

Investigating the Distribution of Heavy Metals (Lead and Zinc) in the soil around the Shahin Lead and Zinc Mine in Shazand city

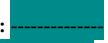
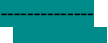
Sana Barzegar¹, Eisa Solgi^{2*} , Bakhtiar Fattahi³

1. MSc. Graduate, Department of Environmental Sciences and Engineering, Faculty of Natural Resources and Environment, Malayer University, Malayer, Iran

2. **Corresponding Author**, Professor, Department of Environment, Faculty of Natural Resources and Environment, Malayer University, Malayer, Iran

Email: e.solgi@malayeru.ac.ir ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5405-9513>

3. Assistant Professor, Department of Environment, Faculty of Natural Resources and Environment, Malayer University, Malayer, Iran

Article Info	ABSTRACT
Article type: Research Article	Mining activities are among the major sources of heavy metal input into soils and can intensify environmental risks in areas surrounding mines. This study aimed to assess soil contamination around the Shahin mine in Shazand County and to investigate the spatial distribution patterns of lead (Pb) and zinc (Zn). For this purpose, 24 surface soil samples were collected radially from around the mine at a depth of 0–20 cm. The Kruskal–Wallis test was used to examine variations in metal concentrations across different directions and distances from the mine. In addition, the geo-accumulation index (Igeo), contamination factor (CF), and pollution load index (PLI) were calculated to evaluate contamination intensity. The results showed that the mean concentrations of Pb and Zn in the study area were 239.97 and 73.04 mg/kg, respectively. The highest concentrations of Pb (629.12 mg/kg) and Zn (131.38 mg/kg) were observed in the southern part of the mine, whereas the lowest Pb (50.30 mg/kg) and Zn (9.64 mg/kg) concentrations were recorded in the northwest and east, respectively. The Igeo values for Pb ranged from 1.42 to 5.07, indicating moderate to extremely severe contamination, while those for Zn ranged from -3.45 to 0.32, reflecting unpolluted to slightly polluted conditions. The CF values for Pb (4.02–50.33) indicated high to very high contamination, whereas those for Zn (0.14–1.88) indicated low to moderate contamination. The PLI value (2.21) also confirmed considerable soil contamination in the area, with Pb as the main contributor. Overall, soils surrounding the Shahin mine, especially near the mine site and waste dumps, showed significant Pb contamination. This contamination is mainly attributed to mining activities, weathering of metallic minerals, and surface transport of pollutants. Therefore, continuous monitoring and proper waste management are essential to reduce environmental risks in the area.
Article history:	
Received: 	
Revised: 	
Accepted: 	
Published: 	
Keywords: Heavy metals, Soil Pollution Monitoring, Shahin mine, Lead & Zinc Pollution.	
How to Cite: Last Name, Initial., Last Name, Initial., & Last Name, Initial. (2021). Title of paper. <i>Journal of Natural Environmental Hazards</i> , -- (--), ---.	



© The Author/Authors

Publisher: University of Sistan and Baluchestan

DOI: 000000000000000000

EXTENDED ABSTRACT

INTRODUCTION

Soil, as a non-renewable resource providing nearly 95% of global food production, supports life on Earth through ecosystem services such as supplying natural resources, biomass production, and maintaining biodiversity. At present, industrial pollution is considered one of the most significant factors contributing to environmental degradation. The excessive increase in human activities and the expansion of industrial and agricultural operations in recent decades have threatened environmental health and intensified soil contamination with heavy metals. Soil plays a key role as a major component of the environment in sustaining living organisms. Pollution from mining activities in mineral-rich areas creates unfavorable conditions, such as the release of waste dumps around the mines, which subsequently contaminates surface and groundwater resources as well as topsoil layers. This study was conducted with the aim of investigating the effects of heavy metal pollution resulting from the Shahin Mine located in Shazand County and examining the spatial distribution of lead and zinc in the surrounding soils.

DATA AND METHODOLOGY

Soil sampling was carried out radially around the mine in eight geographical directions and at various distances. A total of 24 soil samples were collected from a depth of 0–20 cm and transferred to the laboratory for the analysis of soil parameters (Figure 1). After chemical digestion of the soil samples, the concentrations of lead and zinc were measured using an atomic absorption spectrometer. The effects of distance and direction were examined using the Kruskal–Wallis test. In addition, to assess the contamination levels of the soils in the study area, contamination indices including the geo-accumulation index (Igeo), contamination factor (Cf), and pollution load index (PLI) were calculated.

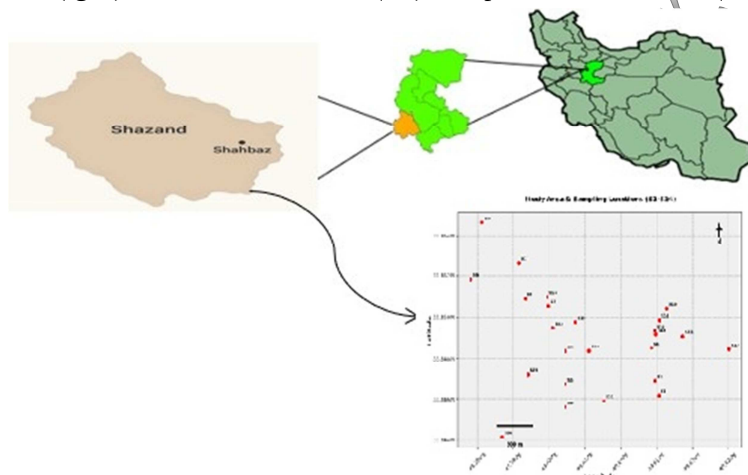


Figure 1. The study area and the sampling points (Source: Research findings)

Tables and figures should be placed close after their first reference in the text. All figures and tables should be numbered with Arabic numerals. Table headings should be centred above the tables. Figure captions should be centred below the figures as shown in Figure 1.

RESULTS AND DISCUSSION

In this study, the mean total concentrations of heavy metals Pb and Zn in the soils surrounding the mine were 239.97 and 73.04 mg/kg, respectively. Therefore, the contamination levels of lead and zinc in the soil exceeded the global EPA standard (Pb = 10 mg/kg, Zn = 50 mg/kg). The highest concentration of lead (629.12 mg/kg) and the highest concentration of zinc (131.38 mg/kg) were

recorded in the southern part of the mine, likely due to mining activities, geological conditions, and the alignment of this sector with the natural slope of the terrain. The lowest concentration of lead was observed in the northwest (50.30 mg/kg), and the lowest concentration of zinc occurred in the eastern direction (9.64 mg/kg) (Table 1). An inverse relationship was found between distance from the ore deposit and contamination levels; as the distance from the mine increased, the concentrations of lead and zinc decreased significantly (Figure 2).

Table 1. Descriptive statistics of lead and zinc (mg/kg) in soil along different geographical directions from the mine (Source: Research findings)

Parameter	Direction	Minimum	Maximum	Mean	Standard Deviation	Skewness	Kurtosis
Lead content	South	146.75	629.12	293.27	173.11	1.917	4.16
	West	126	165.12	148.96	20.43	-1.331	0
	East	87.50	349.50	205.88	132.81	0.83	0
	Northeast	188.38	405.12	275.96	114.20	1.42	0
	Northwest	50.30	405.12	199.02	184.24	1.27	0
	Southeast	108.91	287.75	201.22	89.56	-0.29	0
	Southwest	70.44	320.62	210.48	127.74	-1.00	0
Zinc content	South	52.11	131.38	89.24	31.76	0.08	-1.86
	West	42.98	58.96	53.19	8.87	-1.69	0
	East	9.64	66.59	37.94	28.48	0.06	0
	Northeast	61.45	102.21	75.28	23.33	1.73	0
	Northwest	43.72	130.62	83.39	43.94	0.75	0
	Southeast	37.42	104.94	63.83	36.08	1.53	0
	Southwest	47.11	95.65	70.85	24.29	0.20	0

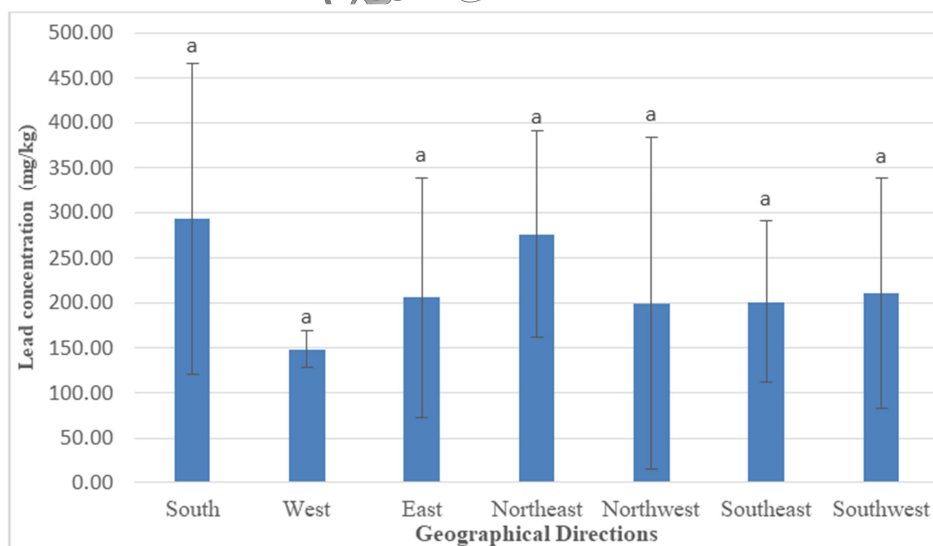


Figure 2. Comparison of the mean soil lead concentration in different directions (Source: Research findings)

According to the geo-accumulation index, with a range of -1.42 to 5.07 , the samples fell within the classes of moderately polluted to extremely polluted for lead, and -3.45 to 0.32 , corresponding to unpolluted to moderately polluted for zinc. Based on the contamination factor, lead showed values ranging from 4.02 to 50.33 , placing it in the categories of high to very high contamination, whereas zinc values ranged from 0.14 to 1.88 , corresponding to low to moderate contamination. The pollution load index (PLI) was calculated as 2.21 for lead and 0.26 for zinc, indicating that soil contamination in the study area is primarily associated with lead. The use of contamination indices as tools for

quantifying soil pollution can help identify environmental risks as well as trace potential sources of contamination.

CONCLUSION

Interpretation of the environmental indices indicates elevated lead contamination, primarily influenced by anthropogenic activities and mining operations. Therefore, continuous monitoring of heavy metal concentrations in the studied soils, along with subsequent remediation measures, is essential to protect production resources and ensure food security.

ACKNOWLEDGMENTS

This research was supported by Malayer University. The authors would like to express their sincere appreciation to all individuals who assisted in conducting this study.

REFERENCES

References (in Persian)

- Abbasitabar, H., Solgi, E., Shayesteh, K. and Mortazavi, S. 2022. Investigation of sources, chemical structure, health and environmental effects of heavy metals in soil. *Human and Environment*, 20(1), 63-76. <https://sid.ir/paper/1042926/fa> [In Persian]
- Amini, F., Mirghaffari, N. and Eshghi Malayeri, B. 2011. Investigation of nickel concentration in soil and several natural plant species around Ahangaran lead and zinc mine in Hamedan province. <https://civilica.com/doc/1288250> [In Persian]
- Beigmohammadi, F., Solgi, E., Soleimani, M. and Besalatpour, A. A. 2023. Investigating the Relationship Between Bioavailability of Heavy Metals and Physical, Chemical, and Biological Characteristics of Soil in Different Land Uses. *Journal of Environmental Studies*, 49(3), 373-388. <https://doi.org/10.22059/jes.2023.364084.1008439> [In Persian]
- Feiznia, S., Mokhtari, A.R., Jafari, M., Tavili, A., Ghanei-Bafeghi, M.J., Khodaian, Z. 2019. Study of lead distribution and its environmental indicators in soils adjacent to the Kushk-Bafgh lead and zinc mine, Rangeland and Watershed Management, *Natural Resources of Iran*, 72(2). <https://doi.org/10.22059/jrwm.2019.99152.698> [In Persian]
- Kurd, B., Safikhani, F., Khademi, A., Pourabbasi, S. 2018. Investigating the role of rangeland plants in the purification of lead and zinc contaminated soils around the Malayer Blacksmiths lead and zinc mine, *Iranian Rangeland and Desert Research*, 25 (1): 78-88. <https://doi.org/10.22092/ijdr.2018.116228> [In Persian]
- Laighi, N., Javadi, S.A., Jafari, M. and Arzani, H. 2023. Investigating the effects of mining exploitation on the structure and function of vegetation and topsoil of pastures (case study: Buin-Zahra pastures). *Pasture*, 17(3), 334-346. <http://rangelandsrm.ir/article-1108-1-fa.html>. [In Persian]
- Rafati, Maryam, Malekzadeh, Maryam, and Firouzi, Majid. 2023. Investigating the phytoremediation capability of Atriplex (Atriplex.sp) and Nerium oleander (Nerium oleander) in absorbing heavy metals such as lead and cadmium in the Aradkooh landfill. *Water and Soil*. 37(4), 547-560. <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.20084757.1402.37.4.4.9> [In Persian]
- Rahmani S., Agriculture, Sarmadian, and Farahbakhsh. 2024. Evaluation of environmental indicators of soil contamination with lead element in a part of urban lands of Tehran province. *Iran Water and Soil Research*, 55(9), 1503-1485. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.378270.669735> [In Persian]
- Rostaminia, M., Chabok, A., Shirvani, M. and Bazgir, M. 2020. Competitive Sorption of Cu, Pb, Cd, and Ni on Soil Clay Minerals adjacent to the Cement Factory Ilam city. *Journal of Natural Environment*, 73(3), 501-514. <https://doi.org/10.22059/jne02020301906.1977> [In Persian]
- Salmasi, R. and Pirovan, H. 2021. Soil contamination with some heavy metals and the relationship of these metals with soil characteristics of the Sar-e-Skand region. *Environmental Science and Technology*. 23(4), 97-106 <https://civilica.com/doc/1292428> [In Persian]
- Sohrabzadeh, Z., Sodaizadeh, H., Hakimzadeh, M., Taghizadeh Mehrjardi, R and Qanei Bafghi, M.G. 2020. Evaluation of heavy metals in the soils around the lead and zinc mines of Kosh Bafgh using analysis indices and principal component analysis. *Geography and Environmental Planning*, 31(1), 15-34. <https://doi.org/10.22108/gep.2020.121263.1260> [In Persian]
- Solgi, E., Beig Mohammadi, F. and Zamanian, F. 2020. Using pollution indices to investigate the rate of heavy metal deposition in soil (case study of Nahavand Cement Factory). *Applied Soil Research*, 8(3), 188-201. <https://sid.ir/paper/393004/fa> [In Persian]
- Tatian, M. R., Tamartash, R., Agajantabar Ali, H. and Faraji, A. 2023. Evaluation of phytoremediation potential of lead and cadmium in rangeland plant species, *Dactylis glomerata*, *Festuca ovina* and *Medicago sativa*. *Journal of Natural Environment*, 76(1), 15-28. <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.20087764.1402.76.1.2.3> [In Persian]

References (in English)

- APHA. 2017. Standard methods for the examination of water and wastewater (23rd ed.). Method 2510: Conductivity. American Public Health Association, Washington, DC.
- Adnan, M., Xiao, B., Xiao, P., Zhao, P., Li, R. and Bibi, S. 2022. Research progress on heavy metals pollution in the soil of smelting sites in China. *Toxics*, 10(5), 231. <https://doi.org/10.3390/toxics10050231>
- Akoto, R. and Anning, A. K. 2021. Heavy metal enrichment and potential ecological risks from different solid mine wastes at a mine site in Ghana. *Environmental Advances*, 3, 100028. <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2020.100028>
- ASTM International. 1963. Standard test method for particle-size analysis of soils (ASTM D422-63). *ASTM International*, West Conshohocken, PA
- Chen, L., Zhou, M., Wang, J., Zhang, Z., Duan, C., Wang, X. and Fang, L. 2022. A global meta-analysis of heavy metal (loid) s pollution in soils near copper mines: Evaluation of pollution level and probabilistic health risks. *Science of the Total Environment*, 835, 155441. [10.1016/j.scitotenv.2022.155441](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155441)
- Deng, J., Li, B., Zhang, S., Li, Z., Zu, Y., He, Y. and Li, T. 2021. Plant species diversity of plant communities and heavy metal accumulation in buffer zone of Momianhe stream along a long-term mine wastes area, China. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 107(6), 1136-1142. <https://doi.org/10.1007/s00128-021-03296-3>
- Ferreira, C. S., Seifollahi-Aghmiuni, S., Destouni, G., Ghajarnia, N. and Kalantari, Z. 2022. Soil degradation in the European Mediterranean region: Processes, status and consequences. *Science of the Total Environment*, 805, 150106. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150106>
- Hossen, M. A., Chowdhury, A. I. H., Mullick, M. R. A. and Hoque, A. 2021. Heavy metal pollution status and health risk assessment vicinity to Barapukuria coal mine area of Bangladesh. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, 16, 100469. <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2021.100469>
- Kilicoglu, M. C. 2024. Effects of heavy metal contamination on fungal diversity in Pinus brutia shoots. *BioResources*, 19(2), 2724. <https://doi.org/10.15376/biores.19.2.2724-2735>
- Kumar, V., Sharma, A., Minakshi, Bhardwaj, R. and Thukral, A. K. 2018. Temporal distribution, source apportionment, and pollution assessment of metals in the sediments of Beas River, India. Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal, 24(8), 2162-2181. <https://doi.org/10.1080/10807039.2018.1440529>
- Lashkari Sanami, N., Ghorbani, J., Hodjati, S. M., Vahabzadeh Kebria, G. and Moteszarezaei, B. 2022. Seed germination of plants grown in coal mine wastes in response to copper, lead, and cadmium stress. *Environmental Sciences*, 20(1), 179-198. <https://doi.org/10.1001/1.17351324.1401.20.1.12.1>
- Li, X., Li, W., Chu, L., White Jr, J. F., Xiong, Z. and Li, H. 2016. Diversity and heavy metal tolerance of endophytic fungi from *Dysphania ambrosioides*, a hyperaccumulator from Pb-Zn contaminated soils. *Journal of Plant Interactions*, 11(1), 186-192. <https://doi.org/10.1080/17429145.2016.1266043>
- Nelson, D. W., & Sommers, L. E. 1996. Total carbon, organic carbon, and organic matter. In D. L. Sparks (Ed.), *Methods of soil analysis: Part 3. Chemical methods* (pp. 961-1010). *Soil Science Society of America*.
- Nomas, A. H. and Al-Shamma, A. 2023. Calculation of Pollution Indicators for Heavy Metals in the Surface Soil of Nasiriyah Oil Field. *Journal of Survey in Fisheries Sciences*, 10(3S), 1077-1086. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.378270.669735>
- Parlak, M., Tunçay, T. and Parlak, A. Ö. 2023. Heavy metals in tailings and soils in the Pb-Zn mining areas of North-west Türkiye and health risk evaluations. *International Journal of Agriculture Environment and Food Sciences*, 8(1), 131-148. <https://doi.org/10.31015/jaefs.2024.1.14>
- Rahmanian, M., Jahantab, Esfandiari and Gholamzadeh, Majid. 2019. Assessment of heavy metals, lead and manganese pollution in the soils around Yasouj cement factory. *Journal of Natural Environment*, 73(1), 37-48. doi: 10.22059/jne.2020.277160.1663
- Riyazuddin, R., Nisha, N., Ejaz, B., Khan, M. I. R., Kumar, M., Ramteke, P. W. and Gupta, R. 2021. A comprehensive review on the heavy metal toxicity and sequestration in plants. *Biomolecules*, 12(1), 43. <https://doi.org/10.3390/biom12010043>
- Tóth, G., Hermann, T., Da Silva, M. R. and Montanarella, L. J. E. I. 2016. Heavy metals in agricultural soils of the European Union with implications for food safety. *Environment International*, 88, 299-309. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2015.12.017>
- U.S. Environmental Protection Agency (EPA). 1998. Soil screening guidance: Technical background document (EPA/540/R-95/128). U.S. EPA, Washington, DC. <https://www.epa.gov/superfund>
- USEPA. 1994. Method 7010: Graphite furnace atomic absorption spectrophotometry. *United States Environmental Protection Agency*.
- USEPA. 1996. Method 3050B: Acid digestion of sediments, sludges, and soils. *United States Environmental Protection Agency, Office of Solid Waste*.
- Wieczorek, J. and Baran, A. 2022. Pollution indices and biotests as useful tools for the evaluation of the degree of soil contamination by trace elements. *Journal of Soils and Sediments*, 1-18. <https://doi.org/10.1007/s11368-021-03091-x>
- Xiao, W., Zhang, Y., Chen, X., Sha, A., Xiong, Z., Luo, Y. and Li, Q. 2024. The Easily Overlooked Effect of Global Warming: Diffusion of Heavy Metals. *Toxics*, 12(6), 400. <https://doi.org/10.3390/toxics12060400>
- Xiao, X., Zhang, J., Wang, H., Han, X., Ma, J., Ma, Y. and Luan, H. 2020. Distribution and health risk assessment of potentially toxic elements in soils around coal industrial areas: A global meta-analysis. *Science of the Total Environment*, 713, 135292. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135292>

بررسی توزیع فلزات سنگین سرب و روی در خاک پیرامون معدن سرب و روی شاهین در شهرستان شازند

سنا برزگر^۱، عیسی سلگی^{۲*} ، بختیار فتاحی^۳

۱. دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه علوم و مهندسی محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران

۲. استاد، گروه علوم و مهندسی محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران (نویسنده مسئول)

ایمیل: e.solgi@malaveru.ac.ir ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5405-9513>

۳. استادیار، گروه علوم و مهندسی محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی تاریخ دریافت: --/--/-- تاریخ ویرایش: --/--/-- تاریخ پذیرش: --/--/-- تاریخ انتشار: --/--/-- واژه‌های کلیدی: فلزات سنگین، پایش آلودگی خاک، معدن شاهین، آلودگی سرب و روی.	فعالیت‌های معدن‌کاری از مهم‌ترین منابع ورود فلزات سنگین به خاک هستند و می‌توانند مخاطرات محیط‌زیستی نواحی پیرامون معادن را تشدید کنند. این پژوهش با هدف ارزیابی آلودگی خاک‌های اطراف معدن شاهین در شهرستان شازند و بررسی الگوی توزیع مکانی سرب (Pb) و روی (Zn) انجام شد. بدین منظور، ۲۴ نمونه خاک سطحی از عمق ۰ تا ۲۰ سانتی‌متری به‌صورت شعاعی از اطراف معدن برداشت شد. برای بررسی تغییرات غلظت عناصر در جهت‌ها و فاصله‌های مختلف از معدن، از آزمون کرومکال-والیس استفاده شد. همچنین، به‌منظور ارزیابی شدت آلودگی، شاخص‌های زمین‌انباشتی (Igeo)، فاکتور آلودگی (CF) و شاخص بار آلودگی (PLI) محاسبه شد. نتایج نشان داد که میانگین غلظت سرب و روی در خاک‌های منطقه به‌ترتیب ۲۳۹/۹۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم و ۷۳/۰۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم است. بیشترین غلظت سرب (mg/kg12/629) و روی (mg/kg38/131) در بخش جنوبی معدن مشاهده شد، در حالی که کمترین غلظت سرب (mg/kg30/50) در شمال‌غربی و کمترین غلظت روی (mg/kg64/9) در شرق معدن ثبت شد. مقدار شاخص Igeo برای سرب در دامنه ۵/۰۷- قرار گرفت که بیانگر آلودگی متوسط تا بسیار شدید است، در حالی که این شاخص برای روی در دامنه ۳۲/۳۲-۳/۴۵- بوده و وضعیت بدون آلودگی تا آلودگی خفیف را نشان داد. همچنین، فاکتور آلودگی سرب با دامنه ۳۳/۵۰-۴/۰۲ در کلاس آلودگی زیاد تا بسیار زیاد و فاکتور آلودگی روی با دامنه ۸۸/۱-۰/۱۴ در کلاس آلودگی کم تا متوسط قرار گرفت. مقدار شاخص بار آلودگی (PLI=۲۱/۲) نیز نشان داد که آلودگی خاک در منطقه در سطح قابل توجهی قرار دارد و سهم اصلی در این آلودگی به سرب مربوط است. در مجموع نتایج این پژوهش بیانگر آن است که خاک‌های پیرامون معدن شاهین، به‌ویژه در نزدیکی معدن و باطله‌ها، از نظر سرب آلودگی قابل توجهی دارند. این آلودگی عمدتاً ناشی از فعالیت‌های معدن‌کاری، هوازدهی کانی‌های فلزی و انتقال سطحی آلاینده‌هاست؛ بنابراین پایش مستمر و مدیریت باطله‌ها ضروری است.

استناد: نام خانوادگی، نام؛ نام خانوادگی، نام؛ نام خانوادگی، نام (۱۴۰۰). عنوان مقاله. مخاطرات محیط طبیعی، -- (--)، ---

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

مقدمه

خاک یکی از مهم ترین اجزای محیط زیست و از منابع پایه در پشتیبانی از حیات محسوب می شود؛ به طوری که با تأمین بخش عمده ای از تولید جهانی غذا، نقش اساسی در تولید زیست توده، حفظ تنوع زیستی، چرخه عناصر غذایی و ارائه خدمات اکوسیستمی دارد. با وجود این، خاک منبعی تجدیدناپذیر به شمار می رود و آلودگی آن می تواند پیامدهای گسترده ای برای سلامت انسان، پایداری اکوسیستم ها و کارکردهای محیط زیستی به همراه داشته باشد (فریرا^۱ و همکاران، ۲۰۲۲). از آنجاکه خاک محیطی گیرنده برای انواع آلاینده ها است، ورود ترکیبات سمی و عناصر بالقوه خطرناک به آن می تواند موجب کاهش کیفیت خاک، اختلال در عملکردهای زیستی و افزایش مخاطرات محیط زیستی شود (کلیکولو^۲، ۲۰۲۴).

در میان آلاینده های خاک، فلزات سنگین به دلیل پایداری بالا، تجزیه ناپذیری، قابلیت تجمع در محیط و امکان انتقال به زنجیره غذایی از اهمیت ویژه ای برخوردارند. برخلاف بسیاری از آلاینده های آلی، فلزات سنگین در محیط تجزیه نمی شوند و تنها ممکن است شکل شیمیایی، قابلیت دسترسی زیستی یا میزان تحرک آن ها در خاک تغییر کند (ریاضیدین^۳ و همکاران، ۲۰۲۱؛ چن^۴ و همکاران، ۲۰۲۲) برخی عناصر فلزی مانند روی، مس، آهن و منگنز در مقادیر کم برای انسان، دام و گیاهان در مقادیر کم ضروری اند؛ با این حال، افزایش غلظت آن ها بیش از حدود مجاز می تواند موجب بروز آثار زیانبار محیط زیستی و بهداشتی شود (سلگی و همکاران، ۱۳۹۹؛ اریف حسین^۵ و همکاران، ۲۰۲۱). در مقابل، عناصری مانند سرب حتی در غلظت های پایین نیز می توانند اثرات سمی جدی بر انسان و موجودات زنده داشته باشند. از این رو، بررسی غلظت و رفتار این عناصر در خاک به ویژه در مناطق تحت تأثیر فعالیت های معدنی، اهمیت زیادی دارد (اکوتو و آنینگ^۶، ۲۰۲۱).

منابع ورود فلزات سنگین به خاک می توانند منشأ طبیعی یا انسانی داشته باشند. هوازدگی سنگ مادر و کانی های فلزی از جمله منابع طبیعی این عناصر در خاک محسوب می شوند؛ اما در بسیاری از مناطق فعالیت های انسانی نقش مهم تری در افزایش غلظت فلزات سنگین دارند. استخراج و فرآوری مواد معدنی، انباشت باطله ها، حمل و نقل مواد معدنی، ذوب فلزات، فعالیت های صنعتی، مصرف کودها و سموم شیمیایی و آبیاری با آب های آلوده از مهم ترین منابع انسان زاد ورود این عناصر به خاک هستند (رفعتی و همکاران، ۱۴۰۳؛ لشکری و همکاران، ۱۴۰۲). در این میان معادن فلزی به ویژه معادن سرب و روی به دلیل ماهیت کانی سازی و حضور کانی های سولفیدی از منابع مهم انتشار عناصر بالقوه سمی به محیط اطراف به شمار می روند (دنگ^۷ و همکاران، ۲۰۲۱؛ اکوتو و آنینگ، ۲۰۲۱).

فعالیت های معدن کاری می توانند از مسیرهای مختلف موجب آلودگی خاک های پیرامونی شوند. جابه جایی و خردایش مواد معدنی، انباشت باطله ها، تولید گردوغبار معدنی، فرسایش سطحی، رواناب های آلوده و هوازدگی کانی های سولفیدی از مهم ترین فرایندهایی هستند که باعث آزادسازی و انتقال فلزات سنگین در محیط می شوند (چن و همکاران، ۲۰۲۲؛ دنگ و همکاران، ۲۰۲۱). در معادن سرب و روی، اکسیداسیون کانی های سولفیدی مانند گالن (PbS) و اسفالریت (ZnS) می تواند ضمن کاهش pH محیط، قابلیت انحلال و تحرک فلزات را افزایش دهد و زمینه

¹ - Ferreira

² - Kilicoglu

³ - Riyazuddin

⁴ - Chen

⁵ - Arif Hossen

⁶ - Anning&Akoto

⁷ - Deng

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

انتقال آن‌ها به خاک‌های اطراف را فراهم کند (سلماسی و پیروانی، ۱۴۰۰؛ سلماسی، ۱۳۹۸). بنابراین شدت آلودگی در چنین مناطقی تنها تابع غلظت اولیه عناصر در ماده معدنی نیست بلکه به ویژگی‌های ژئوشیمیایی، اقلیمی، توپوگرافی و کاربری اراضی پیرامون معدن نیز وابسته است (طالبی و همکاران، ۱۳۹۳؛ کرمی و همکاران، ۱۴۰۰).

مطالعات مختلف نشان داده‌اند که الگوی پراکنش فلزات سنگین در خاک‌های اطراف معادن معمولاً ناهمگن است و به عواملی مانند نوع ماده معدنی، ترکیب کانی‌شناسی، فاصله از منبع آلودگی، جهت باد غالب، شیب زمین، مسیر جریان رواناب‌های سطحی، ویژگی‌های بافتی و شیمیایی خاک، شدت فعالیت‌های استخراجی و نحوه مدیریت باطله‌ها بستگی دارد (امینی و همکاران، ۱۳۹۰؛ بیگ‌محمدی و همکاران، ۱۴۰۲؛ پارلاک^۱ و همکاران، ۲۰۲۴). به همین دلیل، صرف اندازه‌گیری غلظت عناصر در خاک برای تفسیر وضعیت آلودگی کافی نیست زیرا غلظت خام عناصر نمی‌تواند به‌تنهایی میزان انحراف از مقادیر زمینه، شدت آلودگی و بار کلی آلودگی منطقه را نشان دهد (ویچورک و باران^۲، ۲۰۲۲؛ نوماس و الشما^۳، ۲۰۲۳). در این زمینه استفاده از شاخص‌های ژئوشیمیایی آلودگی مانند شاخص زمین‌انباشتگی (Igeo)، فاکتور آلودگی (CF) و شاخص بار آلودگی (PLI) می‌تواند تصویر دقیق‌تری از وضعیت آلودگی خاک ارائه دهد و امکان مقایسه نمونه‌ها، جهت‌ها و فواصل مختلف از منبع آلودگی را فراهم سازد (کومار^۴ و همکاران، ۲۰۱۸؛ عدنان^۵ و همکاران، ۲۰۲۲؛ نوماس و الشما، ۲۰۲۳).

شاخص زمین‌انباشتگی (Igeo) میزان انباشت یک عنصر را نسبت به مقدار زمینه یا مقدار مرجع زمین‌شیمیایی نشان می‌دهد و برای طبقه‌بندی شدت آلودگی عناصر در خاک و رسوب کاربرد دارد. فاکتور آلودگی (CF) نیز نسبت غلظت عنصر در نمونه به مقدار زمینه آن را بیان می‌کند و برای تعیین شدت آلودگی هر عنصر به‌صورت جداگانه استفاده می‌شود. در مقابل شاخص بار آلودگی (PLI) با استفاده از میانگین هندسی فاکتورهای آلودگی چند عنصر محاسبه می‌شود و وضعیت کلی آلودگی منطقه را نشان می‌دهد. بنابراین ترکیب این شاخص‌ها می‌تواند امکان ارزیابی دقیق‌تر شدت آلودگی سرب و روی و سهم نسبی هر عنصر در بار آلودگی خاک را فراهم کند (کومار و همکاران، ۲۰۱۸؛ عدنان و همکاران، ۲۰۲۲).

در ایران نیز پژوهش‌هایی درباره آلودگی خاک‌های اطراف معادن سرب و روی انجام شده است. برای نمونه در مطالعات محیط‌زیستی انجام‌شده در محدوده معدن سرب و روی انگوران در استان زنجان، افزایش غلظت برخی فلزات سنگین به‌ویژه سرب و روی در خاک‌ها و رسوبات پیرامون معدن گزارش شده و نقش فعالیت‌های معدنی، باطله‌ها، گردوغبار و پراکنش ذرات معدنی در تشدید آلودگی مورد تأکید قرار گرفته است (بیگ‌محمدی و همکاران، ۱۴۰۲؛ امینی و همکاران، ۱۳۹۰). همچنین در پژوهش‌های ژئوشیمیایی مربوط به معدن سرب و روی لاریخانی در جنوب سیاهکل، نتایج نشان داده است که توزیع عناصر آلاینده در خاک‌های اطراف معدن از الگوی یکنواختی پیروی نمی‌کند و تحت تأثیر عواملی مانند فاصله از معدن، ویژگی‌های زمین‌شناسی منطقه، شیب زمین و مسیرهای انتقال آلاینده‌ها قرار دارد (سلماسی و پیروانی، ۱۴۰۰؛ سلماسی، ۱۳۹۸). این مطالعات نشان می‌دهند که معادن سرب و روی می‌توانند منشأ مهمی برای ورود عناصر بالقوه سمی به خاک‌های پیرامونی باشند. با این حال شدت آلودگی و

¹- Parlak

²- Wiczorek & Baran

³- Nomas & Al-Shamma

⁴- Kumar

⁵-Adnan

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

الگوی مکانی پراکنش عناصر در هر منطقه به شرایط محلی زمین شناسی، ژئومورفولوژیک، اقلیمی و نوع فعالیت معدنی وابسته است (ستوهیان و همکاران، ۱۳۹۲؛ طالبی و همکاران، ۱۳۹۳؛ کرمی و همکاران، ۱۴۰۰).

معدن سرب و روی شاهین در شهرستان شازند از محدوده های معدنی فلزی منطقه به شمار می رود که در سال ۱۳۵۳ کشف شده و میزان استخراج سالیانه سرب و روی از آن حدود ۱۳۰ تن گزارش شده است. با توجه به ماهیت کانی سازی سرب و روی، فعالیت های استخراجی، جابه جایی مواد معدنی، انباشت باطله ها و امکان پراکنش ذرات از طریق باد و رواناب های سطحی این معدن می تواند به عنوان یکی از منابع بالقوه ورود عناصر فلزی به خاک های پیرامونی مطرح باشد. از سوی دیگر قرارگیری مستقیم اراضی کشاورزی در مجاورت معدن و هم مرز بودن آن ها با محدوده فعالیت معدنی، حساسیت محیط زیستی منطقه را افزایش داده است. بر این اساس بررسی غلظت عناصر سرب و روی، تعیین شدت آلودگی و تحلیل الگوی مکانی پراکنش این عناصر در خاک های اطراف معدن شاهین، برای ارزیابی وضعیت محیط زیستی منطقه ضروری است.

با وجود انجام مطالعات مشابه در برخی معادن سرب و روی کشور، تاکنون بررسی جامعی درباره غلظت، شدت آلودگی و الگوی پراکنش مکانی عناصر سرب و روی در خاک های اطراف معدن سرب و روی شاهین شازند گزارش نشده است. اهمیت این خلأ پژوهشی تنها به نبود مطالعه در یک موقعیت جغرافیایی جدید محدود نمی شود بلکه به شرایط خاص این محدوده شامل سابقه طولانی شناسایی معدن، استمرار فعالیت استخراجی، مجاورت مستقیم اراضی کشاورزی با معدن و احتمال انتقال آلاینده ها از طریق گردوغبار معدنی و رواناب های سطحی مربوط است. از این رو ارزیابی هم زمان غلظت عناصر، شاخص های آلودگی ژئوشیمیایی و الگوی مکانی پراکنش سرب و روی می تواند شناخت دقیق تری از نقش معدن شاهین در تغییر کیفیت خاک های پیرامونی ارائه دهد و مبنایی برای مدیریت و پایش آلودگی خاک در منطقه فراهم سازد.

بر این اساس هدف اصلی پژوهش حاضر ارزیابی وضعیت آلودگی خاک های پیرامون معدن سرب و روی شاهین در شهرستان شازند و بررسی الگوی پراکنش مکانی عناصر سرب و روی است. در این راستا اهداف اختصاصی پژوهش عبارتند از:

- ۱- تعیین غلظت عناصر سرب و روی در خاک های سطحی اطراف معدن شاهین.
- ۲- بررسی تغییرات مکانی غلظت این عناصر در جهات جغرافیایی و فواصل مختلف پیرامون معدن.
- ۳- ارزیابی شدت آلودگی خاک با استفاده از شاخص های ژئوشیمیایی شامل شاخص زمین انباشتگی (Igeo)، فاکتور آلودگی (CF) و شاخص بار آلودگی (PLI).
- ۴- شناسایی عنصر غالب در ایجاد آلودگی و بررسی نقش احتمالی فعالیت های معدنی در افزایش غلظت سرب و روی.
- ۵- فراهم کردن مبنایی علمی برای پایش محیط زیستی و مدیریت آلودگی خاک در محدوده پیرامونی معدن.

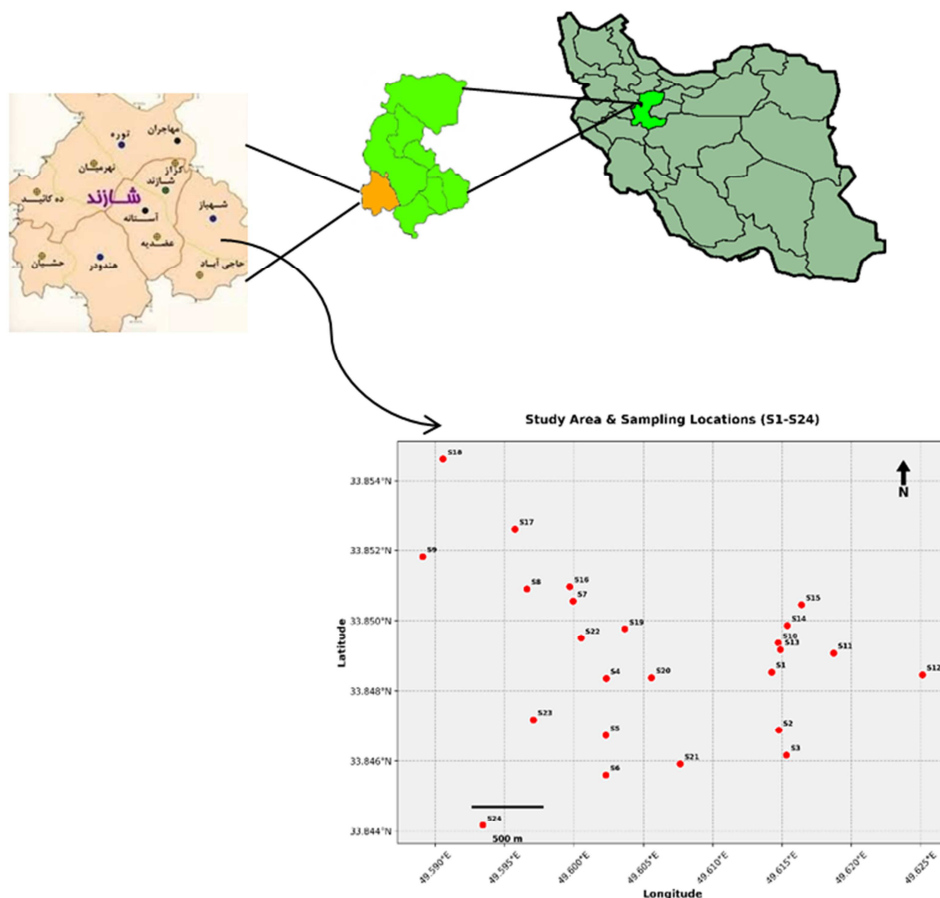
داده ها و روش ها

معرفی منطقه مورد مطالعه

معدن سرب و روی شاهین در موقعیت جغرافیایی ۳۳ درجه و ۴۵ دقیقه تا ۳۴ درجه عرض شمالی و ۴۹ درجه و ۳۰ دقیقه تا ۴۹ درجه و ۴۵ دقیقه طول شرقی قرار دارد. این محدوده در استان مرکزی، با فاصله ۴۶ کیلومتری از

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می باشد. لطفا برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

جنوب غربی اراک، ۲۰ کیلومتری شهرستان شازند و ۵ کیلومتری شهر شهباز واقع شده است. محدوده مورد مطالعه دارای ارتفاع ۲۱۵۰ متر از سطح دریا بوده و وسعت آن بالغ بر ۲۰،۱۸۲ مترمربع گزارش شده است. (گزارش پایان عملیات اکتشاف و یا طرح بهره برداری معدن سرب و روی شاهین) (شکل ۱).



شکل ۱: منطقه مورد مطالعه و نقاط نمونه برداری (منبع: یافته های تحقیق)

روش نمونه برداری

- نمونه برداری خاک به صورت شعاعی و به روش سیستماتیک در پیرامون معدن انجام شد. برای بررسی تغییرات مکانی غلظت عناصر، راسهای جغرافیایی پیرامون معدن به عنوان مبنای طراحی نمونه برداری در نظر گرفته شدند. به علت ناهمواری و شیب تند، جهت شمالی از طرح حذف گردید. در نهایت، هفت ترانسکت شعاعی در جهت های قابل دسترس پیرامون معدن، از محدوده نزدیک به فعالیت های معدنی به سمت نواحی اطراف مشخص گردید.

- نقطه آغاز هر ترانسکت، نزدیک ترین محل به مرکز فعالیت معدن تعیین شد. در ادامه با در نظر گرفتن محدودیت های میدانی همچون وجود انبار مهمات، پستی و بلندی و شیب های تند، بناهای اداری معدن، مسیرهای برون شهری، تردد ماشین آلات سنگین و سایر موانع، نقاط نمونه برداری در فواصل یکنواخت و متناسب با طول هر ترانسکت مشخص

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می‌باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

گردید. مختصات جغرافیایی نقاط نمونه‌برداری با استفاده از دستگاه GPS ثبت گردید. در مجموع، تعداد ۲۴ نمونه خاک سطحی از اطراف معدن برداشت شد.

نمونه‌برداری از خاک و باطله معدن

در هر ترانسکت، سه موقعیت شامل ابتدا، میانه و انتهای مسیر جهت نمونه‌برداری انتخاب شد نمونه‌های خاک از لایه سطحی و از عمق ۰ تا ۲۰ سانتی‌متری برداشت گردیدند؛ زیرا این لایه بیشترین تماس را با رسوبات سطحی، گردوغبار معدنی، رواناب و انتقال سطحی آلاینده‌ها دارد. با این حال، به دلیل تمرکز مطالعه بر خاک سطحی، توزیع عمقی فلزات سنگین و احتمال انتقال آن‌ها در پروفیل خاک در این پژوهش بررسی نشد و به‌عنوان یکی از محدودیت‌های مطالعه در نظر گرفته شد.

برای جلوگیری از آلودگی متقاطع، ابزار نمونه‌برداری پیش از برداشت هر نمونه تمیز شد و نمونه‌ها در کیسه‌های پلی‌اتیلنی تمیز و دارای برچسب قرار گرفتند. برچسب هر نمونه شامل کد نمونه، موقعیت جغرافیایی، جهت نمونه‌برداری، فاصله نسبی از معدن و تاریخ برداشت بود. نمونه‌ها پس از برداشت، به آزمایشگاه منتقل و تا زمان آماده‌سازی در شرایط مناسب نگهداری شدند.

آماده‌سازی نمونه‌ها

نمونه‌ها پس از انتقال به آزمایشگاه در دمای محیط و در شرایط کنترل‌شده هواخشک شدند. پس از خشک شدن، بقایای گیاهی، سنگ‌ریزه‌های درشت و مواد خارجی به‌صورت دستی از نمونه‌ها جدا گردید. سپس نمونه‌ها به‌آرامی خرد و همگن شدند. برای یکنواخت‌سازی اولیه، نمونه‌ها از الک‌های مش ۱۰ (۲ میلی‌متر) عبور داده شدند و در ادامه، بخشی از نمونه‌های عبورکرده از الک ۲ میلی‌متر برای انجام آنالیز شیمیایی آماده‌سازی شده و از الک مش ۱۰۰ با قطر ۰/۱۴۹ میلی‌متر عبور داده شد. استفاده از کسر دانه‌بندی ریزتر به‌منظور افزایش همگنی نمونه و بهبود قابلیت استخراج عناصر انجام شد. آماده‌سازی نمونه‌ها بر اساس روش استاندارد ASTM D422-63 انجام گرفت.

با توجه به وجود باطله‌های معدنی در راستای شیب منطقه و به‌ویژه در جبهه جنوبی معدن، تعداد ۳ نمونه از باطله‌های معدنی این بخش نیز به‌صورت تصادفی برداشت شد. این نمونه‌ها نیز همانند نمونه‌های خاک بسته‌بندی، برچسب‌گذاری و برای آماده‌سازی و آنالیز شیمیایی به آزمایشگاه منتقل شدند.

تعیین ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک و باطله‌های معدن

بافت خاک به روش الک و هیدرومتری و مثلث خاک تعیین شد (سلگی و همکاران، ۱۳۹۹؛ ASTM D422-63، 1963).

میزان اسیدیته و هدایت الکتریکی هر محلول با استفاده از دستگاه EC متر (دستگاه هدایت‌سنج) و pH متر اندازه‌گیری گردید (سلگی و همکاران، ۱۳۹۹؛ APHA, 2017).

اندازه‌گیری ماده آلی بر اساس روش سوزاندن در کوره (Loss on Ignition) انجام گرفت. برای این منظور ۵ گرم از خاک خشک و غربال‌شده با الک مش ۱۰ (۲ میلی‌متر) توزین شد و بوتله‌های حاوی نمونه به مدت ۴ ساعت در کوره با دمای ۴۵۰ درجه سلسیوس حرارت داده شدند. تغییر وزن نمونه‌ها در مرحله پیش و پس از سوزاندن، به‌عنوان مقدار ماده آلی خاک محاسبه گردید (سلگی و همکاران، ۱۳۹۹؛ نلسون و سامرز^۱، ۱۹۹۶).

¹ - Nelson & Sommers

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

برای هضم نمونه‌های خاک و باطله‌های معدن، از ترکیب اسید نیتریک (HNO_3)، اسید کلریدریک (HCl) و اسید پرکلریک (HClO_4) استفاده شد. ۲ گرم نمونه خاک پس از افزودن اسیدها به مدت ۶ ساعت در دمای ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد با استفاده از بن‌ماری حرارت داده شد تا اینکه محلول شفاف به‌دست آمد. پس از سرد شدن، نمونه‌ها توسط کاغذ واتمن ۴۲ صاف و فیلتر شده و با آب دیونیزه و دوبار تقطیر به حجم ۲۵ میلی‌لیتر رسانده شد (سلگی و همکاران، ۱۳۹۹؛ USEPA, 1996).

– **اندازه‌گیری غلظت سرب و روی:** غلظت عناصر سرب و روی با استفاده از دستگاه جذب اتمی (AAS)، مدل ContrAA 700 ساخت آلمان و بر پایه روش شعله اندازه‌گیری شد (سلگی و همکاران، ۱۳۹۹؛ USEPA, 1994). نکته اینکه به دلیل محدودیت مالی/آزمایشگاهی و با توجه به غلبه کانی‌زایی سرب و روی، تمرکز مطالعه بر سرب و روی بوده است.

به‌منظور اطمینان از اعتبار داده‌های شیمیایی، مراحل آماده‌سازی، هضم و اندازه‌گیری نمونه‌ها تحت کنترل کیفیت آزمایشگاهی انجام شد. در فرایند آنالیز، از نمونه‌های بلانک آزمایشگاهی برای بررسی آلودگی احتمالی ناشی از اسیدها و ظروف استفاده شد. همچنین، تعدادی از نمونه‌ها به‌صورت تکراری هضم و اندازه‌گیری شدند تا تکرارپذیری نتایج ارزیابی شود. کالیبراسیون دستگاه جذب اتمی با استفاده از محلول‌های استاندارد سرب و روی انجام گرفت و قرائت نمونه‌ها پس از حصول اطمینان از پایداری و خطی بودن منحنی کالیبراسیون صورت پذیرفت. حد تشخیص دستگاه برای عناصر مورد مطالعه بر اساس گزارش آزمایشگاه و مشخصات دستگاه کنترل شد و غلظت‌های اندازه‌گیری شده بالاتر از حد تشخیص بودند. بنابراین، داده‌های حاصل از آنالیز شیمیایی از نظر کیفی برای محاسبه شاخص‌های آلودگی مناسب تشخیص داده شدند.

محاسبه شاخص‌های محیط‌زیستی خاک

شاخص‌های مختلف محیط‌زیستی جهت تعیین و ارزیابی سطوح آلودگی خاک به فلزات سنگین مورد استفاده قرار می‌گیرد (حمزه نژاد و خداوردی‌لو، ۱۳۹۸). در این تحقیق سه شاخص بارآلودگی ($\text{Pollution load index}$)، شاخص زمین‌انباشتگی ($\text{Geoaccumulation Index}$) و فاکتور آلودگی ($\text{Contamination factor}$) محاسبه شدند.

– شاخص سنجش درجه زمین‌انباشتگی فلزات (I_{geo})

شاخص سنجش درجه زمین‌انباشتگی فلزات (I_{geo}) اولین بار توسط مولر^۱ در سال ۱۹۶۹ معرفی و سپس به شاخص مناسبی برای ارزیابی سطح آلودگی در نمونه‌های خاک و رسوب تبدیل شد. اساس شاخص زمین‌انباشتگی، مقایسه غلظت اندازه‌گیری شده فلز موردنظر با غلظت پس‌زمینه ژئوشیمیایی آن در خاک است. به کمک این شاخص درجه آلودگی خاک‌های مختلف تعیین می‌شود. برای محاسبه شاخص زمین‌انباشتگی از معادله (۱) استفاده شد:

$$I_{geo} = \log_2 \left(\frac{C_{\text{sample}}}{1.5 \times C_{\text{background}}} \right) \quad (1)$$

در این رابطه C_{sample} غلظت عنصر مورد نظر در نمونه رسوب یا خاک و $C_{\text{background}}$ غلظت زمینه فلز است. عدد ۱/۵ در این معادله ثابت می‌باشد. این شیوه امکان ارزیابی میزان آلودگی فلزات در هفت طبقه بر اساس افزایش مقدار عددی شاخص را فراهم می‌سازد (جدول ۱).

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

جدول ۱: کلاس شاخص زمین انباشتگی (Igeo) (رحمانی سیالرز و همکاران، ۱۴۰۳)

مرجع	محدوده شاخص	شدت آلودگی
Cai et al, ۲۰۱۹	$I_{geo} < 0$	بدون آلودگی
	$0 \leq I_{geo} < 1$	بدون آلودگی تا نسبتاً آلوده
	$1 \leq I_{geo} < 2$	نسبتاً آلوده
	$2 \leq I_{geo} < 3$	آلودگی متوسط
	$3 \leq I_{geo} < 4$	به شدت آلوده
	$4 \leq I_{geo} < 5$	به شدت تا بسیار آلوده
	$I_{geo} > 5$	آلودگی فوق العاده بالا

- فاکتور آلودگی (Cf)

فاکتور آلودگی هر فلز از طریق تقسیم غلظت کل هر فلز سنگین اندازه گیری شده بر مقدار پس زمینه و از معادله زیر برای محاسبه (Cf) استفاده شد:

$$Cr = \frac{C_m}{C_p} \quad (2)$$

که در این معادله C_m غلظت کل فلزات سنگین اندازه گیری شده و C_p مقدار غلظت زمینه هر فلز است. در منطقه مورد مطالعه در این پژوهش برای عنصر سرب غلظت ۱۲/۵ میلی گرم در کیلوگرم و برای عنصر روی غلظت ۷۰ میلی گرم در کیلوگرم به عنوان میانگین غلظت این فلزات در پوسته زمین و یا غلظت زمینه در نظر گرفته شد (جدول ۲).

جدول ۲: کلاس فاکتور آلودگی (CF) (رحمانی سیالرز و همکاران، ۱۴۰۳)

مرجع	دامنه تغییرات	شدت آلودگی
Kabata-Pendias, ۲۰۱۱	$CF < 1$	آلودگی کم
	$1 \leq CF < 3$	آلودگی متوسط
	$3 \leq CF < 6$	آلودگی زیاد
	$6 \leq CF$	آلودگی بسیار زیاد

- شاخص میزان بار آلودگی (PLI)

به منظور ارزیابی شدت و پتانسیل آلودگی فلزات سنگین، از شاخص بار آلودگی (PLI) که بر مبنای روش تاملینسون تعریف می شود و کمیت ریسک آلودگی استفاده می گردد. با توجه به این که شاخص مذکور ریسک آلودگی به تمام فلزات مورد بررسی در منطقه را نشان می دهد، نسبت به سایر شاخص ها مزیت دارد. در روش تاملینسون شاخص بار آلودگی (PLI) از طریق محاسبه ریشه nام حاصل ضرب غلظت فلزات سنگین سنجیده می شود:

$$PLI = \sqrt[n]{CF_1 \times CF_2 \times \dots \times CF_n} \quad (3)$$

که CF_{metaL} فاکتور آلودگی هر فلز و n تعداد فلزات سنگین مورد مطالعه را نشان می دهد. در بررسی میزان آلودگی در مناطق آلوده PLI یک شاخص آلودگی تجمعی دارای اهمیت بوده و هر چقدر از عدد یک بالاتر باشد بیانگر میزان شدت آلودگی در مقایسه با محل غیر آلوده می باشد.

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می باشد. لطفا برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

آنالیز آماری داده ها

مقایسه کمرندهای فاصله ای و جهت های جغرافیایی به لحاظ تغییرات فاکتورهای غلظت سرب و روی در خاک به سبب انحراف داده ها از توزیع نرمال، تحلیل آماری بر پایه آزمون کروسکال والیس انجام شد. در واقع با توجه به محدود بودن تعداد نمونه ها در هر گروه جهت دار، آزمون ناپارامتری Kruskal-Wallis به عنوان یک ابزار اکتشافی برای بررسی تفاوت های احتمالی مکانی به کار رفت و نتایج آن با احتیاط تفسیر شد. جهت بررسی رابطه همبستگی و مقایسه غلظت فلزات در خاک از ضریب همبستگی اسپیرمن استفاده گردید و کلیه تحلیل های آماری با کمک نرم افزار Excel و SPSS انجام شد.

بحث و نتایج

- یافته های سرب و روی در خاک پیرامون معدن سرب و روی شاهین

برخی از مهم ترین ویژگی های فیزیکی شیمیایی خاک پیرامون معدن مورد مطالعه و پارامترهای توصیفی فلزات سنگین (سرب و روی) موجود در خاک در جدول ۳ نشان داده شده است.

نتایج حاصل از مثلث بافت خاک نشان داد که بافت خاک منطقه مورد مطالعه شنی است.

جدول ۳: ویژگی های خاک اطراف معدن و آماره های توصیفی سرب و روی (mg/kg) (منبع: یافته های تحقیق)

ویژگی	کمینه	بیشینه	میانگین	انحراف معیار	چولگی	کشدگی
اسیدیته	۵/۸۶	۷/۴۰	۶/۷۱	۰/۲۶	-۰/۲۵	۳/۸۶
هدایت الکتریکی (dS/m)	۰/۰۹۸	۰/۳۵۶	۰/۱۲۱	۰/۰۴۲	۵/۲۸	۲۹/۹۶
درصد شن	۴۷/۷۵	۷۳/۸۰	۶۲/۶۲	۶/۴۱	-۰/۳۸۸	-۰/۵۷۶
درصد سیلت	۱/۷۰	۲۱/۸۵	۱۱/۵۰	۵/۳۳	۰/۱۵۷	-۰/۷۳
درصد رس	۲۰/۳۵	۳۰/۸۰	۲۵/۸۹	۳/۰۳	-۰/۲۲	-۰/۵۶
درصد ماده آلی	۲/۳۴	۶/۷۶	۴/۷۷	۱/۰۸	-۰/۱۷۷	-۰/۳۹۲
سرب	۵۰/۳۰	۶۲۹/۱۲	۲۳۹/۹۷	۱۲۰/۸۰	۱/۰۱	۱/۶۲
روی	۹/۶۴	۱۳۱/۳۸	۷۳/۰۴	۲۹/۹۰	۰/۲۶	-۰/۶۲۷

ویژگی های فیزیکی - شیمیایی و یافته های سرب و روی باطله های پیرامون معدن سرب و روی

برخی از مهم ترین ویژگی های فیزیکی شیمیایی و آماره های توصیفی فلزات سنگین (سرب و روی) باطله اطراف معدن سرب و روی شاهین در جدول ۴ نشان داده شده است.

جدول ۴: ویژگی های باطله های مجاور معدن و آماره های توصیفی غلظت سرب و روی (mg/kg) و ویژگی های باطله اطراف معدن (منبع:

یافته های تحقیق)

کمینه	بیشینه	میانگین	انحراف معیار	چولگی	کشیدگی
۶/۱۲	۶/۲۷	۶/۱۸	۰/۰۸	۱/۶۲	۰
۱/۰۷	۱/۸۶	۱/۴۲	۰/۴۱	۰/۹۴	۰
۳۹/۳۵	۵۳/۳۰	۴۶/۶۵	۷/۰۰	-۰/۴۱	۰

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

درصد سیلت	۲۹/۷۵	۵۱/۸۰	۴۱/۷۸	۱۱/۱۶	۰/۷۹	•
درصد رس	۸/۸۵	۱۶/۹۵	۱۱/۵۷	۴/۶۶	۱/۷۳	•
درصد ماده آلی	۲/۶۲	۳/۰۲	۲/۷۶	۰/۲۳	۱/۷۲	•
سرب	۵۸۰/۰۰	۷۲۶/۲۵	۶۳۱/۸۸	۸۱/۸۷	۱/۷۱	•
روی	۱۱۸/۹۶	۱۵۱/۳۸	۱۳۸/۵۷	۱۷/۲۴	-۱/۵۰	•

یافته‌های سرب و روی در جهت‌ها و فاصله‌های مختلف جغرافیایی از معدن

آماره‌های توصیفی سرب و روی خاک در جهت‌ها و فاصله‌های مختلف جغرافیایی از معدن سرب و روی نشان می‌دهد که بیشترین میزان سرب و روی در موقعیت جنوبی و نزدیکترین فاصله به معدن وجود دارد (جدول ۵ و ۶).

جدول ۵: آماره‌های توصیفی سرب و روی (mg/kg) خاک در موقعیت‌های مختلف جغرافیایی از معدن (منبع: یافته‌های تحقیق)

ویژگی	جهت	کمینه	بیشینه	میانگین	انحراف معیار	چولگی	کشیدگی
غلظت سرب	جنوب	۱۴۶/۷۵	۶۲۹/۱۲	۲۹۳/۲۷	۱۷۳/۱۱	۱/۹۱۷	۴/۱۶
	غرب	۱۲۶	۱۶۵/۱۲	۱۴۸/۹۶	۲۰/۴۳	-۱/۳۳۱	•
	شرق	۸۷/۵۰	۳۴۹/۵۰	۲۰۵/۸۸	۱۳۲/۸۱	۰/۸۳	•
	شمال شرقی	۱۸۸/۳۸	۴۰۵/۱۲	۲۷۵/۹۶	۱۱۴/۲۰	۱/۴۲	•
	شمال غربی	۵۰/۳۰	۴۰۵/۱۲	۱۹۹/۰۲	۱۸۴/۲۴	۱/۲۷	•
	جنوب شرقی	۱۰۸/۹۱	۲۸۷/۷۵	۲۰۱/۲۲	۸۹/۵۶	-۰/۲۹	•
	جنوب غربی	۷۰/۴۴	۳۲۰/۶۲	۲۱۰/۴۸	۱۲۷/۷۴	-۱	•
غلظت روی	جنوب	۵۲/۱۱	۱۳۱/۳۸	۸۹/۲۴	۳۱/۷۶	۰/۰۸	-۱/۸۶
	غرب	۴۲/۹۸	۵۸/۹۶	۵۳/۱۹	۸/۸۷	-۱/۶۹	•
	شرق	۹/۶۴	۶۶/۵۹	۳۷/۹۴	۲۸/۴۸	۰/۰۶	•
	شمال شرقی	۶۱/۴۵	۱۰۲/۲۱	۷۵/۲۸	۲۳/۳۳	۱/۷۳	•
	شمال غربی	۴۳/۷۲	۱۳۰/۶۲	۸۳/۳۹	۴۳/۹۴	۰/۷۵	•
	جنوب شرقی	۳۷/۴۲	۱۰۴/۹۴	۶۳/۸۳	۳۶/۰۸	۱/۵۳	•
	جنوب غربی	۴۷/۱۱	۹۵/۶۵	۷۰/۸۵	۲۴/۲۹	۰/۲	•

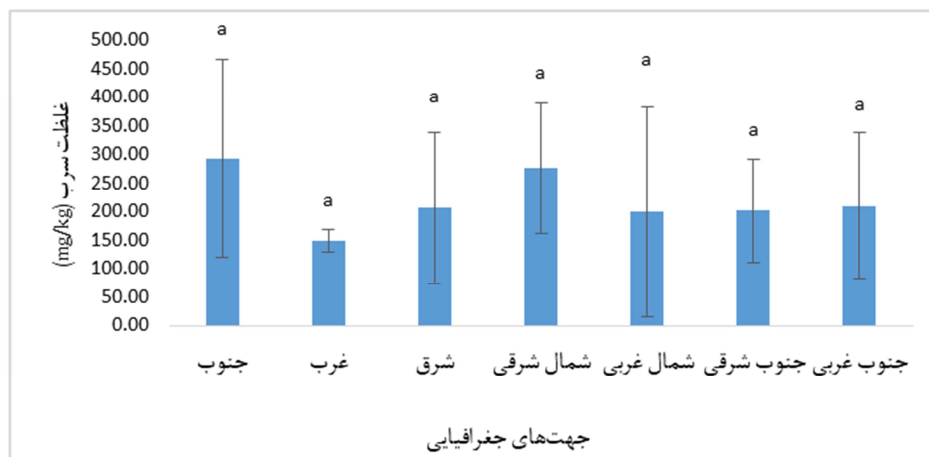
جدول ۶: ویژگی‌های آماری توصیفی مرتبط با مقادیر سرب و روی (mg/kg) در فاصله‌های مختلف از معدن (نتایج استخراج شده از پژوهش)

ویژگی	فاصله	کمینه	بیشینه	میانگین	انحراف معیار	چولگی	کشیدگی
غلظت سرب	ابتدای ترانسکت	۱۵۵/۷۵	۶۲۹/۱۲	۳۶۴/۷۱	۱۴۴/۳۱	۰/۷۰	۱/۹۶
	مرکز ترانسکت	۸۷/۵۰	۲۴۰/۳۸	۱۶۹/۰۹	۵۸/۵۲	۰/۰۵	-۱/۶۴
	انتهای ترانسکت	۵۰/۳۰	۲۵۳/۳۸	۱۴۵/۳۱	۷۲/۰۳	۰/۰۴	-۰/۹۶
غلظت روی	ابتدای ترانسکت	۵۸/۹۶	۱۳۱/۳۸	۸۹/۲۰	۳۲/۳۴	۰/۵۸	-۲/۰۱
	مرکز ترانسکت	۹/۶۴	۱۰۲/۲۱	۶۶/۷۵	۳۱/۴۶	-۰/۹۱	۰/۸۱
	انتهای ترانسکت	۳۷/۴۲	۱۱۳/۱۲	۵۴/۷۷	۲۶/۹۷	۲/۲۰	۵/۰۱

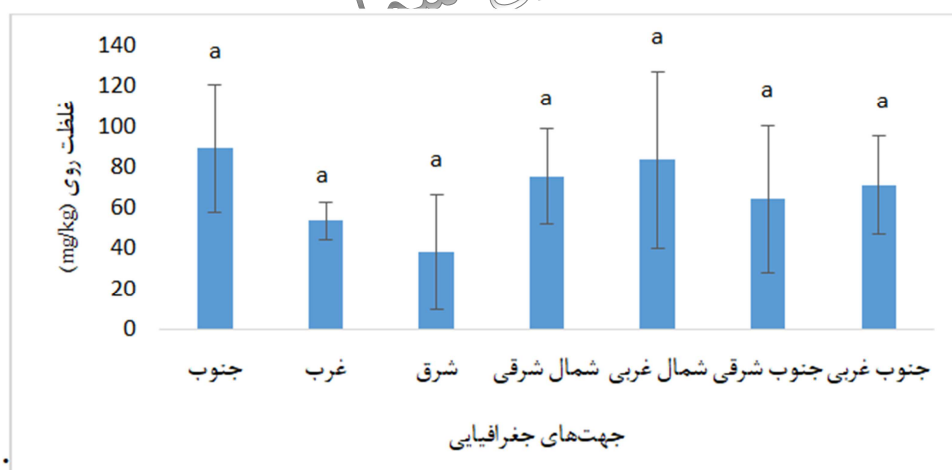
این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

ارزیابی تغییرات مکانی غلظت میانگین سرب خاک بر اساس جهت‌های جغرافیایی و فاصله‌های مختلف از معدن

نتایج تحلیلی مقایسه غلظت فلزات سنگین (سرب و روی) در نمونه‌های خاک برداشت‌شده با استفاده از آزمون کروسکال والیس در جهت‌های مختلف جغرافیایی (شکل ۲ و ۳) و نیز در فاصله‌های مختلف از معدن (شکل ۴) ارائه شده است.



شکل ۲: مقایسه میانگین غلظت سرب خاک در جهت‌های مختلف (منبع: یافته‌های تحقیق)



شکل ۳: مقایسه میانگین غلظت روی در خاک در جهت‌های مختلف (منبع: یافته‌های تحقیق)



این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

شکل ۴: مقایسه میانگین غلظت سرب و روی خاک در فاصله‌های مختلف (منبع: یافته‌های تحقیق)

یافته‌های حاصل از همبستگی بین ویژگی‌های خاک و فلزات سنگین

در جدول ۷ یافته‌های حاصل از همبستگی بین برخی ویژگی‌های خاک و عناصر سنگین گزارش شده است که بر اساس این یافته‌ها رس و شن، سیلت و شن، سرب و رس، سرب و اسیدیته همبستگی منفی و معنی‌داری در سطح ۰/۰۱ و همچنین سرب و روی همبستگی معنی‌داری در سطح ۰/۰۱ و هدایت الکتریکی و روی در خاک همبستگی منفی و معنی‌داری در سطح ۰/۰۵ دارند.

جدول ۷: ضرایب همبستگی بین برخی ویژگی‌های خاک و فلزات سنگین (منبع: یافته‌های تحقیق)

اسیدیته	هدایت الکتریکی	درصد شن	درصد سیلت	درصد رس	درصد ماده آلی	میزان سرب	میزان روی
اسیدیته	۱						
هدایت الکتریکی	۰/۰۷	۱					
درصد شن	۰/۱۹	-۰/۰۳	۱				
درصد سیلت	-۰/۳۱	۰/۱۵	-۰/۸۷**	۱			
درصد رس	۰/۲۲	-۰/۰۶	-۰/۶۱**	۰/۲۲	۱		
درصد ماده آلی	-۰/۱۲	۰/۲۲	-۰/۱۰	۰/۱۵	۰/۱۲	۱	
میزان سرب	-۰/۵۵	-۰/۱۷	۰/۱۸	-۰/۱۰	-۰/۴۴**	-۰/۲۶	۱
میزان روی	-۰/۳۲	-۰/۳۷	۰/۲۱	-۰/۱۶	-۰/۳۰	-۰/۶۱**	۰/۶۱**

علامت ** به معنی معنادار بودن همبستگی در سطح احتمال ۱ درصد و علامت * به معنی معناداری آن در سطح ۵ درصد است

آماره‌های توصیفی شاخص‌های آلودگی

یافته‌های توصیفی مربوط به شاخص‌های آلودگی مانند شاخص بار آلودگی (PLI)، شاخص زمین‌انباشتگی (Igeo) و فاکتور آلودگی (CF) به شرح جدول ۸ می‌باشد. مقادیر Igeo برای سرب در دامنه تغییرات ۵/۰۷-۱/۴۲ قرار گرفت و از کلاس نسبتاً آلوده تا بسیار/ فوق‌العاده آلوده متغیر بود و برای عنصر روی در کلاس بدون آلودگی تا نسبتاً آلوده (دامنه تغییرات ۰/۳۲-۳/۴۵-) قرار گرفت. برای عنصر سرب فاکتور آلودگی در دامنه تغییرات ۵۰/۳۳-۴/۰۲ قرار داشت و نشان‌دهنده کلاس آلودگی زیاد تا آلودگی بسیار زیاد بود و برای عنصر روی نیز فاکتور آلودگی در دامنه تغییرات ۱/۸۸-۰/۱۴ قرار گرفت که آلودگی کم تا آلودگی متوسط نمونه‌ها را نشان می‌دهد. مقدار شاخص بار آلودگی (PLI = 2/21) نیز نشان داد که آلودگی خاک در منطقه در سطح قابل توجهی قرار دارد و سهم اصلی در این آلودگی به سرب مربوط است.

جدول ۸: آماره‌های توصیفی سه معیار کمی ارزیابی آلودگی فاکتور آلودگی (CF)، شاخص زمین‌انباشتگی (Igeo) و شاخص بار آلودگی

(PLI) (منبع: یافته‌های تحقیق)

شاخص	عنصر	کمینه	بیشینه	میانگین	انحراف معیار	چولگی	کشیدگی
Igeo	سرب	۱/۴۲	۵/۰۷	۳/۳۹	۰/۸۵	-۰/۳۹	۰/۲۸
	روی	-۳/۴۵	۰/۳۲	۰/۷۵	۰/۷۹	-۱/۵۶	۴/۸۱
CF	سرب	۴/۰۲	۵۰/۳۳	۱۸/۲۸	۱۰/۳۸	۱/۳۳	۲/۶۶
	روی	۰/۱۴	۱/۸۸	۱/۰۱	۰/۴۵	۰/۴۴	-۰/۳۴

غلظت سرب و روی در خاک‌های پیرامون معدن

نتایج حاصل از سنجش غلظت سرب و روی در خاک‌های سطحی پیرامون معدن نشان داد که مقدار هر دو عنصر در برخی نمونه‌ها به‌طور محسوسی بالاتر از سطوح متعارف خاک‌ها و مقادیر مرجع ارائه شده توسط استاندارد جهانی EPA است. این الگو با نتایج گزارش شده در مطالعات بین‌المللی و داخلی نیز مطابقت دارد. از جمله توس^۱ و همکاران (۲۰۱۶) در ارزیابی فلزات سنگین خاک‌های کشاورزی اروپا، بوزیدار^۲ و همکاران (۲۰۱۳) در بررسی خاک اطراف باطله‌های فلوتاسیون معدن سرب و روی گروت، طالبی و همکاران (۱۳۹۲) در مطالعه ژئوشیمی و آلودگی محیط‌زیستی معدن لاریخانی، کرد و همکاران (۱۳۹۷) در پژوهش پالایش خاک‌های آلوده معدن آهن‌گران ملایر و فیض‌نیا و همکاران (۱۴۰۰) در بررسی خاک‌های مجاور معدن کوشک بافق، گزارش‌هایی مشابه ارائه کرده‌اند.

بیشترین غلظت سرب در این مطالعه در ابتدای ترانسکت جنوبی با مقدار $629/12 \text{ mg/kg}$ مشاهده شد و کمترین مقدار آن در انتهای ترانسکت شمال‌غربی با مقدار $50/30 \text{ mg/kg}$ به‌دست آمد. همچنین بیشینه غلظت روی برابر با $131/38 \text{ mg/kg}$ و مربوط به ابتدای ترانسکت جنوبی بود در حالی که کمترین مقدار روی در ترانسکت میانی موقعیت شرقی معدن با مقدار $9/64 \text{ mg/kg}$ مشاهده شد. نتایج آزمون کروسکال-والیس نشان داد که اختلاف غلظت عناصر به‌ویژه در جهت جنوبی نسبت به سایر ترانسکت‌ها از نظر آماری معنی‌دار بود ($p < 0.05$). این یافته نشان می‌دهد که توزیع فلزات سنگین در خاک‌های پیرامون معدن یکپارچه نبوده و بخش جنوبی معدن به‌عنوان یکی از کانون‌های اصلی تجمع سرب و روی قابل شناسایی است.

تمرکز بیشتر سرب و روی در جهت جنوبی معدن می‌تواند ناشی از برهم‌کنش چند عامل از جمله موقعیت مکانی باطله‌ها، شیب عمومی منطقه، فرایندهای هوازدگی کانی‌های سولفیدی، جابه‌جایی سطحی ذرات آلوده و انتقال توسط رواناب‌های سطحی باشد. با این حال با توجه به اینکه نمونه‌برداری این مطالعه صرفاً از خاک‌های سطحی در عمق ۲۰-۳۰ cm انجام شده است، تفسیر مربوط به انتقال عمقی عناصر، آبشویی در پروفیل خاک یا اثرات احتمالی بر آب‌های زیرزمینی نیازمند مطالعات تکمیلی است و نمی‌توان بر اساس داده‌های حاضر درباره آن نتیجه‌گیری قطعی ارائه داد.

در بخش شرقی معدن، کمترین غلظت روی در خاک مشاهده شد. با توجه به وجود اراضی کشاورزی در این محدوده احتمال می‌رود اختلاط مکانیکی خاک در اثر شخم، آبیاری و تغییرات موضعی ویژگی‌های خاک در کاهش غلظت سطحی روی نقش داشته باشد. با این حال این تفسیر باید با احتیاط بیان شود، زیرا کاهش غلظت روی در شرق معدن می‌تواند تحت تأثیر عواملی مانند فاصله از منبع آلودگی، تفاوت بافت خاک، شرایط زهکشی، pH، مقدار مواد آلی و شدت کاربری زمین نیز قرار گرفته باشد. بنابراین برای تأیید دقیق نقش فعالیت‌های کشاورزی در کاهش غلظت روی، بررسی‌های تکمیلی شامل نمونه‌برداری عمقی، تعیین شکل‌های شیمیایی عناصر و ارزیابی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک ضروری است.

¹ - Toth

² - Bozidar

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

تحلیل همبستگی ویژگی های فیزیکی و شیمیایی خاک با غلظت فلزات

در بسیاری از پژوهش ها گزارش شده است که ویژگی های فیزیکی و شیمیایی خاک، از جمله pH، بافت خاک، درصد رس، هدایت الکتریکی و ظرفیت جذب سطحی، نقش مهمی در کنترل رفتار ژئوشیمیایی، تحرک و دسترسی پذیری عناصر فلزی دارند. نتایج مطالعه حاضر نیز با یافته های پژوهش های پیشین از جمله بیگ محمدی و همکاران (۱۴۰۲) هم راستا است.

بر اساس نتایج آزمایشگاهی، خاک منطقه مورد مطالعه دارای pH در محدوده اسیدی تا نزدیک به خنثی بوده و از نظر بافتی عمدتاً شنی است. وجود رابطه منفی و معنی دار بین سرب و pH خاک در سطح $p < 0.01$ نشان می دهد که در شرایط اسیدی تر، غلظت قابل اندازه گیری سرب در خاک افزایش یافته است. به طور کلی با افزایش pH، بسیاری از فلزات سنگین تمایل بیشتری به رسوب به صورت هیدروکسیدها، کربنات های نامحلول یا تشکیل کمپلکس های آلی و معدنی پایدار پیدا می کنند و در نتیجه قابلیت تحرک آن ها کاهش می یابد. در مقابل کاهش pH می تواند موجب افزایش انحلال برخی فازهای معدنی و آزادسازی عناصر فلزی از فازهای جامد خاک شود. بنابراین همبستگی منفی و معنی دار بین pH و سرب در منطقه مورد مطالعه بیانگر افزایش نسبی مقدار سرب در شرایط اسیدی تر خاک است. این نتیجه با یافته های امینی و همکاران (۱۳۹۰) در مطالعه غلظت نیکل در خاک های پیرامون معدن سرب و روی آهنگران قابل مقایسه است.

نتایج همچنین نشان داد که بین درصد رس و غلظت سرب موجود در خاک، همبستگی منفی و معنی دار در سطح $p < 0.01$ وجود دارد. این رابطه در نگاه نخست ممکن است با نقش شناخته شده کلوئیدهای رسی در جذب و نگهداشت فلزات سنگین متفاوت به نظر برسد؛ زیرا ذرات رسی به دلیل برخورداری از سطح ویژه بالا، بار سطحی و ظرفیت تبادل کاتیونی، معمولاً توانایی قابل توجهی در جذب عناصر فلزی دارند و می توانند از جابه جایی آن ها بکاهند. با این حال، در منطقه مورد مطالعه، منفی بودن رابطه بین رس و سرب را نمی توان به صورت مستقیم به کاهش نقش رس در جذب فلزات نسبت داد. این الگو احتمالاً تحت تأثیر چند عامل هم زمان، از جمله غالب بودن بافت شنی، ناهمگنی مکانی خاک، تفاوت در فاصله نمونه ها از منبع آلودگی، تغییرات موضعی pH و فرایندهای جذب و واجذب قرار گرفته است.

در خاک های شنی، به دلیل ظرفیت نگهداشت کمتر و نفوذپذیری بیشتر، امکان توزیع ناهمگن فلزات در خاک افزایش می یابد. از سوی دیگر، در شرایط اسیدی تر، بخشی از سرب جذب شده بر سطح ذرات رسی یا مواد آلی ممکن است واجذب شده و وارد فاز قابل دسترس تر شود. بنابراین همبستگی منفی مشاهده شده بین رس و سرب می تواند بازتابی از برهم کنش میان بافت غالب شنی، شرایط اسیدی، ناهمگنی خاک و نزدیکی به منابع کانی سازی و باطله های معدنی باشد، نه صرفاً اثر مستقیم درصد رس. این تفسیر با گزارش پارلاک^۱ و همکاران (۲۰۲۴) در ارزیابی فلزات سنگین در باطله ها و خاک های پیرامون معدن سرب-روی در شمال غرب ترکیه همخوانی دارد. همچنین نقش ویژگی های فیزیکی و شیمیایی خاک در کنترل غلظت فلزات سنگین در مطالعات سلماسی (۱۳۹۷) در حوزه آبخیز قرنقوچای و سلماسی و پیروانی (۱۴۰۰) در منطقه سراسکند نیز مورد تأیید قرار گرفته است.

در بخش دیگری از نتایج بین روی و هدایت الکتریکی خاک همبستگی منفی و معنی دار در سطح $P < 0.05$ مشاهده شد. هدایت الکتریکی خاک شاخصی از مقدار یون های محلول و شوری نسبی محیط خاک است و تغییرات آن

¹ - Parlak

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

می تواند بر رقابت یونی، جذب سطحی، رسوب یا تحرک فلزات سنگین اثرگذار باشد. کاهش غلظت روی با افزایش EC ممکن است به این دلیل باشد که در شرایط افزایش یون های محلول، بخشی از روی از طریق تشکیل کمپلکس های معدنی، جذب بر سطوح کانی های رسی و اکسیدهای آهن و منگنز، یا رسوب به صورت ترکیبات کم تحرک تر از فاز قابل دسترس خارج شده باشد. همچنین افزایش یون های رقیب در محلول خاک می تواند الگوی جذب و واجذب روی را تغییر دهد و سبب کاهش رابطه مستقیم آن با فاز محلول خاک شود. بنابراین همبستگی منفی بین روی و EC نشان دهنده آن است که افزایش هدایت الکتریکی الزاماً به معنای افزایش تحرک روی نیست، بلکه بسته به ترکیب یونی محلول خاک، pH و حضور فازهای جذب کننده، می تواند با کاهش قابلیت دسترسی یا کاهش غلظت قابل اندازه گیری روی همراه باشد. این نتیجه با یافته های پارلاک^۱ و همکاران (۲۰۲۴) درباره فلزات سنگین در خاک مناطق معدنی سرب-روی و باطله های مرتبط در شمال غرب ترکیه مطابقت دارد.

از سوی دیگر بین سرب و روی موجود در خاک همبستگی مثبت و معنی دار در سطح $p < 0.01$ مشاهده شد. این همبستگی می تواند نشان دهنده رفتار ژئوشیمیایی نسبتاً مشابه یا احتمال وجود منشأ معدنی مشترک برای این دو عنصر باشد؛ با این حال با توجه به اینکه در این مطالعه تحلیل های تکمیلی مانند بررسی کانی شناسی تفصیلی، ایزوتوپی یا مدل سازی منشأ آلودگی انجام نشده است، این نتیجه باید با احتیاط تفسیر شود. در محدوده معدن سرب و روی شاهین، حضور کانی های سولفیدی مانند گالن (PbS) و اسفالریت (ZnS) می تواند یکی از دلایل زمین شناختی قابل قبول برای همراهی سرب و روی در خاک باشد. بنابراین همبستگی مثبت این دو عنصر را می توان به عنوان شواهدی آماری در حمایت از ارتباط احتمالی آن ها با کانی سازی سرب و روی منطقه در نظر گرفت، نه اثبات قطعی منشأ یکسان آلودگی.

از نظر ژئوشیمیایی، کانی سازی سرب و روی در بسیاری از کانسارها با حضور کانی های سولفیدی همراه است. در چنین شرایطی، هوازدگی و اکسیداسیون کانی های سولفیدی، به ویژه در حضور آب و اکسیژن، می تواند موجب تولید اسیدیته و کاهش pH محیط شود. کاهش pH نیز با افزایش انحلال پذیری برخی کانی ها و آزادسازی عناصر فلزی، می تواند قابلیت جابه جایی سطحی فلزات سنگین را افزایش دهد. این فرایند در محدوده های معدنی دارای شکستگی ها، باطله های معدنی و خاک های بافت نفوذپذیر می تواند شدت بیشتری داشته باشد؛ زیرا مسیرهای حرکت آب و انتقال ذرات یا محلول های حاوی فلز در سطح خاک افزایش می یابد. در نتیجه ترکیب شرایطی مانند pH نسبتاً پایین، غالب بودن بافت شنی، ناهمگنی مکانی خاک، حضور کانی های سولفیدی سرب و روی و احتمال اکسیداسیون سولفیدها می تواند الگوی توزیع و همبستگی عناصر فلزی در منطقه مورد مطالعه را توضیح دهد. یافته های طالبی و همکاران (۱۳۹۳) در بررسی ژئوشیمی و آلودگی های محیط زیستی معدن سرب و روی لاریخانی در جنوب سیاهکل، ستوهیان و همکاران (۱۳۹۲) در مطالعه اثرات محیط زیستی باطله های سرب و روی در قزوین و کرمی و همکاران (۱۴۰۰) در ارزیابی آلودگی فلزات سنگین خاک های محدوده معدن سرب و روی گل زرد در شمال شرقی الیگودرز، با این تفسیر کلی همخوانی دارد.

توزیع مکانی فلزات سنگین در موقعیت های مختلف جغرافیایی

نتایج بررسی توزیع مکانی فلزات سنگین نشان داد که بیشترین غلظت سرب و روی در بخش جنوبی معدن مشاهده شده است. تمرکز بالاتر این عناصر در این بخش را می توان به برهم کنش چند عامل از جمله شرایط زمین شناسی،

¹ - Parlak

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می‌باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

موقعیت باطله‌های معدنی، گسترش فعالیت‌های معدن‌کاری، شیب عمومی منطقه و انتقال سطحی آلاینده‌ها نسبت داد. در صورت هم‌راستایی شیب توپوگرافی با جهت جنوب، رواناب‌های سطحی می‌توانند ذرات و محلول‌های حاوی فلزات را از نواحی مرتفع‌تر به بخش‌های پایین‌دست منتقل کنند و زمینه تجمع نسبی سرب و روی را در خاک‌های جنوبی فراهم سازند. همچنین هوازدگی کانی‌های سولفیدی مانند گالن (PbS) و اسفالریت (ZnS) که از کانی‌های شاخص در کانسارهای سرب-روی هستند، می‌تواند موجب آزادسازی این عناصر و افزایش غلظت آن‌ها در خاک‌های پیرامون معدن شود. این الگوی مکانی با نتایج سهرابی زاده (۱۳۹۹) در معدن سرب و روی کوشک بافق قابل مقایسه است.

کمترین غلظت سرب در بخش شمال‌غربی معدن شناسایی شد. این کاهش را می‌توان بیشتر با موقعیت نسبتاً بالادست این بخش، فاصله بیشتر از محدوده تجمع باطله‌ها و قرار نگرفتن در مسیر اصلی رواناب‌های سطحی مرتبط دانست. اگرچه جهت باد غالب منطقه ممکن است در پراکنش ذرات ریز معدنی نقش داشته باشد، اما به دلیل نبود داده‌های کمی درباره سرعت، فراوانی، شدت و تغییرات فصلی باد، نمی‌توان آن را به‌عنوان عامل اصلی یا قطعی کنترل‌کننده الگوی پراکنش فلزات در نظر گرفت. بنابراین نقش باد در این مطالعه باید به‌صورت احتمالی و در کنار سایر عوامل محیطی تفسیر شود، نه به‌عنوان تنها دلیل کاهش یا افزایش غلظت فلزات در یک جهت جغرافیایی خاص. در بخش شرقی معدن، کمترین غلظت روی در خاک مشاهده شد. با توجه به وجود اراضی کشاورزی در این محدوده احتمال می‌رود اختلاط مکانیکی خاک در اثر شخم، آبیاری و تغییرات موضعی ویژگی‌های خاک در کاهش غلظت سطحی روی نقش داشته باشد. با این حال این تفسیر باید با احتیاط بیان شود؛ زیرا کاهش روی در شرق معدن می‌تواند تحت تأثیر عوامل دیگری مانند تفاوت در فاصله از منبع آلودگی، تغییرات بافت خاک، شرایط زهکشی، pH، مقدار مواد آلی و شدت کاربری زمین نیز قرار گرفته باشد. از این رو، برای تأیید قطعی نقش فعالیت‌های کشاورزی در کاهش روی، بررسی‌های تکمیلی مانند نمونه‌برداری عمقی، ارزیابی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک و تعیین شکل‌های شیمیایی روی ضروری است.

تغییرات غلظت فلزات سنگین با فاصله از معدن

بر اساس داده‌های به‌دست‌آمده فاصله از کانسار و محدوده‌های فعال معدن‌کاری یکی از عوامل مهم در تغییرات غلظت سرب و روی در خاک است. بیشترین غلظت این عناصر در نمونه‌های نزدیک به معدن و باطله‌های معدنی مشاهده شد و با افزایش فاصله از محدوده استخراج، مقدار سرب و روی به‌طور قابل توجهی کاهش یافت. این روند نشان می‌دهد که فعالیت‌های معدن‌کاری، خردایش و جابه‌جایی مواد معدنی، انباشت باطله‌ها و قرار گرفتن کانی‌های سولفیدی در معرض هوازدگی می‌توانند در افزایش غلظت فلزات سنگین در خاک‌های مجاور معدن نقش داشته باشند. اگرچه سازندهای زمین‌شناسی منطقه ممکن است به‌طور طبیعی دارای مقادیری از سرب و روی باشند، اما فعالیت‌های استخراجی با افزایش سطح تماس کانی‌ها با آب و اکسیژن، شرایط آزادسازی و انتقال این عناصر به خاک‌های سطحی را تشدید می‌کند. این نتیجه با یافته‌های مقیمی و قدیمی (۱۳۹۸) در معدن انگوران و طالبی و همکاران (۱۳۹۳) در معدن لاریخانی همخوانی دارد.

بررسی تغییرات غلظت در طول ترانسکت‌ها نیز نشان داد که با افزایش فاصله از معدن مقدار سرب و روی در خاک کاهش می‌یابد. این الگو را می‌توان نتیجه کاهش اثر مستقیم منابع آلاینده، از جمله محدوده استخراج، دپوهای معدنی و باطله‌ها در فاصله‌های دورتر دانست. در نزدیکی معدن هوازدگی گالن و اسفالریت، جابه‌جایی ذرات معدنی و

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

انتقال آلاینده‌ها توسط رواناب سطحی می‌تواند موجب افزایش غلظت سرب و روی شود. در حالی که با دور شدن از این منابع، سهم آلاینده‌های ناشی از معدن‌کاری کاهش یافته و نقش زمینه طبیعی زمین‌شناسی پررنگ‌تر می‌شود. بنابراین کاهش غلظت با افزایش فاصله، شواهدی در حمایت از اثرگذاری فعالیت‌های معدن‌کاری بر آلودگی خاک‌های پیرامونی ارائه می‌دهد. هرچند برای تفکیک دقیق سهم منابع طبیعی و انسانی، مطالعات تکمیلی کانی‌شناسی و ژئوشیمیایی ضروری است.

مقایسه غلظت‌های اندازه‌گیری‌شده با مقادیر مرجع EPA نشان داد که مقادیر سرب و روی در برخی نمونه‌های منطقه از حدود مرجع فراتر رفته است و از این نظر خاک‌های پیرامون معدن در وضعیت آلودگی قابل توجه قرار دارند. به‌منظور ارزیابی دقیق‌تر شدت آلودگی، از شاخص‌های ژئوشیمیایی شامل فاکتور آلودگی CF، شاخص بار آلودگی PLI و شاخص زمین‌انباشتگی Igeo استفاده شد. نتایج این شاخص‌ها، همراه با مشاهدات میدانی، نشان می‌دهد که خاک‌های نزدیک به محدوده معدن و باطله‌ها از نظر آلودگی به سرب و روی در وضعیت نامطلوب‌تری قرار دارند. این موضوع بیانگر آن است که علاوه بر زمینه زمین‌شناسی منطقه، فعالیت‌های انسانی مرتبط با معدن‌کاری می‌تواند سهم قابل توجهی در افزایش غلظت فلزات سنگین در خاک‌های سطحی داشته باشد. مطالعات رحمانی و همکاران (۱۴۰۳) و زاکور^۱ و همکاران (۲۰۲۳) نیز نشان داده‌اند که شاخص‌های ژئوشیمیایی ابزار مناسبی برای ارزیابی شدت آلودگی و بررسی نقش نسبی منابع طبیعی و انسانی در خاک هستند.

در مجموع الگوی تغییرات مکانی و فاصله‌ای سرب و روی در منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد که تمرکز آلودگی عمدتاً در بخش‌های نزدیک به معدن، باطله‌ها و مسیرهای محتمل انتقال رواناب رخ داده است. کاهش غلظت این عناصر با افزایش فاصله از معدن نیز نقش فعالیت‌های معدن‌کاری، هوازگی کانی‌های سولفیدی و جابه‌جایی سطحی آلاینده‌ها را در توزیع فلزات سنگین تأیید می‌کند. با این حال به دلیل نبود داده‌های تکمیلی درباره رژیم باد، تغییرات عمقی خاک، شکل‌های شیمیایی عناصر و سهم دقیق منابع طبیعی و انسانی، تفسیر نقش هر عامل باید با احتیاط انجام شود. بنابراین آلودگی سرب و روی در خاک منطقه را می‌توان حاصل برهم‌کنش میان زمینه زمین‌شناسی، فعالیت‌های معدن‌کاری، شیب توپوگرافی، باطله‌های معدنی و فرایندهای انتقال سطحی دانست.

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که خاک‌های سطحی پیرامون معدن سرب و روی شاهین از نظر تجمع فلزات سنگین، به‌ویژه سرب، تحت تأثیر فعالیت‌های معدنی و شرایط زمین‌شناسی منطقه قرار گرفته‌اند. بر اساس غلظت‌های اندازه‌گیری‌شده و شاخص‌های آلودگی، سرب به‌عنوان آلاینده اصلی منطقه شناسایی شد و نسبت به روی اهمیت محیط‌زیستی بیشتری نشان داد. الگوی مکانی داده‌ها بیانگر آن بود که آلودگی در اطراف معدن توزیع یکنواختی ندارد و بخش جنوبی معدن کانون اصلی تجمع سرب و روی محسوب می‌شود. نتایج آزمون کروסקال-والیس نیز

¹- Zaakour

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

نشان داد که تفاوت غلظت عناصر، به ویژه در ترانسکت جنوبی نسبت به سایر جهت ها، از نظر آماری معنی دار بود ($p < 0.05$).

کاهش غلظت سرب و روی با افزایش فاصله از معدن نشان می دهد که محدوده استخراج، دپوهای معدنی، باطله ها، هوازدگی کانی های سولفیدی و جابه جایی سطحی ذرات آلوده می توانند در پراکنش فلزات در خاک های اطراف نقش مهمی داشته باشند. با توجه به مجاورت معدن با اراضی کشاورزی، تجمع سرب در خاک های سطحی می تواند از نظر محیط زیستی، سلامت محصولات کشاورزی و مدیریت کاربری اراضی اهمیت قابل توجهی داشته باشد. بنابراین بخش جنوبی معدن باید به عنوان ناحیه اولویت دار برای پایش و کاهش خطرات محیط زیستی در نظر گرفته شود و همچنین برای تعیین قطعی منشأ آلودگی، استفاده از روش های تکمیلی نظیر PCA، PMF، آنالیز ایزوتوپی و ارزیابی دقیق ویژگی های توپوگرافی و انتقال آلاینده ها در مطالعات آینده ضروری است.

با توجه به اینکه نمونه برداری در این مطالعه فقط از لایه سطحی خاک در عمق ۰-۲۰ cm انجام شده است، نتایج حاضر صرفاً بیانگر وضعیت آلودگی خاک های سطحی است و امکان نتیجه گیری قطعی درباره توزیع عمقی فلزات، مهاجرت عمودی، آبشویی در پروفیل خاک یا اثرات احتمالی بر آب های زیرزمینی را فراهم نمی کند. از این رو انجام مطالعات تکمیلی شامل نمونه برداری عمقی، بررسی شکل های شیمیایی عناصر، پایش فصلی و ارزیابی غلظت سرب و روی در محصولات کشاورزی پیشنهاد می شود. همچنین از آنجا که در این پژوهش تنها Pb و Zn بررسی شدند، نتایج باید به عنوان نمایانگر آلودگی غالب وابسته به کانی سازی سرب-روی تفسیر شوند و نه به عنوان ارزیابی جامع همه عناصر بالقوه سمی در منطقه. پیشنهاد می شود مطالعات آینده عناصر دیگری مانند Cu، Fe، Mn، As، Cd را نیز در ارزیابی ریسک اکولوژیکی وارد کنند. از دیدگاه مدیریتی، پایش دوره ای خاک های کشاورزی و محصولات زراعی پیرامون معدن، به ویژه از نظر سرب، ضروری است. همچنین تثبیت و مدیریت باطله های معدنی، کنترل رواناب های سطحی، جلوگیری از پراکنش گردوغبار آلوده و اجرای روش های اصلاح خاک در کانون های آلوده، به ویژه در بخش جنوبی معدن می تواند در کاهش خطرات محیط زیستی منطقه مؤثر باشد.

تقدیر و تشکر

این مقاله حاصل بخشی از پایان نامه مقطع کارشناسی ارشد است که با حمایت دانشگاه ملایر انجام شده است. بدین وسیله از تمام کسانی که ما را در انجام این مطالعه یاری نمودند تشکر و قدردانی می شود.

منابع

عباسی تبار، حمید، سلگی، عیسی، شایسته، کامران، مرتضوی، ثمر. (۱۴۰۱). بررسی منابع، ساختار شیمیایی و اثرات بهداشتی و محیط زیستی فلزات سنگین در خاک. فصلنامه انسان و محیط زیست. ۲۰(۱)، ۶۳-۷۶. <https://sid.ir/paper/1042926>

امینی، فرخلقا، میرغفاری، نورالله، عشقی ملایری، بهروز. (۱۳۹۰). بررسی غلظت نیکل در خاک و تعدادی از گونه های گیاهی طبیعی در اطراف معدن سرب و روی آهنگران در استان همدان. علوم و تکنولوژی محیط زیست. ۱۳ (۱): ۱۱-۲۰. <https://civilica.com/doc/1288250>

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می باشد. لطفا برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

- بیگ محمدی، فوزیه، سلگی، عیسی، سلیمانی، محسن، بسالت پور، علی اصغر. (۱۴۰۲). بررسی رابطه بین دستیابی زیستی فلزات سنگین با ویژگی های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک در کاربری های مختلف، محیط شناسی، ۴۹(۳)، ۳۷۳-۳۸۸
<https://doi.org/10.22059/jes.2023.364084.1008439>
- فیض نیا، سادات، مختاری، احمد رضا، جعفری، محمد، طویلی، علی، قانع بافقی، محمد جواد، خدائیان، زیبا. (۱۴۰۲). بررسی پراکنش سرب و شاخص های محیط زیستی آن در خاک های مجاور معدن سرب و روی کوشک - بافق، مرتع و آبخیزداری، منابع طبیعی ایران، ۷۲(۲).
<https://doi.org/10.22059/jrwm.2019.99152.698>
- کرد، بهروز، صفی خانی، فضل اله، خادمی، امین، پورعباسی، سارا. (۱۳۹۷). بررسی نقش گیاهان مرتعی در پالایش خاک های آلوده به سرب و روی اطراف معدن سرب و روی آهنگران ملایر. تحقیقات مرتع و بیابان ایران. ۲۵ (۱): ۷۸-۸۸
<https://doi.org/10.22092/ijrdr.2018.116228>
- لایقی، نصرت اله، جوادی، سید اکبر، جعفری، محمد، ارزانی، حسین. (۱۴۰۲). بررسی اثرات بهره برداری از معادن بر ساختار و عملکرد پوشش گیاهی و خاک سطحی مراتع (مطالعه موردی: مراتع بوئین زهرا)، مرتع، ۱۷ (۳): ۳۳۴-۳۴۶.
<http://rangelandssrm.ir/article-1108-1-fa.html>
- رفعتی، مریم، ملک زاده، مریم، فیروزی، مجید. (۱۴۰۲). بررسی قابلیت گیاه پالایی آتریپلکس (Atriplex.sp) و خرزهره (Nerium oleander)، در جذب فلزات سنگین سرب و کادمیوم در مرکز دفن آرادکوه. آب و خاک. ۳۷ (۴): ۵۴۷-۵۶۰
<https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.20084757.1402.37.4.4.9>
- رحمانی، شهلا، سرمیدیان، فریدون، فرحبخش، محسن. (۱۴۰۳). ارزیابی شاخص های زیست محیطی آلودگی خاک به عنصر سرب در بخشی از اراضی شهری استان تهران. پژوهش های آب و خاک ایران. ۵۵(۹)، ۱۵۰۳-۱۴۸۵.
<https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.378270.669735>
- رستم نیا، محمود، چابک، علی، شیروانی، مهران، بازگیر، مسعود. (۱۳۹۹). جذب رقابتی عناصر مس، سرب، کادمیم و نیکل بر روی کانی های رسی خاک مجاور کارخانه سیمان شهر ایلام. محیط زیست طبیعی، ۷۳(۳)، ۵۱۴-۵۰۱.
<https://doi.org/10.22059/jne02020301906.1977>
- سلماسی، رامین، پیروان، حمید رضا. (۱۴۰۰). آلودگی خاک به برخی فلزات سنگین و رابطه این فلزات با ویژگی های خاک های منطقه ی سراسر. علوم و تکنولوژی محیط زیست. ۲۳(۴): ۹۷-۱۰۶.
<https://civilica.com/doc/1292428>
- سهرابی زاده، زهرا، سودایی زاده، حمید، حکیم زاده، محمد علی، تقی زاده مهرجردی، روح اله، قانع بافقی، محمد جواد. (۱۳۹۹). ارزیابی آلودگی فلزات سنگین در خاک های پیرامون معدن سرب و روی کوشک بافق با استفاده از شاخص های آلودگی و تجزیه و تحلیل مولفه اصلی، جغرافیا و برنامه ریزی محیطی. ۷۷ (۱): ۱۵-۳۴.
<https://doi.org/10.22108/gep.2020.121263.1260>
- سلگی، عیسی، بیگ محمدی، فوزیه، زمانیان، علی. (۱۳۹۹). بکارگیری شاخص های آلودگی به منظور بررسی میزان ترسیب فلزات سنگین در خاک (مطالعه موردی کارخانه سیمان نهاوند). تحقیقات کاربردی خاک. ۸ (۳): ۱۸۸-۲۰۱.
<https://sid.ir/paper/393004/fa>
- طاطیان، محمد رضا، تمرناش، رضا، آقاجان تبار عالی، حسین، فرجی، آیلین. (۱۴۰۲). بررسی توان گیاه پالایی گونه های مرتعی Festuca ovina، Dactylis glomerata و Medicago sativa به عناصر سرب و کادمیم. محیط زیست طبیعی. ۷۶ (۱): ۱۵-۲۸.
<https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.20087764.1402.76.1.2.3>
- APHA. 2017. Standard methods for the examination of water and wastewater (23rd ed.). Method 2510: Conductivity. American Public Health Association, Washington, DC.
- Adnan, M., Xiao, B., Xiao, P., Zhao, P., Li, R. and Bibi, S. 2022. Research progress on heavy metals pollution in the soil of smelting sites in China. *Toxics*, 10(5), 231. <https://doi.org/10.3390/toxics10050231>
- Akoto, R. and Anning, A. K. 2021. Heavy metal enrichment and potential ecological risks from different solid mine wastes at a mine site in Ghana. *Environmental Advances*, 3, 100028. <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2020.100028>
- ASTM International. 1963. Standard test method for particle-size analysis of soils (ASTM D422-63). *ASTM International*, West Conshohocken, PA
- Chen, L., Zhou, M., Wang, J., Zhang, Z., Duan, C., Wang, X. and Fang, L. 2022. A global meta-analysis of heavy metal (loid) s pollution in soils near copper mines: Evaluation of pollution level and probabilistic health risks. *Science of the Total Environment*, 835, 155441. [10.1016/j.scitotenv.2022.155441](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155441)
- Deng, J., Li, B., Zhang, S., Li, Z., Zu, Y., He, Y. and Li, T. 2021. Plant species diversity of plant communities and heavy metal accumulation in buffer zone of Momianhe stream along a long-term mine wastes area, China. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 107(6), 1136-1142. <https://doi.org/10.1007/s00128-021-03296-3>

- Ferreira, C. S., Seifollahi-Aghmiuni, S., Destouni, G., Ghajarnia, N. and Kalantari, Z. 2022. Soil degradation in the European Mediterranean region: Processes, status and consequences. *Science of the Total Environment*, 805, 150106. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150106>
- Hossen, M. A., Chowdhury, A. I. H., Mullick, M. R. A. and Hoque, A. 2021. Heavy metal pollution status and health risk assessment vicinity to Barapukuria coal mine area of Bangladesh. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, 16, 100469. <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2021.100469>
- Kilicoglu, M. C. 2024. Effects of heavy metal contamination on fungal diversity in *Pinus brutia* shoots. *BioResources*, 19(2), 2724. <https://doi.org/10.15376/biores.19.2.2724-2735>
- Kumar, V., Sharma, A., Minakshi, Bhardwaj, R. and Thukral, A. K. 2018. Temporal distribution, source apportionment, and pollution assessment of metals in the sediments of Beas River, India. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 24(8), 2162-2181. <https://doi.org/10.1080/10807039.2018.1440529>
- Lashkari Sanami, N., Ghorbani, J., Hodjati, S. M., Vahabzadeh Kebria, G. and Motesharezadeh, B. 2022. Seed germination of plants grown in coal mine wastes in response to copper, lead, and cadmium stress. *Environmental Sciences*, 20(1), 179-198. <https://doi.org/10.1001/1.17351324.1401.20.1.12.1>
- Li, X., Li, W., Chu, L., White Jr, J. F., Xiong, Z. and Li, H. 2016. Diversity and heavy metal tolerance of endophytic fungi from *Dysphania ambrosioides*, a hyperaccumulator from Pb-Zn contaminated soils. *Journal of Plant Interactions*, 11(1), 186-192. <https://doi.org/10.1080/17429145.2016.1266043>
- Nelson, D. W., & Sommers, L. E. 1996. Total carbon, organic carbon, and organic matter. In D. L. Sparks (Ed.), *Methods of soil analysis: Part 3. Chemical methods* (pp. 961-1010). *Soil Science Society of America*.
- Nomas, A. H. and Al-Shamma, A. 2023. Calculation of Pollution Indicators for Heavy Metals in the Surface Soil of Nasiriyah Oil Field. *Journal of Survey in Fisheries Sciences*, 10(3S), 1077-1086. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.378270.669735>
- Parlak, M., Tunçay, T. and Parlak, A. Ö. 2023. Heavy metals in tailings and soils in the Pb-Zn mining areas of North-west Türkiye and health risk evaluations. *International Journal of Agriculture Environment and Food Sciences*, 8(1), 131-148. <https://doi.org/10.31015/jaefs.2024.1.14>
- Rahmanian, M., Jahantab, Esfandiar, and Gholamzadeh, Majid. (2019). Assessment of heavy metals, lead and manganese pollution in the soils around Yasouj cement factory. *Journal of Natural Environment*, 73(1), 37-48. doi: 10.22059/jne.2020.277160.1663
- Riyazuddin, R., Nisha, N., Ejaz, B., Khan, M. I. R., Kumar, M., Ramteke, P. W. and Gupta, R. 2021. A comprehensive review on the heavy metal toxicity and sequestration in plants. *Biomolecules*, 12(1), 43. <https://doi.org/10.3390/biom12010043>
- Tóth, G., Hermann, T., Da Silva, M. R. and Montanarella, L. J. (E. J. 2016. Heavy metals in agricultural soils of the European Union with implications for food safety. *Environment International*, 88, 299-309. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2015.12.017>
- U.S. Environmental Protection Agency (EPA). 1998. Soil screening guidance: Technical background document (EPA/540/R-95/128). U.S. EPA, Washington, DC. <https://www.epa.gov/superfund>
- USEPA. 1994. Method 7010: Graphite furnace atomic absorption spectrophotometry. *United States Environmental Protection Agency*.
- USEPA. 1996. Method 3050B: Acid digestion of sediments, sludges, and soils. *United States Environmental Protection Agency, Office of Solid Waste*.
- Wieczorek, J. and Baran, A. 2022. Pollution indices and biotests as useful tools for the evaluation of the degree of soil contamination by trace elements. *Journal of Soils and Sediments*, 1-18. <https://doi.org/10.1007/s11368-021-03091-x>
- Xiao, W., Zhang, Y., Chen, X., Sha, A., Xiong, Z., Luo, Y. and Li, Q. 2024. The Easily Overlooked Effect of Global Warming: *Diffusion of Heavy Metals*. *Toxics*, 12(6), 400. <https://doi.org/10.3390/toxics12060400>
- Xiao, X., Zhang, J., Wang, H., Han, X., Ma, J., Ma, Y. and Luan, H. 2020. Distribution and health risk assessment of potentially toxic elements in soils around coal industrial areas: A global meta-analysis. *Science of the Total Environment*, 713, 135292. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135292>