۲۱). این بادهای شدید و خشک در منطقه باعث شده است که شهرستان زابل به شدت تحت تأثیر انتشار گردوغبار قرار گیرند (بهروز^۶ و همکاران، ۲۰۲۱). بنابراین با توجه به مطالعاتی که تاکنون صورت گرفته است، اهمیت موضوع مطالعه عناصر سنگین گردوغبار قابل لمس است و با توجه به اینکه تاکنون در شهر زابل مطالعه‌ای با هدف بررسی همبستگی پنج عنصر کروم، روی، سرب، کبالت و کادمیوم که از عوامل اصلی سرطان‌زایی ذرات با غلظت کمتر از ۱۰ میکرون هستند، صورت نگرفته است، هدف از این پژوهش، تعیین غلظت این فلزات و همبستگی این عناصر و ارزیابی ریسک و تأثیر آن‌ها بر سلامت انسان در شهر زابل می‌باشد.

داده‌ها و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه:

منطقه زابل در شمال استان سیستان و بلوچستان واقع شده و از شمال و شرق با افغانستان، از غرب با استان خراسان جنوبی و از جنوب با شهرستان زاهدان مرز مشترک دارد. این منطقه در محدوده ۶۱ درجه ۱۵ دقیقه تا ۶۱ درجه و ۵۱ دقیقه طول شرقی و ۳۰ درجه و ۴۸ دقیقه تا ۳۱ درجه و ۲۶ دقیقه عرض شمالی قرار دارد (حیدری نسب^۷، ۲۰۱۹). جمعیت این منطقه حدود ۳۰۰ هزار نفر است و مساحت آن در حدود ۱۵۱۹۷ کیلومترمربع است (شکل ۱). منطقه سیستان شامل بیش از ۹۰۰ روستا و پنج شهرستان زهک، زابل، هامون، نیمروز و هیرمند است. این منطقه با تبخیر زیاد و رطوبت کمی مواجه است و متوسط رطوبت سالیانه آن ۲۸ درصد، تبخیر آن ۵۰۰۰ میلی‌متر در سال و متوسط بارندگی آن ۴۷ میلی‌متر است. سیستان بیشترین تعداد روزهای همراه با گردوغبار را در جهان دارد و به‌طور میانگین هر سال بیش از ۱۶۰ روز از سال وزش باد همراه با گردوغبار دارد که به متلاشی شدن زیست‌بوم آن منجر شده است و بر اساس برآوردی که از تعداد روزهای توأم با طوفان و گردوخاک برای دوره ۱۰ ساله در سطح کشور

¹ Ahmadi

² Patel

³ Han

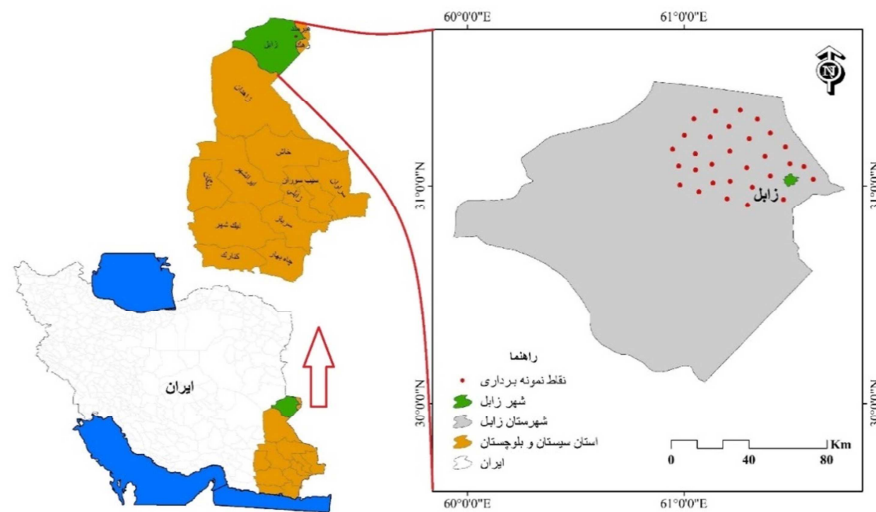
⁴ Yarmoradi

⁵ Miri

⁶ Behrooz

⁷ Heidari Nasab

انجام شده، منطقه سیستان با بیش از ۱۵۰۰ روز بالاترین نسبت را در سطح کشور به خود اختصاص داده است (میرزاک زهی^۱، ۲۰۱۸). اقلیم منطقه سیستان بر اساس طبقه‌بندی کوپن اصلاح‌شده، اقلیم صحرایی با آب‌وهوای خیلی گرم و خشک بیابانی یعنی تابستان‌های طولانی و زمستان‌های ملایم قلمداد شده است. بر اساس آمار ۳۰ ساله هواشناسی، در منطقه زابل سالیانه بیش از ۳۰۰ روز خشکی وجود دارد. از جمله خصوصیت‌های اقلیمی این منطقه می‌توان به وزش بادهای شدید (۱۲۰ روزه سیستان)، میانگین تعداد روزهای آفتابی سالیانه بیش از ۲۶۰ روز، دامنه تغییرات دمای شبانه‌روز بالا، بارندگی متوسط سالیانه برابر با ۶۴ میلی‌متر با پراکندگی نامناسب و همچنین بالا بودن دما و تعداد ساعات آفتابی اشاره کرد (محمدی‌نژاد، ۱۳۹۴).



شکل ۱: موقعیت منطقه مورد مطالعه بر روی نقشه‌های استان سیستان و بلوچستان و ایران

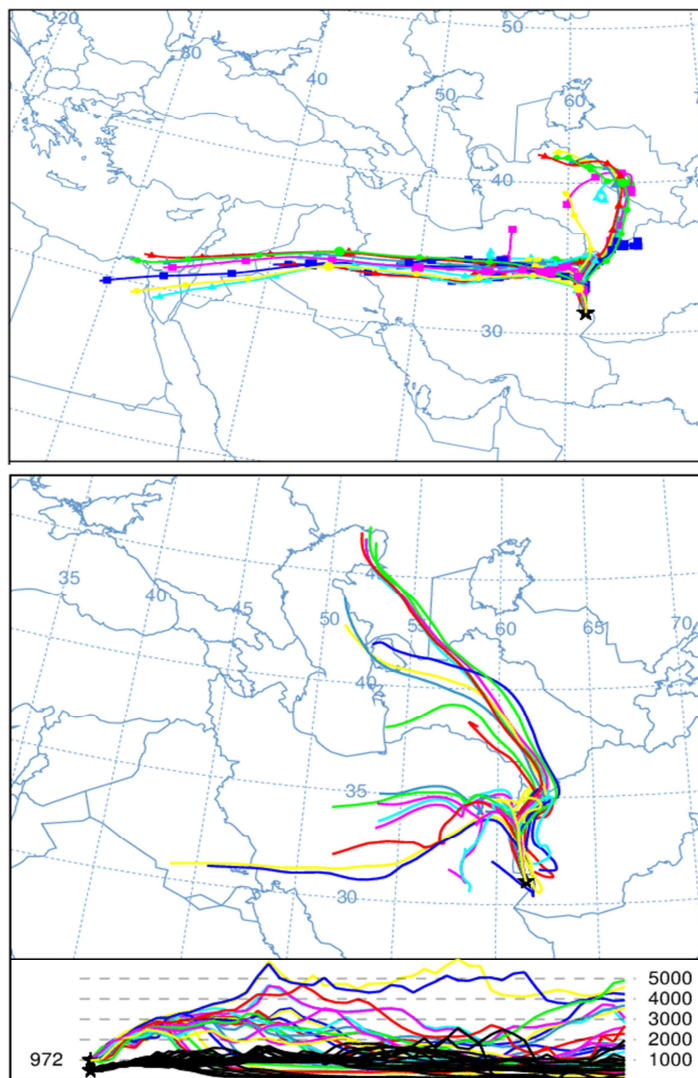
شکل ۲ نقشه جریان‌های گردوغبار در قسمت شرقی کشور و به‌طور خاص منطقه سیستان را نشان می‌دهد که با استفاده از مدل Hysplit^۲ (شان^۳ و همکاران، ۲۰۱۹) به‌صورت بکوارد^۴ با بازه زمانی ۴۸ ساعته برای روزهای نمونه‌برداری (۵ و ۶ خردادماه ۱۴۰۱) در این منطقه تهیه گردید. مدل Hysplit، یکی از پرکاربردترین مدل‌های هواشناسی در تعیین مسیر حرکت گردوغبار است (ارسلانی و همکاران، ۱۳۹۹). با توجه به آن می‌توان نتیجه گرفت که به‌طور کلی گردوغبار موجود در این شهرستان از دو جهت اصلی، کویر مرکزی ایران و از سمت شمال و شمال شرقی کشورهای افغانستان، ترکمنستان و قزاقستان نشأت گرفته‌اند و به منطقه سیستان وارد می‌شوند.

¹ Mirakzehi

² Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory Model

³ Shan

⁴ Backward



شکل ۲: نقشه ردیابی ذرات گردوغبار با مدل Hysplit برای شهرستان زابل (خردادماه ۱۴۰۱)

نمونه برداری و تجزیه و تحلیل نمونه‌ها:

در این مطالعه، برای بررسی غلظت فلزات سنگین در گردوغبار شهر زابل، از روش‌های استاندارد معتبر برای نمونه برداری استفاده شد (هان^۱ و همکاران، ۲۰۲۳). برای مطالعه غلظت ذرات معلق فلزات سنگین در شهر زابل، مرکز شهر به دلیل شرایط جغرافیایی و تمرکز جمعیت، به عنوان مکان نمونه برداری انتخاب شد. در این پژوهش، ۶۰ نمونه در روزهای گردوغباری، از اردیبهشت تا شهریور ماه با استفاده از دستگاه‌های نمونه بردار TCR جمع‌آوری شد (شکل ۳). هد موجود در این دستگاه ذرات PM_{10} را از سایر ذرات جدا می‌کند (وانگ^۲ و همکاران، ۲۰۲۱).

^۱ Han

^۲ Wang

پنج عنصر کروم، روی، سرب، کبالت و کادمیوم در اسید توسط دستگاه ICP-OES^۱ آنالیز شدند (لئونگ^۲ و همکاران، ۲۰۰۸). در مرحله بعد، نمونه‌های خاک به صورت تصادفی از فواصل ۲۰۰ متری در جهات مختلف کانون‌های فرسایش بادی اطراف شهر زابل و در مسیر باد منطقه جمع‌آوری شده و پس از آنالیز شیمیایی، ترکیب عناصر مورد نظر مشخص گردید. جمعا ۴۵ نمونه خاک از مناطق اطراف شهرستان زابل جمع‌آوری شدند. این نمونه‌ها جهت ارسال به آزمایشگاه به منظور تجزیه و تحلیل دقیق تر، از سطح بالایی خاک (در ارتفاع ۵ سانتی‌متری) با استفاده از بیلچه یا بورس برداشته شدند و سپس با استفاده از کیسه‌های پلاستیکی به آزمایشگاه منتقل گردیدند (وانگ و همکاران، ۲۰۲۱). در نهایت نمونه‌ها با استفاده از دستگاه ICP-OES (پلاسمای جفت‌شده القایی - اسپکترومتر جرمی سری ICP-MS ۷۸۰۰) موجود در آزمایشگاه مرکزی دانشگاه سیستان و بلوچستان (شکل ۲) آنالیز شدند (لیو^۳ و همکاران، ۲۰۱۹).



شکل ۳: دستگاه‌های مورد استفاده، الف: دستگاه‌های نمونه بردار TCR، ب: دستگاه ICP-OES

تحلیل آماری:

جهت بررسی چگونگی توزیع آماری داده‌های موجود، خلاصه وضعیت پارامترهای آماری همچون دامنه، میانگین، انحراف معیار و چولگی از نرم‌افزار SPSS.20 استفاده و محاسبات شاخص‌ها با نرم‌افزار Excel انجام گردید. جهت تعیین همبستگی غلظت عناصر، ابتدا نرمال بودن داده‌ها با آزمون شاپیرو ویلک^۴ و همبستگی عناصر با آزمون پیرسون در نرم‌افزار R صورت گرفت.

شاخص ریسک اکولوژیک (RI):

جهت ارزیابی خطر محیط زیستی فلزات موجود در گردوغبار، از شاخص پتانسیل ریسک اکولوژیک و معادلات ۱ تا ۳ استفاده شد (Miao و همکاران، ۲۰۲۲؛ رحمت^۵ و همکاران، ۲۰۲۲).

$$RI = \sum_{i=1}^n Er \quad (۱)$$

$$Er = Tr \times Cf \quad (۲)$$

¹ Inductivity Coupled Plasma- Optical Emission Spectrometry

² Leung

³ Liu

⁴ Shapiro-Wilk

⁵ Rahmat

$$C_f = C_s / C_n \quad (۳)$$

در این روابط Er ، RI ، Tr ، Cf ، Cs و Cn به ترتیب شاخص ریسک اکولوژیک عناصر، ریسک اکولوژیک عنصر مورد نظر، فاکتور سمیت^۱ هاکانسون که مقدار آن را برای پنج عنصر کروم، روی، سرب، کبالت و کادمیوم به ترتیب ۲، ۱، ۵، ۱۰ و ۳۰ تعیین کرد. Cf نیز از نسبت غلظت عنصر مورد نظر در نمونه به غلظت زمینه (پوسته زمین) آن عنصر به دست می‌آید. در واقع Cs حد مجاز غلظت عنصر در نمونه و Cn غلظت زمینه عنصر مورد نظر است. طبقه‌بندی RI و Er در جدول ۱ نشان داده شده است:

جدول ۱: طبقه‌بندی ریسک اکولوژیک

نوع شاخص	مقدار شاخص	طبقه ریسک
Er	$Er < 40$	کم
	$40 \leq Er < 80$	متوسط
	$80 \leq Er < 160$	قابل توجه
	$160 \leq Er < 320$	زیاد
	$Er \geq 320$	خیلی زیاد
RI	$RI < 150$	کم
	$150 \leq RI < 300$	متوسط
	$300 \leq RI < 600$	قابل توجه
	$RI \geq 600$	زیاد

ارزیابی خطر سرطان‌زایی و غیر سرطان‌زایی

ارزیابی خطرات مرتبط با عناصر سنگین فرآیندی چند مرحله‌ای است که به دو بخش اصلی ارزیابی خطرات سرطان‌زا و خطرات غیر سرطان‌زا تقسیم می‌شود. این ارزیابی با استفاده از روش‌های ارزیابی خطر بهداشتی توسط سازمان حفاظت محیط‌زیست آمریکا (USEPA) اجرا می‌شود (کینگ^۲ و همکاران، ۲۰۱۵). در این روش، برای بررسی هر دو نوع خطرات، سرطان‌زا و غیر سرطان‌زا، تمرکز بر روی قرارگیری انسان در معرض فلزات از سه مسیر اصلی، یعنی بلع، تنفس و جذب از طریق پوست قرار دارد. مقادیر جذب روزانه فلزات در هر یک از این مسیرها با استفاده از معادلات ۴ تا ۶ محاسبه و ارزیابی می‌شوند.

$$Intake_{ing} = \frac{C \times InGR \times EF \times ED}{BW \times AT} \times 10^{-6} \quad (۴)$$

$$Intake_{inh} = \frac{C \times InhR \times EF \times ED}{PEF \times BW \times AT} \quad (۵)$$

$$Intake_{dermal} = \frac{C \times SA \times SAF \times ABF_{dermal} \times EF \times ED}{BW \times AT} \times 10^{-6} \quad (۶)$$

مقادیر $Intake_{dermal}$: میانگین جذب روزانه فلزات از طریق پوست، $Intake_{inh}$: جذب از طریق تنفس و $Intake_{ing}$: جذب از طریق بلع (mg/kg.day) است.

^۱ Toxic factor

^۲ Qing

C: غلظت عناصر گردوغبار (mg/kg)، IngR: میزان تنفس در گردوغبار (به مترمکعب بر روز)، EF: مقدار قرارگیری در معرض عناصر (day/year)، ED: مدت قرارگیری در معرض عناصر (year)، BW: وزن بدن فرد در معرض عناصر (kg)، AT: مدت زمان قرارگیری در معرض عناصر (day)، SA: مساحت سطح پوست در معرض عناصر (cm²)، AF: چسبندگی گردوغبار به پوست (mg/cm².day) و ABF: جذب سطحی پوست (بدون واحد) است.

در جدول ۲، جزئیات پارامترهای استفاده شده در معادلات ارزیابی خطر بیان شده است (کینگ و همکاران، ۲۰۱۵ و وی^۱ و همکاران، ۲۰۱۵ و چابوکدهرا^۲ و همکاران، ۲۰۱۳).

پس از محاسبه میزان جذب روزانه فلزات، خطر غیر سرطان‌زایی (HI) کودکان و بزرگسالان از رابطه (۷) تعیین شد.

$$HQ = \frac{\text{Intake}}{\text{RfDi}} \quad (7)$$

در معادله HQ برای ارزیابی خطر غیر سرطان‌زایی فلزات در هر مسیر، از مقدار جذب روزانه فلزات در هر یک از مسیرهای احتمالی قرارگیری در معرض فلزات (به واحد میلی‌گرم بر کیلوگرم بدن در روز) بهره می‌بریم. اگر مقدار HQ برابر یا بزرگ‌تر از ۱ باشد، نشان‌دهنده ناسازگاری با سلامت انسان است؛ در صورتی که کوچک‌تر از ۱ باشد، اثرات نامطلوب و نگران‌کننده‌ای بر سلامت انسان را نشان می‌دهد. مقدار شاخص خطر تجمعی غیر سرطان‌زایی (HI) فلزات برای هر دو گروه بزرگسال و کودکان، طبق رابطه ۷ محاسبه می‌شود (روانخواه^۳ و همکاران، ۲۰۱۶). معادله HQ برای محاسبه خطر غیر سرطان‌زایی فلزات، مقدار جذب روزانه فلزات در معرض (mg/kg.day) را در نظر می‌گیرد. مقدار HQ برابر و یا بزرگ‌تر از ۱ نشان‌دهنده ناسازگاری با سلامت انسان و مقدار کوچک‌تر از ۱، اثرات نامطلوب و نگران‌کننده‌ای دارد. مقدار شاخص خطر تجمعی غیر سرطان‌زایی (HI) فلزات برای هر دو گروه بزرگسال و کودکان طبق معادله ۸ به دست می‌آید.

$$HI = \sum QHi \quad (8)$$

شاخص خطر سرطان‌زایی (Cancer Risk, CR) برای عناصر سرب، کروم و آرسنیک بر اساس دستورالعمل‌های پیشنهادی اداره حفاظت از محیط‌زیست آمریکا (EPA) محاسبه می‌شود. این شاخص نشان‌دهنده میزان خطر ابتلا به سرطان برای افرادی است که با این عناصر در محیط کار یا زندگی خود در ارتباط هستند. برای محاسبه شاخص خطر سرطان‌زایی سرب، کروم و آرسنیک از رابطه ۹ و ۱۰ می‌توان محاسبه کرد.

$$CR = \text{Intake} \times \text{CSF} \quad (9)$$

$$\text{TCR} = \sum CR = \text{CR}_{\text{ing}} + \text{CR}_{\text{inh}} + \text{CR}_{\text{dermal}} \quad (10)$$

که در آن CR: خطرپذیری بیماری سرطانی (بدون واحد)، TCR: خطر کل سرطانی (بدون سرطانی) و CSF فاکتور شیب سرطانی فلزات سنگین (mg kg⁻¹ day⁻¹) است. اگر مقدار خطر کل سرطانی کمتر از 1×10⁻⁶ باشد، این به معنای این است که احتمال سرطان از یک در یک میلیون نفر کمتر است و اثر قابل توجهی بر سلامت انسان ندارد و قابل اغماض است. با این حال، اگر خطر کل سرطانی بیشتر از 1×10⁻⁴ باشد، این به معنای غیرقابل قبول بودن خطر برای سلامت انسان است و خطرناک است. در صورتی که خطر کل بین 1×10⁻⁶ تا 1×10⁻⁴ باشد، نشان‌دهنده

¹ Wei

² Chabukdhara

³ Ravankhah

خطرپذیری با شرایط کنترل و نظارت است و باید توجه ویژه‌ای داشته باشیم تا خطرات مربوط به عناصر سنگین به حداقل رسیده و کنترل شوند (وی و همکاران، ۲۰۱۵).

جدول ۲: راهنمای پارامترهای معادلات ارزیابی خطر سرطان‌زایی و غیر سرطان‌زایی فلزات سنگین در گردوغبار

پارامتر	واحد اندازه‌گیری	بزرگ‌سال	کودکان
IngR	mg/day	۱۰۰	۲۰۰
InhR	m ³ /day	۲۰	۷/۶
EF	day/year	۳۵۰	۳۵۰
ED	year	۳۰	۶
BW	kg	۷۰	۱۵
AT	days	۱۰۹۵۰	۲۱۹۰
PEF	m ³ /kg	۱/۳۶ × ۱۰ ^۳	۱/۳۶ × ۱۰ ^۳
ESA	cm ²	۵۷۰۰	۲۸۰۰
AF	mg/cm ² .day	۰/۰۷	۰/۲
CSF	mg/kg.day	سرب (۴/۲ × ۱۰ ^{-۳})، کروم (۴/۲ × ۱۰ ^{-۱})، آرسنیک (۱/۵۱ × ۱۰ ^{-۱}) و روی (۴/۲ × ۱۰ ^{-۴})	
RfD_{ingestion}	mg/kg.day	سرب (۳ × ۱۰ ^{-۳})، کروم (۳ × ۱۰ ^{-۳})، آرسنیک (۳ × ۱۰ ^{-۴}) و روی (۳ × ۱۰ ^{-۱})	
RfD_{inhalation}	mg/kg.day	سرب (۳/۵۲ × ۱۰ ^{-۳})، کروم (۲/۸۶ × ۱۰ ^{-۵})، آرسنیک (۳/۱ × ۱۰ ^{-۴}) و روی (۳ × ۱۰ ^{-۱})	
RfD_{dermal}	mg/kg.day	سرب (۵/۲۵ × ۱۰ ^{-۴})، کروم (۶ × ۱۰ ^{-۵})، آرسنیک (۱/۲۳ × ۱۰ ^{-۴}) و روی (۶ × ۱۰ ^{-۲})	

نتایج و بحث

همبستگی میان فلزات و غلظت PM₁₀

بر اساس جدول ۳، نتایج ماتریس همبستگی پیرسون برای غلظت فلزات سنگین شهر زابل نشان داد که بین عناصر کادمیوم و کبالت/ منگنز و کبالت/ منگنز و کادمیوم/ سرب و کبالت/ سرب با کادمیوم و سرب با منگنز همبستگی معنی‌دار بالای ۷۰ درصد وجود دارد. همچنین بیشترین همبستگی غلظت بین عنصر کروم با PM₁₀ مشاهده شد. شکل ۵، همبستگی فلزات سنگین موجود در گردوغبار شهر زابل را به صورت گرافیکی نشان می‌دهد.

جدول ۳: ماتریس همبستگی پیرسون PM₁₀ با فلزات سمی در شهر زابل

Pb	Zn	Cr	Cd	Co	PM ₁₀
					۱
				۰/۳۶	PM ₁₀
			۱	۰/۸۲	Co
			۰/۶۴	۰/۴۸	Cd
		۱			Cr
	۱	۰/۵۶	۰/۸۸	۰/۸	Zn
۱	۰/۹۲	۰/۳۲	۰/۸	۰/۷۵	Pb



شکل ۵: همبستگی پیرسون PM₁₀ با فلزات سنگین شهر زابل

پتانسیل ریسک اکولوژیک: (Potential ecological risk)

خلاصه‌ای از پارامترهای آماری غلظت فلزات سنگین در نمونه‌های گردوغبار شهرستان زابل در جدول ۴ گزارش شده است. غلظت میانگین عناصر روی، کروم، سرب، کبالت و کادمیوم به ترتیب ۱/۱۷، ۰/۶۶، ۲/۰۱، ۰/۶۶ و ۰/۹ mg/kg است. به‌دست آمد. غلظت میانگین تمام عناصر بجز روی از مقدار زمینه (غلظت در پوسته زمین) کمتر بود. در واقع این مطلب نشان می‌دهد که جمعیت شهری کمتر و استفاده از وسایل نقلیه موتوری کمتر و به‌دنبال آن ترافیک شهری کم زابل می‌تواند دلیلی بر کم بودن غلظت عناصر کروم، سرب، کبالت و کادمیوم در این منطقه باشد.

جدول ۴: خلاصه‌ای از پارامترهای آماری غلظت فلزات سنگین در منطقه مورد مطالعه

فلزات سنگین	واحد	دامنه	میانگین	میانه	میانگین زمینه
روی (Zn)	mg/kg	۰-۶/۲۲	۱/۱۷	۰/۴۹	۰/۴۲
کروم (Cr)	mg/kg	۰-۱۳/۳۹	۰/۶۶	۰/۱۲	۷۳/۹۲
سرب (Pb)	mg/kg	۰/۰۶-۱۰/۸	۲/۰۱	۰/۸۹	۱۸/۳۹
کبالت (Co)	mg/kg	۰-۹/۶۵	۰/۶۹	۰	۱۰/۸
کادمیوم (Cd)	mg/kg	۰-۹/۴۷	۰/۹	۰	۱/۴۱

در این پژوهش، پتانسیل ریسک اکولوژیکی فلزات سنگین منطقه مورد مطالعه بر اساس روش هاکانسون محاسبه شده است (هاکانسون^۱، ۱۹۸۰). مقادیر پتانسیل ریسک اکولوژیک (Er) و شاخص ریسک (RI) در جدول ۵ ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که میانگین Er برای فلزات سنگین مورد مطالعه در نمونه‌های گردوغبار به‌صورت Zn>Pb>Cd>Cr در حال کاهش است. براساس مقدار میانگین Er فلزات سنگین، روی (۲۶۴/۲۶)، سرب (۵۴/۶۲)، کادمیوم (۱۹/۱۲) و کروم (۱/۷۸) دارای پتانسیل ریسک اکولوژیکی کم (Er < 40) است.

¹ Hakanson

جدول ۵: نتایج آماری ریسک اکولوژیک (Er) و شاخص ریسک (RI) فلزات سنگین در منطقه مورد مطالعه

شاخص ریسک (RI)	ریسک اکولوژیک (Er)				فلزات سنگین
	میانگین	ماکزیمم	مینیمم	میانگین	
۲۲/۲۳	۱۱۷/۰۳	۱۲۸۷/۳۸	۰	۲۶۴/۲۶	روی
	۰	۱۳/۹۳	۰	۱/۷۸	کروم
	۰/۳۴	۲۹۳/۷۷	۱/۵۷	۵۴/۶۲	سرب
	۰	۲۰۱/۴۸	۰	۱۹/۱۲	کادمیم

ارزیابی خطر سرطان‌زایی و غیر سرطان‌زایی

ارزیابی ریسک سلامت انسانی در نمونه‌های گردوغبار در معرض فلزات از سه مسیر اصلی بلع، تنفس و تماس پوستی برای کودکان و بزرگسالان مورد بررسی قرار گرفت.

میزان خطر غیر سرطان‌زایی (HQ) کل مسیرهای سه‌گانه برای تک تک فلزات سنگین به تفکیک کودکان بزرگسالان در جدول ۶ آمده است. بیشترین و کمترین میزان HQ در گروه سنی کودکان برای کلیه فلزات سنگین به ترتیب $1/14 \times 10^{-16}$ و $8/25 \times 10^{-16}$ (mg/kg) و در گروه سنی بزرگسالان $1/23 \times 10^{-15}$ و $3/42 \times 10^{-15}$ (mg/kg) مربوط به فلز کادمیم و کروم می‌باشد.

با توجه به جدول ۶، ارزیابی ریسک غیرسرطانی عناصر منتخب از مسیر بلع برای شهر زابل نشان داد که عنصر روی در شهر زابل برای بزرگسالان ریسک کم و برای کودکان کلاس ریسک متوسط دارد. عنصر کروم نیز در شهر زابل دارای ریسک زیاد برای کودکان و بزرگسالان می‌باشد که نشان می‌دهد این عنصر برای سلامتی افراد خطری جدی از طریق بلع در پی دارد. همچنین عنصر روی برای بزرگسالان ریسک متوسط و برای کودکان در کلاس ریسک زیاد قرار می‌گیرد. سرب نیز در شهر زابل برای هر دو گروه سنی ریسک خطر غیرسرطان‌زایی خیلی کمی دارند. از طرفی عنصر کبالت در شهر زابل برای هر دو گروه سنی در کلاس ریسک زیاد قرار می‌گیرد که نشان از اهمیت عنصر کبالت در خطر غیر سرطانی از مسیر بلع در شهر زابل می‌باشد. کادمیم نیز از نظر ریسک غیر سرطانی برای بزرگسالان ریسک زیاد و برای کودکان ریسک خیلی زیادی را در پی دارد. بنابراین عناصر کروم و کبالت، کادمیم در شهر زابل وضعیت بحرانی داشته که برای هر دو گروه سنی تهدید جدی محسوب می‌شود. در نهایت مجموع ریسک غیر سرطانی (HI) تمامی عناصر از مسیر بلع نشان داد که در شهر زابل این خطر برای بزرگسالان زیاد و برای کودکان بسیار زیاد می‌باشد؛ چرا که کودکان بیشتر در معرض خطر عناصر سنگین از طریق بلع قرار دارند و مقادیر قابل-توجهی از گردوغبار را با فرو بردن دست در دهان، از طریق بلع وارد بدن خود می‌کنند و به دلیل سیستم ایمنی توسعه نیافته و ضعیف، کودکان بیشتر در معرض مسمومیت با فلزات سنگین قرار دارند. کینگ^۱ و همکاران (۲۰۱۵) نیز دریافتند که HI در کودکان خیلی بیشتر از بزرگسالان است که با نتایج این پژوهش همخوانی دارد. در پژوهشی دیگر، قنواتی (۱۳۹۷) بیان داشت که در هر دو گروه سنی کودک و بزرگسال، فلز کروم دارای بیشترین خطر سرطان‌زایی و فلز سرب کمترین خطر را دارد که با نتایج این پژوهش مطابقت دارد.

¹ Qing

جدول ۶: خطر غیر سرطان‌زایی فلزات سنگین در شهر زابل به تفکیک بزرگسالان و کودکان

میزان خطر	فلز (mg/kg)					پارامتر
	کادمیم	کبالت	سرب	کروم	روی	
کودکان						HQing
	$1/14 \times 10^{-2}$	$2/92 \times 10^{-3}$	$7/33 \times 10^{-9}$	$2/81 \times 10^{-3}$	$4/97 \times 10^{-5}$	HQinh
	$3/21 \times 10^{-7}$	$8/18 \times 10^{-8}$	$2/03 \times 10^{-13}$	$8/25 \times 10^{-16}$	$1/39 \times 10^{-9}$	HQderm
کم	$3/21 \times 10^{-7}$	$2/45 \times 10^{-5}$	$1/36 \times 10^{-12}$	$3/94 \times 10^{-12}$	$6/96 \times 10^{-7}$	HI={HQi
	$1/46 \times 10^{-3}$	$2/94 \times 10^{-3}$	$7/33 \times 10^{-9}$	$2/81 \times 10^{-3}$	$5/04 \times 10^{-5}$	HI total
						بزرگسالان
متوسط						HQing
زیاد	$1/23 \times 10^{-3}$	$3/13 \times 10^{-4}$	$7/86 \times 10^{-9}$	$2/22 \times 10^{-4}$	$5/33 \times 10^{-6}$	HQinh
	$1/81 \times 10^{-7}$	$4/61 \times 10^{-8}$	$1/14 \times 10^{-13}$	$3/42 \times 10^{-15}$	$7/83 \times 10^{-10}$	HQderm
	$4/91 \times 10^{-4}$	$3/75 \times 10^{-6}$	$2/07 \times 10^{-12}$	$4/42 \times 10^{-12}$	$1/06 \times 10^{-7}$	HI={HQi
خیلی زیاد	$1/72 \times 10^{-3}$	$3/17 \times 10^{-4}$	$7/86 \times 10^{-9}$	$2/22 \times 10^{-4}$	$5/44 \times 10^{-6}$	HI total
						$2/27 \times 10^{-3}$

ارزیابی ریسک سرطان‌زایی عناصر منتخب از مسیر بلع در شهر زابل در جدول ۷ نشان داد که عنصر روی برای بزرگسالان ریسک متوسط و برای کودکان در کلاس ریسک زیاد قرار می‌گیرد. عنصر کروم نیز دارای ریسک متوسط برای بزرگسالان و ریسک زیاد برای کودکان می‌باشد که نشان می‌دهد این عنصر برای سلامتی افراد خطر سرطانی شدن از طریق بلع را در پی دارد. سرب در شهر مورد مطالعه برای بزرگسالان ریسک خیلی کم و برای کودکان ریسک کمی را شامل می‌شود. چابک دهرا^۱ و همکاران (۲۰۱۳) گزارش نمودند که بیشترین RI در منطقه صنعتی هند بعد از کروم به ترتیب مربوط به نیکل، سرب و کادمیوم بوده است. عنصر کبالت در شهر زابل برای کودکان کلاس خطر متوسط و برای بزرگسالان کلاس خطر کم را در بر می‌گیرد. عنصر کادمیوم نیز برای گروه سنی بزرگسالان خطر کم و برای کودکان زیاد می‌باشد. مجموع ریسک سرطانی (TCR) تمامی عناصر برای هر دو گروه سنی شهر زابل نشان داد که خطر سرطانی فلزات سنگین موجود در گردوغبار از طریق بلع، زیاد بوده و نیازمند اقدامات پیشگیرانه جدی می‌باشد. با توجه به خطرات سلامتی انسان، بلع به‌عنوان مسیر اصلی در معرض قرار گرفتن مشخص گردید و این مهم برای کودکان خطرات غیرسرطان‌زایی و سرطان‌زایی بالاتری را نسبت به بزرگسالان نشان می‌دهد (فی^۲ و همکاران، ۲۰۲۳). در پژوهشی مددی^۳ و همکاران (۲۰۲۲)، خطر سلامت غیر سرطان‌زا (HI) در معرض قرار گرفتن عنصر سرب را برای کودکان در مناطق صنعتی انجام دادند. بیان نمودند احتمال خطر سرطان‌زایی Pb و Cr در گردوغبار مناطق صنعتی زیاد می‌باشد که این نتایج در خصوص عناصر نامبرده با این پژوهش مطابقت دارد.

نتایج ارزیابی ریسک سلامت عناصر در نمونه‌های گردوغبار شهر زابل نشان داد که در هر دو گروه کودکان و بزرگسالان، مسیر دهان (بلع)، مسیر اصلی مواجهه با خطرات ناشی از عناصر منتخب در گردوغبار این مناطق می‌باشد و تماس پوستی و استنشاقی به ترتیب در مراحل بعدی اهمیت قرار دارند (بلع < پوستی < تنفس). در مطالعات

¹ Chabukdhara

² Fei

³ Madadi

آسود و همکاران (۱۳۹۹)، ژانگ^۱ و همکاران در سال ۲۰۱۸، نیز این نتایج مشاهده شده است و این محققین مسیر بلع را مسیر اصلی مواجهه با خطرات فلزات سنگی موجود در گردوغبار دانستند که با نتایج این پژوهش برای شهر زابل مطابقت دارد. همچنین دهقانی^۲ و همکاران (۲۰۱۷)، بیان داشتند که مقدار خطر غیر سرطانی از مسیر تنفس چندین واحد پایین‌تر از مسیرهای پوستی و بلع بوده و آلاینده‌ها از طریق تنفس کمترین خطر را دارند. رحمان^۳ و همکاران (۲۰۲۰)، اظهار نمودند که بلع مسیر اصلی قرارگرفتن در معرض خطرات سرطان‌زایی و غیرسرطان‌زایی عناصر سنگین از طریق گردوغبار در مدارس لاهور پاکستان است. همچنین عنصر کروم را خطرناک‌ترین عنصر برای خطر سرطان‌زای سلامت (CR)، در مناطق صنعتی معرفی کردند.

ژونگ^۴ و همکاران (۲۰۲۳)، با بررسی خطرات ناشی از فلزات سنگین در گردوغبار جاده‌ها، برای سلامتی انسان و ایمنی محیط‌زیست بیان نمودند که فلزات سنگینی مانند کادمیوم، مس، روی و سرب با خطرات بالای سرطان‌زایی و غیر سرطان‌زایی برای سلامتی انسان همراه هستند. نتایج مطالعات پانکینگ^۵ و همکاران (۲۰۲۳) و سرلی^۶ و همکاران (۲۰۲۲)، نشان می‌دهد که بیشترین و کمترین میزان HQ برای کلیه فلزات سنگین، به ترتیب در مسیر بلع بیشتر از جذب پوستی و تنفس مشاهده می‌شود. همچنین، میزان HQ در مسیر بلع و تنفس برای کودکان بیشتر از بزرگسالان بوده و در مسیر جذب پوستی برای بزرگسالان بیشتر از کودکان مشاهده می‌گردد. خطر تجمعی غیر سرطان‌زایی کلیه فلزات سنگین در گردوغبار خیابانی برای کودکان بیشتر از بزرگسالان است که این امر نشان داد کودکان بیشتر از بزرگسالان در معرض خطر فلزات سنگین قرار دارند.

جدول ۷: خطر سرطان‌زایی فلزات سنگین در شهر زابل به تفکیک بزرگسالان و کودکان

میزان خطر	فلز (mg/kg)					پارامتر
	کادمیم	کبالت	سرب	کرم	روی	
کودکان						CRing
	$4/83 \times 10^{-4}$	$1/32 \times 10^{-5}$	$1/07 \times 10^{-6}$	$3/54 \times 10^{-4}$	$6/26 \times 10^{-3}$	CRinh
	$1/35 \times 10^{-8}$	$3/71 \times 10^{-9}$	$3/01 \times 10^{-11}$	$9/91 \times 10^{-9}$	$1/75 \times 10^{-8}$	CRderm
	$1/61 \times 10^{-8}$	9×10^{-8}	$6/11 \times 10^{-10}$	$1/18 \times 10^{-8}$	$2/08 \times 10^{-8}$	TCR
بزرگسالان						CR total
	$4/83 \times 10^{-4}$	$1/32 \times 10^{-5}$	$1/07 \times 10^{-6}$	$3/54 \times 10^{-4}$	$5/04 \times 10^{-5}$	CR total
	$9/02 \times 10^{-4}$					
						CR total
میانگین						CRing
	$1/85 \times 10^{-6}$	$1/41 \times 10^{-6}$	$1/15 \times 10^{-7}$	$3/8 \times 10^{-5}$	$6/71 \times 10^{-5}$	CRinh
	$2/73 \times 10^{-9}$	$2/09 \times 10^{-9}$	$1/69 \times 10^{-11}$	$5/59 \times 10^{-9}$	$9/87 \times 10^{-9}$	CRderm
	$1/8 \times 10^{-8}$	$1/37 \times 10^{-8}$	$9/33 \times 10^{-11}$	$1/8 \times 10^{-9}$	$3/19 \times 10^{-9}$	TCR
کلی زائد	$1/87 \times 10^{-6}$	$1/43 \times 10^{-6}$	$1/15 \times 10^{-7}$	$3/8 \times 10^{-5}$	$6/71 \times 10^{-5}$	CR total
	$1/09 \times 10^{-4}$					

¹ Zhang

² Dehghani

³ Rehman

⁴ Zong

⁵ Panqing

⁶ Cirelli

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، غلظت فلزات منتخب (Pb و Zn, Cr, Cd, Co) در گردوغبار شهر زابل مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که در شهر زابل، غلظت سرب و روی بیشترین مقدار را داشت. از جهتی دیگر غلظت روی در نمونه‌های گردوغبار بیشتر از مقدار زمینه (غلظت در پوسته زمین) بودند. در نتیجه منشأ گردوغبار در شهرستان‌های زابل از منابع محلی و خارجی یعنی تالاب خشک هامون، کویر مرکزی ایران و عرض‌های جغرافیایی بالاتر شامل شرق دریای کاسپین بیابان‌های قره قوم و دریاچه آرال مشتق می‌شود. همچنین فلزات سنگین مرتبط با منشأ انسانی مانند تاسیسات صنعتی، ترافیک، تولید برق، سوخت‌سوزی روغن در مناطق مسکونی و فعالیت‌های ساخت‌وساز نیز وجود دارد و با توجه به مقایسه با پژوهش‌های مشابه، می‌توان نتیجه گرفت که عواملی مانند شرایط اقلیمی محلی و رویدادهای گردوغبار مناطق اطراف نیز نقش مهمی در افزایش غلظت فلزات سنگین در گردوغبار شهر زابل دارند. بررسی میزان ذرات کوچک‌تر و یا مساوی ۱۰ میکرون (PM₁₀) نیز نشان داد که شهر زابل با وضعیت بحرانی از لحاظ شاخص سلامت مواجه است و غلظت ذرات PM₁₀ به مقادیر خطرناکی افزایش یافته و وضعیت سلامت هوا بسیار نگران‌کننده می‌باشد. میانگین غلظت فلزات سنگین در گردوغبار شهرستان زابل نشان داد که شهر زابل از فلزات سنگین آلوده است. این غلظت فلزات می‌تواند به عوامل مختلفی برگردد، از جمله برداشت و انتقال عناصر از تالاب خشک هامون، انتشار ذرات PM₁₀ به‌وسیله بادهای ۱۲۰ روزه از سمت مناطق شمال و شمال شرقی یا عرض‌های بالاتر، فعالیت‌های صنعتی، ترافیک شهری و میزان جمعیت، از طرفی شهر زابل با جمعیت و ترافیک شهری کمتر انتظار می‌رود منابع آلاینده کمتری داشته باشد. بنابراین با توجه به این مهم و با در نظر گرفتن مسیر باد غالب، می‌توان قسمت اعظم غلظت فلزات سنگین شهر زابل را به انتشار و انتقال از طریق باد و از منابع دورتر نسبت داد. نتایج این پژوهش نشان داد که اقدامات پیشگیرانه و کنترلی برای کاهش خطرات ناشی از فلزات سنگین در گردوغبار شهر زابل لازم بوده و باید به مسیر جذب عناصر از طریق بلع توجه ویژه‌ای گردد. همچنین عنصر کرم خطرات بالایی را برای سلامتی ساکنین زابل ایجاد می‌کند. این خطرات می‌توانند به‌صورت سرطان‌زایی و غیرسرطان‌زایی برای افراد مختلف، به‌خصوص کودکان، پدید آید. قابل یادآوری است که کودکان بیشتر از بزرگسالان در معرض خطر فلزات سنگین قرار داشته و میزان خطر تجمعی غیرسرطان‌زایی کلیه فلزات سنگین برای کودکان بیشتر از بزرگسالان است. این نتیجه می‌تواند به‌عنوان انگیزه‌ای برای اقدامات پیشگیرانه و کنترلی جدی در این مناطق برای حفظ سلامتی افراد و به‌ویژه کودکان در نظر گرفته شود.

تقدیر و تشکر

بدین‌وسیله از حمایت مالی دانشگاه زابل به شماره گونت IR-UOZ0088 در انجام این پژوهش کمال تشکر و قدردانی را داریم.

منابع

ارسلانی، فاطمه؛ علیجانی، بهلول؛ اکبری، مه‌ری؛ محمدخان، شیرین. (۱۳۹۹). بررسی عناصر سنگین (Cd و Cr, Cu, Ni, Pb) موجود در غبار ریزشی شهر تهران، پژوهش‌های دانش زمین، دوره ۱۱، شماره ۴۴. صص: ۱۵-۳۶.

آسود، سید رضا. (۱۳۹۹). مقایسه و ارزیابی ریسک سلامت عناصر منتخب در گردوغبار داخل و خارج منازل در اهواز، زابل و منطقه پارس جنوبی. رساله دکتری، دانشگاه تربیت مدرس. ۹۴ص.

- حمیدیان پور، محسن؛ مفیدی، عباس؛ سلیقه، محمد. (۱۳۹۵). تحلیل ماهیت و ساختار باد سیستان. مجله ژئوفیزیک ایران، دوره ۱۰، شماره ۲. صص: ۸۳-۱۰۹.
- خشتابه، ریحانه؛ اکبری، مرتضی؛ حیدری، آوا؛ نجف پور، علی اصغر. (۱۴۰۲). تأثیر استخراج سنگ آهن بر غلظت برخی از فلزات سنگین و پهنه‌بندی آلودگی خاک مطالعه موردی: معدن سنگ آهن سنگان، خواف-ایران، نشریه آب و خاک، دوره ۳۷، شماره ۱، صص: ۷۷-۹۴.
- فیروزیان، سارا؛ سعیدآبادی، محمد صادق. (۱۳۹۵). بررسی اثرات و آسیب‌های اجتماعی ریزگردها (مطالعه موردی شهرستان سیستان)، کنفرانس بین‌المللی پژوهش در مهندسی، علوم و تکنولوژی، دوره ۴، موسسه پندار همایش پارس.
- قنواتی، نوید. (۱۳۹۷). ارزیابی خطر فلزات سنگین بر سلامت انسانی در گردوغبار خیابانی شهر آبادان، فصلنامه سلامت و محیط‌زیست، شماره ۱۱، دوره ۱. صص: ۶۳-۷۴.
- مظلومی، سهراب، اسماعیلی ساری، عباس، بهرامی‌فر، نادر، معین‌الدینی، مظاهر (۱۳۹۶): ارزیابی میزان حضور فلزات و شبه فلزات در گردوغبار خیابانی غرب و شرق تهران، سلامت و محیط‌زیست، دوره ۱۰، شماره ۲، صص: ۲۸۱-۲۹۲.
- طاعتی، عباس؛ صالحی، محمد حسین؛ محمدی، جهانگرد؛ مهاجر، رضا. (۱۳۹۹). ارزیابی سطح آلودگی، ریسک غیرسرطان‌زایی و سرطان‌زایی فلزات سنگین بر سلامت انسان در خاک‌های سطحی مناطق صنعتی اراک، ایران، سلامت و محیط‌زیست، دوره ۱۳، شماره ۲، صص: ۳۳۵-۳۴۸.
- Ahmadi, S., Ezeliora, C.D., Sharki, S.H., Osagie, C., Ghosh, S., Igwegbe, C.A. and Khan, N.A. (2022). Assessment of health impacts attributed to PM10 exposure during 2015–2017 in Zabol City, Iran. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 19(5), pp.4123-4136.
- Ali, M.U., Yu, Y., Yousaf, B., Munir, M.A.M., Ullah, S., Zheng, C., Kuang, X. and Wong, M.H. (2021). Health impacts of indoor air pollution from household solid fuel on children and women. *Journal of hazardous materials*, 416, p.126127.
- Bai, B., Bai, F., Sun, C., Nie, Q., & Sun, S. (2023). Adsorption mechanism of shell powders on heavy metal ions Pb²⁺/Cd²⁺ and the purification efficiency for contaminated soils. *Frontiers in Earth Science*, 10, p.1071228.
- Behrooz, R.D., Kaskaoutis, D.G., Grivas, G. and Mihalopoulos, N. (2021). Human health risk assessment for toxic elements in the extreme ambient dust conditions observed in Sistan, Iran. *Chemosphere*, 262, p.127835.
- Bist, P., and Choudhary, S. (2022). Impact of heavy metal toxicity on the gut microbiota and its relationship with metabolites and future probiotics strategy: a review. *Biological Trace Element Research*, 200(12), pp.5328-5350.
- Chabukdhara, M. and Nema, A.K. (2013). Heavy metals assessment in urban soil around industrial clusters in Ghaziabad, India: probabilistic health risk approach. *Ecotoxicology and environmental safety*, 87, pp.57-64.
- Cirelli, P., Bilo, F., Tsuji, K., Matsuyama, T., Siviero, G., Pisani, L., Zacco, A., Depero, L.E., Eichert, D., Borgese, L. (2022). Assessment of calibration methods for Pb-loaded aerosol filters analyzed with X-ray fluorescence under grazing incidence. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 192, p.106414.
- Dehghani, S., Moore, F., Keshavarzi, B. and Beverley, A.H. (2017). Health risk implications of potentially toxic metals in street dust and surface soil of Tehran, Iran. *Ecotoxicology and environmental safety*, 136, pp.92-103.
- Fei, X., Lou, Z., Xiao, R., Lv, X. and Christakos, G. (2023). Contamination and health risk assessment of heavy metal pollution in soils developed from different soil parent materials. *Exposure and Health*, 15(2): 395-408
- Hakanson, L. (1980). An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach. *Water Research*, 14(8), pp.975-1001.
- Han, Q., Wang, M., Xu, X., Li, M., Liu, Y., Zhang, C., Li, S. and Wang, M. (2023). Health risk assessment of heavy metals in road dust from the fourth-tier industrial city in central China based on Monte Carlo simulation and bioaccessibility. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 252, p.114627.
- Heydari Nasab, M., Karam, A., Negaresh, H. and Pahlavanravi, A. (2019). Morphometric Analysis of Sand Dunes and the Speed of Their Displacement in Sistan Plain. *The Journal of Geographical Research on Desert Areas*, 7(1), pp.149-164.
- Javid, A., Nasiri, A., Mahdizadeh, H., Momtaz, S.M., Azizian, M. and Javid, N. (2021). Determination and risk assessment of heavy metals in air dust fall particles. *Environmental Health Engineering And Management Journal*, 8(4), pp.319-327.
- Kabatas, B., Pierce, R.B., Unal, A., Rogal, M.J. and Lenzen, A. (2018). April 2008 Saharan dust event: Its contribution to PM10 concentrations over the Anatolian Peninsula and relation with synoptic conditions. *Science of the Total Environment*, 633, pp.317-328.
- Leung, A.O., Duzgoren-Aydin, N.S., Cheung, K.C., Wong, M.H. (2008). Heavy metals concentrations of surface dust from e-waste recycling and its human health implications in southeast China. *Environmental science & technology*, 42(7), pp.2674-2680.
- Liu, X.X., Hu, X., Cao, Y., Pang, W.J., Huang, J.Y., Guo, P., Huang, L. (2019). Biodegradation of phenanthrene and heavy metal removal by acid-tolerant *Burkholderia fungorum* FM-2. *Frontiers in microbiology*, 10, p.408.
- Luo, H., Wang, Q., Guan, Q., Ma, Y., Ni, F., Yang, E. and Zhang, J. (2022). Heavy metal pollution levels, source apportionment and risk assessment in dust storms in key cities in Northwest China. *Journal of Hazardous Materials*, 422, p.126878.

- Madadi, R., Mohamadi, S., Rastegari, M., Karbassi, A., Rakib, M.R.J., Khandaker, M.U., Faruque, M.R.I. and Idris, A.M. (2022). Health risk assessment and source apportionment of potentially toxic metal (loid) s in windowsill dust of a rapidly growing urban settlement, Iran. *Scientific reports*, 12(1), p.19736.
- Madiha, Z., Rashid, A., Ayesha, A., Yasir, Sh., Liaqat, A., Mahpara, F., Khalid, A. and Shuangfei, L. (2022). Health and environmental effects of heavy metals. *Journal of King Saud University-Science*, 34(1), p.101653.
- Manasreh, W., Hailat, I. and El-Hasan, T.M. (2010). Heavy metal and anionic contamination in the water and sediments in Al-Mujib reservoir, central Jordan. *Environmental Earth Sciences*, 60, pp.613-621.
- Miao, F., Zhang, Y., Li, Y., Fang, Q. & Zhou, Y. (2022). Implementation of an integrated health risk assessment coupled with spatial interpolation and source contribution: A case study of soil heavy metals from an abandoned industrial area in Suzhou, China. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, pp.1-15.
- Mirakzehi, K., Pahlavan-Rad, M.R., Shahriari, A. and Bameri, A. (2018). Digital soil mapping of deltaic soils: A case of study from Hirmand (Helmand) river delta. *Geoderma*, 313, pp.233-240.
- Miri, A., Maleki, S. and Middleton, N. (2021). An investigation into climatic and terrestrial drivers of dust storms in the Sistan region of Iran in the early twenty-first century. *Science of the Total Environment*, 757, p.143952.
- Miri, A., Shirmohammadi, E. and Sorooshian, A. (2023). Impacts of dust storms on indoor and outdoor bioaerosol concentration in the Sistan region of Iran. *Journal of Building Engineering*, 76. p.107302.
- Najmeddin, A., Moore, F., Keshavarzi, B. and Sadegh, Z. (2018). Pollution, source apportionment, and health risk of potentially toxic elements (PTEs) and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in urban street dust of Mashhad, the second largest city of Iran. *Journal of Geochemical Exploration*, 190. pp.154-169
- Panqing, Y., Abliz, A., Xiaoli, S., Aisaiduli, H. (2023); Human health-risk assessment of heavy metal-contaminated soil based on Monte Carlo simulation. *Scientific Reports*, 13(1), p.7033.
- Patel, D.K. and Jain, M.K. (2022). Health risk assessment of trace elements in the ambient air along the roadside in Dhanbad, India. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 19(5), pp.4107-4122.
- Qing X, Yutong Z, Shenggao L. (2015). Assessment of heavy metal pollution and human health risk in urban soils of steel industrial city (Anshan), Liaoning, Northeast China. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 120:377-85.
- Rahmat, M.A., Ismail, A.F., Rodzi, N.D., Aziman, E.S., Idris, W.M.R., Lihan, T. (2022); Assessment of natural radionuclides and heavy metals contamination to the environment: Case study of Malaysian unregulated tin-tailing processing industry. *Nuclear Engineering and Technology*, 54(6), pp.2230-2243.
- Rashki, A., Kaskaoutis, D.G. and Sepehr, A. (2018). Statistical evaluation of the dust events at selected stations in Southwest Asia: From the Caspian Sea to the Arabian Sea. *Catena*, 165, pp.590-603.
- Ravankhah, N., Mirzaei, R., Masoum, S. (2016). Human health risk assessment of heavy metals in surface soil. *Journal of Mazandaran University of Medical Sciences*. 26(136): 109-120.
- Rehman, A., Liu, G., Yousaf, B., Zia-ur-Rehman, M., Ali, M.U., Rashid, M.S., Farooq, M.R. and Javed, Z. (2020). Characterizing pollution indices and children health risk assessment of potentially toxic metal (oid) s in school dust of Lahore, Pakistan. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 190, p.110059.
- Safiur Rahman, M., Prashant Kumar, Mohammad Ullah, Yeasmin N. Jolly, Shirin Akhter, Jamiul Kabir, Bilkis A. Begum, Abdus Salam. (2021). Elemental analysis in surface soil and dust of roadside academic institutions in Dhaka city, Bangladesh and their impact on human health. *Environmental Chemistry and Ecotoxicology* 3 - 197-208.
- Shahsavani, A., Tobías, A., Querol, X., Stafoggia, M., Abdolshahnejad, M., Mayvaneh, F., Guo, Y., Hadei, M., Hashemi, S.S., Khosravi, A. and Namvar, Z. (2020). Short-term effects of particulate matter during desert and non-desert dust days on mortality in Iran. *Environment International*, 134, p.105299.
- Shan, W., Yin, Y., Lu, H. and Liang, S. (2009). A meteorological analysis of ozone episodes using the HYSPLIT model and surface data. *Atmospheric Research*, 4(93), pp.767-776.
- Wang, X., Qin, Y., Qin, J., Yang, Y., Qi, T., Chen, R., Tan, J. and Xiao, K. (2021). The interaction laws of atmospheric heavy metal ions and water-soluble organic compounds in PM_{2.5} based on the excitation-emission matrix fluorescence spectroscopy. *Journal of Hazardous Materials*, 402, p.123497.
- Wei, X., Gao, B., Wang, P., Zhou, H., Lu, J. (2015); Pollution characteristics and health risk assessment of heavy metals in street dust from different functional areas in Beijing, China. *Ecotoxicology and environmental safety*, 112.,186-192.
- Yarmoradi, Z., Nasiri, B., Mohammadi, G.H. and Karampour, M. (2020). Long-term characteristics of the observed dusty days and its relationship with climatic parameters in East Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 13(6), p.242.
- Zhang, W., Chang, W.J., Zhu, Z.C. and Hui, Z. (2020). Landscape ecological risk assessment of Chinese coastal cities based on land use change. *Applied Geography*, 117, p.102174.
- Zong, Y., Xiao, Q., Malik, Z., Lu, S. (2023). Exploring Environment Pollution and Risk Assessment of Heavy Metals in Road Dusts from a Typical Steel-Industrial City (Anshan), Northeastern China. *Water, Air, & Soil Pollution*. 234(1): p.34.