



Investigating the contamination of heavy metals in soil of the Sangam mining area, Khorasan-Razavi Province

Zahra Yaftian¹, Ata Shakri², Mehrdad Hadipourdeshal³, Meisam Rastegari Mehr^{*4}

1. Master of Science, Department of Applied Geology, Faculty of Earth Sciences, Kharazmi University, Karaj, Iran

2. Professor, Department of Applied Geology, Faculty of Earth Sciences, Kharazmi University, Karaj, Iran

3. Associate Professor, Department of Plant Biology, Faculty of Biological Sciences, Kharazmi University, Karaj, Iran

4. Assistant Professor, Department of Applied Geology, Faculty of Earth Sciences, Kharazmi University, Karaj, Iran

Article info	Abstract
<p>Article history Received: 05 December 2023 Accepted: 22 December 2023</p> <p>Keywords: Pollution, heavy metals, soil, mining, Sangan.</p>	<p>Mining is a necessary activity for the development of countries, but it imposes direct and indirect negative impacts on the exploited areas and their surroundings. Sangam iron mine is one of the largest iron ore deposits in the Middle East, where the ore is extracted by open pit mining. The present study aims to investigate the soil's concentration of heavy metals and to assess the level of soil's contamination in the Sangam mining area. For these purposes, 44 samples of the soils (including both topsoils and subsoils) of the Sangam mining area were collected, and were analyzed by an ICP-MS device. The obtained data were analyzed by calculating the geochemical indices and statistical methods. On the basis of descriptive statistics of the analytical data, Pb with an average content of 138.39 mg/kg and Cd with an average concentration of 0.19 mg/kg had the highest and lowest concentrations in top soils, respectively. Moreover, Cr with an average value of 102.19 mg/kg, showed the highest, and Cd with an average of 0.2 mg/kg showed the lowest concentrations in subsoils. The average concentrations of As, Cr and Fe in the study area were higher than their respective values in the World-Soil Average composition. Among the elements, Pb had very high and severe enrichment in two stations with enrichment factor values of 149 and 23.85. The results indicated no severe soil pollution and ecological risk in the study area, except in some sampling sites. The most polluted soils were collected near the placer extraction units and tailing ponds of Ehya-Sepahan Company, as well as the waste rock pile of Sanabad Comprehensive Development Industrial and Mining Company.</p>



Introduction

The issue of soil contamination with heavy metals is a main problem in industrialized and urbanized regions which may impose serious threat to public health of the local residents and the whole environment worldwide (Xiang et al., 2021). Mining operation is considered to be one of the main sources of soil

contamination with heavy metals (Ran et al., 2021). Metals can be introduced into the soil through natural processes (e.g., rock weathering, volcanic eruptions) and human activities (such as mining, wastewater discharge, and excessive application of pesticides and fertilizers in agricultural practice) (Irshad et al., 2022). The Sangam

DOI <http://doi.org/10.22034/KJES.2023.9.2.104841>

***Corresponding author:** Meisam Rastegari Mehr; **E-mail:** rastegar.m@khu.ac.ir

How to cite this article: Yaftian, Z., Shakri, A., Hadipourdeshal, M., Rastegari Mehr, M., 2023. Investigating the contamination of heavy metals in soil of the Sangam mining area, Khorasan-Razavi Province.

Kharazmi Journal of Earth Sciences 9(2), 26-46. <http://doi.org/10.22034/KJES.2023.9.2.104841>



mining area contains numerous ore deposits and geochemical anomalies, and is one of the main iron ore belts of Iran (Golmohammadi et al., 2015). Geologically, the Sangan mine is located in the Teknar volcanic-intrusive belt. This magmatic belt with an east-west trend is located to the north of the Darone fault and extends to Afghanistan. The mineralization in this mine is of skarn type and it is included in the Khaaf-Daroneh volcanic-plutonic belt (Aqanbati, 2004). Soil pollution is probably a major problem in the study area which is probably intensified by some specific climatological conditions including the prevalence of strong winds. The main purpose of the present study is to assess the level of soil contamination in the Sangan mining area with target heavy metals.

Material and methods

A total of 44 soil samples (23 topsoils of 0-5 cm and 21 sub-soils of 20-25 cm) were collected using a pre-cleaned plastic shovel. The samples were air-dried at room-temperature and then were passed through a 63 μm stainless steel sieve. The total concentrations of major and trace elements were determined using an ICP-MS instrument. Geochemical indices including enrichment factor (EF), pollution index (PI), potential ecological risk index (Er and RI), hazard index (HI), as well as statistical methods such as principal component analysis (PCA) and cluster analysis were applied for data analysis (Mohiuddin et al., 2011; Chabukdhara and Nema, 2012; Yang et al., 2011; Mei et al., 2011; Zheng et al., 2010).

Results and discussion

The results indicate that the average concentrations of As, Cd and Fe in the study area are higher than the World-Soil Average composition (WSA, Kabata-Pendias and Mukherjee, 2007). Indeed, while there is no

noticeable difference in the concentrations of Al, Cu and Ni in the study samples and the WSA composition, the average concentrations of Cd and Zn in the soil of the study area are lower than the WSA (Table 1). In general, the concentration of elements in the soil of the region follows the decreasing trend of $\text{Al} > \text{Fe} > \text{Cr} > \text{Pb} > \text{Zn} > \text{Ni} > \text{Cu} > \text{As} > \text{Cd}$. The analytical data show that although the concentrations of Pb and Fe in topsoils are much higher than their respective values in subsoils, there is no significant difference in Al concentration of topsoils compared with subsoils. The highest concentrations of As (>100 mg/kg), Cd (0.6 mg/kg), Cu (124 mg/kg), Fe (>10%) and Zn (122 mg/kg) were detected in the sample taken from the filtration cake depot of Ehya-Sepahan Company. Among the studied elements, Pb, As, Cu, Fe and Cd have the highest variation coefficients.

The average values of the enrichment factor and pollution index showed that Cr, As and Fe are the most enriched elements in the topsoils; however, As and Fe are the most enriched elements in the subsoils. It worth to mention that even in the case of elements with less intensity of contamination, relatively high enrichment factor values are observed in some sampling sites such as placer area of Ehya-Sepahan Company and the waste rock piles. However, the ecological risk of most elements in the study area is low and except for the three soil samples collected near the placer area, other sampling sites are in the low risk class. The results of the risk assessment revealed that the hazard quotient value for all target elements through ingestion, inhalation and dermal contact is higher in children than in adults.

However, the value of total hazard index is less than 1 for all the studied elements through ingestion, inhalation and dermal contact, which implies that there is no non-carcinogenic risks in the study area. Based on the principal component analysis, the main reason for the classifying the studied elements in various components is the role of some hot spots in increasing the concentration of elements around the source. For example, the highest

concentration of Fe was observed in three samples collected from the south of the industrial complex, adjacent to the tailing pond of Ehya-Sepahan and the waste rock piles of the Sanabad Comprehensive Development Industrial and Mining Company. This may also lead to the placement of these three samples in the same branch of cluster analysis.

Table 1. Statistical summary of heavy metal concentration in soil samples

Element	Average	Median	Std. Deviation	Skewness	Min	Max	VC	World-Soil Average	Average Topsoil	Average Subsoil
Al (%)	6.00	6.15	1.23	-1.92	1.13	8.25	0.21	7.101	5.51	6.72
As (mg/kg)	16.51	13.20	13.33	5.62	7.50	>100	0.81	7.202	13.17	15.40
Cd (mg/kg)	0.21	0.20	0.09	1.89	<0.1	0.60	0.40	0.352	0.19	0.20
Cr (mg/kg)	102.30	104.00	17.45	-0.44	47.00	148.00	0.17	70	104.30	102.19
Cu (mg/kg)	35.32	32.00	16.15	4.19	23.00	124.00	0.46	23	32.21	34.42
Fe (%)	4.50	3.68	1.96	2.06	2.89	>10	0.44	3.501	5.04	3.56
Ni (mg/kg)	38.72	38.00	9.29	0.96	12.00	75.00	0.24	21	36.39	42.80
Pb (mg/kg)	85.43	17.00	360.50	6.44	7.00	2451.00	4.22	32	138.39	35.71
Zn (mg/kg)	81.74	78.00	12.19	1.43	61.00	122.00	0.15	90	79.04	83.04

Conclusions

In general, considering the mineralized nature of the study area and the presence of natural anomalies, the enrichment of most of the elements in soil of the region is expected. However the placer mining can be considered as a probable reason for negligible difference in the concentration of target metals in topsoils and subsoils. On the other hand, despite the natural soil enrichment of Fe, mining and mineral





processing activities which enhance the rate of dust production in the study area may lead to a significant enrichment of topsoil samples. Moreover, considering the semi-arid climate of the study area the transportation of heavy metals through blowing dusts may escalate the risk of soil contamination even in distant areas and can impose negative health risks on the mine workers and local residents. Therefore, it is of crucial importance to

monitor the concentration of pollutants on a regular basis.

References

- Aqanbati, Seyyed Ali., 2004. Geology of Iran, Geological Organization of the country.
- Chabukdhara, M., Nema, A.K., 2012. Assessment of heavy metal contamination in Hindon River sediments: A chemometric and geochemical approach, *Chemosphere*, NO. 87, pp. 945-953.
- Golmohammadi, A., Karimpour, M.H., Malekzadeh Shafaroudi, A., Mazaheri, S.A., 2015. Alteration-mineralization, and radiometric ages of the source pluton at the Sangan iron skarn deposit, northeastern Iran, *Ore Geolgr Review*, NO. 65, pp. 545-563.
- Irshad M.K., Ibrahim M., Noman A., Shang J., Mahmood A., Mubashir M., Khoo K.S., Ng H.S., Show P.L., 2022. Elucidating the impact of goethite-modified biochar on arsenic mobility, bioaccumulation in paddy rice (*Oryza sativa* L.) along with soil enzyme activities, *Process Safety and Environmental Protection*, 160, pp. 958-967.
- Kabata-Pendias, A., & Mukherjee, A.B., 2007. Trace elements from soil to human. Springer Science & Business Media.
- Mei, Z., Cogswell, E., Looker, A., Pfeiffer, Ch., Cusick, S., Lacher, D., Grummer-Strawn, L., 2011. Assessment of iron status in US pregnant women from the National Health and Nutrition Examination Survey (NHANES), 1999-2006, Free article, 21430118.
- Mohiuddin, K. M., Ogawa, Y., Zakir, H., Otomo, K., Shikazono, M., 2011. Heavy metals contamination in water and sediments of an urban river in a developing country, *International Journal of Environmental Science & Technology*, NO. 8, pp. 723-736.
- Ran H., Guo Z., Yi L., Xiao X., Zhang L., Hu Z., Li C., Zhang Y., 2021. Pollution characteristics and source identification of soil metal(loid)s at an abandoned arsenic-containing mine, China, *Journal of Hazardous Materials*, 413, Article 125382.
- USEPA (US Environmental Protection Agency), "Supplemental guidance for developing soil screening levels for superfund sites", OSWER, (2001) 9355.4-24.
- Xiang M., Li Y., Yang J., Lei K., Li Y., Li F., Zheng D., Fang X., Cao Y., 2021. Heavy metal contamination risk assessment and correlation analysis of heavy metal contents in soil and crops, *Environmental Pollution*, 278, Article 116911.
- Yang, H., Li, H., M. Wu., Zhang, Zh., Li. L., Wan, Sh., 2011. Plant community responses to nitrogen addition and increased precipitation: the importance of water availability and species traits, *Wildlife Biology*, NO. 17, pp. 2936-2944.
- Zheng, N., Liu, J., Wang, Q., Liang, Z., 2010. Health risk assessment of heavy metal exposure to street dust in the zinc smelting district, Northeast of China, *Science of the Total Environment*, 408, 726-733.

CRedit authorship contribution statement

 Zahra Yaftian	Investigation, Writing - Original Draft
 Ata Shakri	Conceptualization, Supervision, Project administration, Resources, Data Curation, Validation, Funding acquisition
 Mehrddad Hadipourdeshal	Conceptualization, Supervision, Project administration, Resources, Validation, Funding acquisition
 Meisam Rastegari Mehr	Methodology, Software, Writing -Review & Editing, Validation, Formal analysis, Resources



بررسی آلودگی فلزات سنگین در خاک محدوده معدنی سنگان، استان خراسان رضوی

زهرا یافتیان^۱، عطا شاکری^۲، مهرداد هادی پوردهشال^۳، میثم رستگاری مهر^{۴*}

۱. کارشناسی ارشد، گروه زمین شناسی کاربردی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه خوارزمی، کرج، ایران
۲. استاد، گروه زمین شناسی کاربردی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه خوارزمی، کرج، ایران
۳. دانشیار، گروه علوم گیاهی، دانشکده علوم زیستی، دانشگاه خوارزمی، کرج، ایران
۴. استادیار، گروه زمین شناسی کاربردی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه خوارزمی، کرج، ایران

اطلاعات مقاله	چکیده
تاریخچه مقاله دریافت: ۱۴۰۲/۰۹/۱۴ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۰/۰۱	استخراج معادن یک فعالیت ضروری برای توسعه کشورهاست، اما تأثیرات مستقیم و غیرمستقیم بر مناطق مورد بهره‌برداری و اطراف آن‌ها دارد. معدن سنگ‌آهن سنگان یکی از بزرگ‌ترین معادن سنگ‌آهن در خاورمیانه است که به صورت روباز استخراج می‌شود. هدف از انجام این مطالعه بررسی آلودگی خاک به فلزات سنگین در محدوده معدنی سنگان است. در این پژوهش تعداد ۴۴ نمونه از خاک‌های منطقه معدنی سنگان (خاک سطحی و عمقی) برداشته شده و آلودگی خاک پس از تجزیه با دستگاه ICP-MS، با استفاده از ضرایب زمین‌شیمیایی و تحلیل‌های آماری ارزیابی شد. توصیف آماری نتایج نشان داد که سرب با میانگین ۱۳۸/۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم بیشترین و کادمیم با میانگین ۰/۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم کمترین غلظت را در خاک‌های سطحی دارند. همچنین کروم با میانگین ۱۰۲/۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم بیشترین و کادمیم با میانگین ۰/۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم کمترین غلظت را در خاک‌های عمقی، در میان عناصر مورد مطالعه داشتند. میانگین غلظت عناصر آرسنیک، کروم و آهن در منطقه، بیشتر از غلظت آنها در ترکیب خاک میانگین جهانی است. در بین عناصر، سرب در دو ایستگاه با ضریب غنی‌شدگی ۱۴۹ و ۲۳/۸ دارای غنی‌شدگی خیلی زیاد و شدید است. نتایج نشان داد که از نظر شدت آلودگی بجز به صورت نقطه‌ای و در مناطق خاص، آلودگی و خطر اکولوژیکی زیادی خاک منطقه را تهدید نمی‌کند. مهم‌ترین این نقاط شامل واحدهای برداشت پلاستر و حوضچه باطله شرکت احیاسپاهان، و نیز محل انباشت ضایعات شرکت صنعتی و معدنی توسعه فراگیر سناباد است.
واژه‌های کلیدی آلودگی، فلزات سنگین، خاک، معدن کاری، سنگان.	



مقدمه

می‌توانند از طریق فرآیندهای طبیعی، از جمله هوازدگی واحدهای سنگی، فوران آتشفشانی، و فعالیت‌های انسانی، مانند استخراج سنگ معدن، تخلیه فاضلاب، و استفاده بیش از حد از آفت‌کش‌ها و کودها به خاک وارد شوند (Irshad et al., 2022).

خاک آلوده به فلزات سنگین ناشی از صنعتی شدن سریع و شهرنشینی به یک تهدید جدی برای سلامت عمومی و محیط‌زیست در سراسر جهان تبدیل شده است (Xiang et al., 2021). فلزات

DOI <http://doi.org/10.22034/KJES.2023.9.2.104841>

*نویسنده مسئول: میثم رستگاری مهر rastegar.m@khu.ac.ir

استناد به این مقاله: یافتیان، ز.، شاکری، ع.، هادی پوردهشال، م.، رستگاری مهر، م. (۱۴۰۲) بررسی آلودگی فلزات سنگین در خاک محدوده معدنی سنگان، استان خراسان رضوی. مجله علوم زمین خوارزمی. جلد ۹، شماره ۲، صفحه ۲۶ تا ۴۶.



<http://doi.org/10.22034/KJES.2023.9.2.104841>

افزایش غلظت برخی از فلزات سنگین بیشتر از حد نرمال در منطقه، بیماری‌های ناشی از آلودگی زیست-محیطی مانند فشار خون بالا و ضربان قلب که بر سیستم قلبی عروقی انسان تأثیر می‌گذارند در منطقه مورد مطالعه افزایش یافته است. هدف اصلی از انجام این پژوهش، ارزیابی شدن آلودگی خاک منطقه معدنی سنگان به فلزات سنگین منتخب است.

مواد و روش‌ها

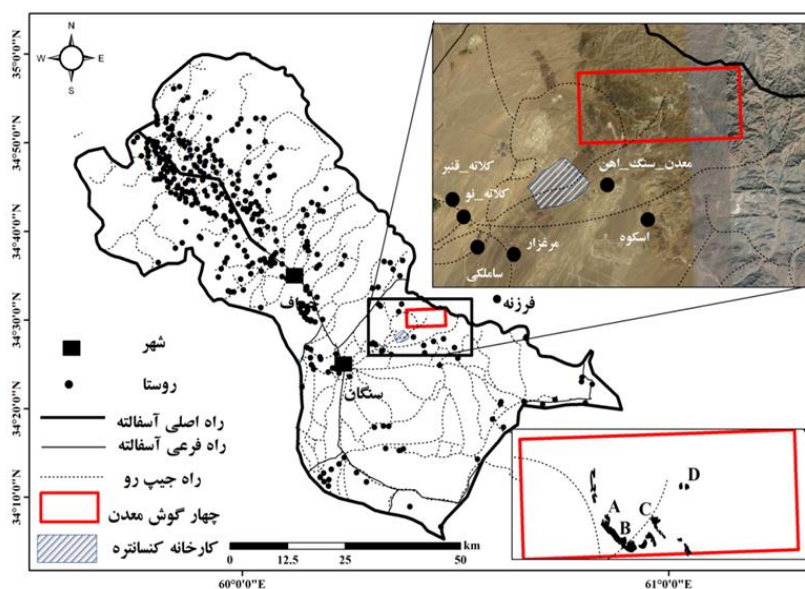
محدوده مطالعاتی

مجموعه معادن سنگ آهن سنگان در استان خراسان رضوی، ۳۰۰ کیلومتری جنوب شرقی مشهد و ۴۰ کیلومتری جنوب شرقی خواف واقع شده است (شکل ۱). این پهنه، خاستگاه کانی‌سازی تیپ اسکارن آهن است (Karimpour et al., 2007). این معدن بزرگ‌ترین معدن آهن غرب آسیا با گنجایش بیش از هزار میلیون تن و عیار آهن ۵۴ درصد به شمار می‌رود (Golmohammadi et al., 2015). معدن سنگان به عنوان بخشی از کمربند آتشفشانی-نفوذی تکنار از منظر زمین‌شناسی و مواد معدنی مورد توجه قرار دارد. این کمربند ماگمایی با روند شرقی-غربی در شمال گسل درونه قرار دارد و تا افغانستان ادامه یافته است. کانی‌سازی در این معدن از نوع اسکارنی بوده و جزء کمربند آتشفشانی-پلوتونیک خواف-درونه قرار می‌گیرد (Aqanabati, 2004). چندین کارخانه تولید کنسانتره سنگ آهن در شهرستان خواف با توان تولید سالانه بیش از ۸ میلیون تن کنسانتره سنگ آهن در حال فعالیت است. در نهایت باطله تولیدی در

میان این فعالیت‌ها، عملیات معدن‌کاری به عنوان یکی از منابع مهم آلودگی خاک به فلزات سنگین در نظر گرفته می‌شود (Ran et al., 2021). منطقه معدنی سنگان با کنسارها و آنومالی‌های متعدد، یکی از کمربندهای اصلی سنگ‌آهن ایران است (Golmohammadi et al., 2015). بررسی وضعیت منطقه خواف و همچنین شرایط معدن سنگ آهن سنگان و صنایع اطراف نشان می‌دهد که این منطقه مشکلات زیست‌محیطی فراوانی را ایجاد کرده است. مهم‌ترین مشکلات زیست‌محیطی را می‌توان تحت تأثیر قرار گرفتن خاک دانست که در این راستا شرایط آب و هوایی منطقه نظیر بادخیزی و کمبود بارش و نیمه‌خشک بودن منطقه نیز در ایجاد این مشکلات بسیار تأثیرگذار بوده است. از این رو، باید مشکلات و آلودگی‌های ایجاد شده به طور دقیق‌تر شناسایی و اقدامات پیشگیرانه لازم اندیشیده و اجرا شود. منابع اصلی آلودگی خاک در این منطقه شامل نفوذ فاضلاب حاصل از صنایع به خاک، ضایعات حاصل از فعالیت ساخت و ساز، ریزش آهک بر روی خاک به دلیل خردایش آهک، نفوذ ترکیبات گندله به خاک در صورت دپوی آن بر روی خاک و ریزش مواد بر روی خاک در اثر عملکرد نوار نقاله‌ها، چرخش رول‌ها در رولر پرس، رولر فیدر، رولر کلاسیفایر و تراولینگ گریت است (Shakeri et al., 2019). در مطالعه‌ای که خشتابه و همکاران (Kheshtabeh et al., 2022) به منظور بررسی کمی اثر فلزات سنگین ناشی از معدن‌کاری سنگ آهن بر سلامت ساکنان شهرستان خواف انجام دادند، نشان داده شد که با

اداره هواشناسی شهرستان خواف متوسط دمای ماهانه شهرستان در دوره ذکر شده معادل $10/3$ درجه سانتی‌گراد در دی ماه و $31/2$ درجه سانتی‌گراد در تیرماه مشاهده می‌شود، این شرایط نشان دهنده نوسان دمایی شدیدی در طول سال است (Behjati, 2013). به طور کلی منطقه سنگان خواف بادخیز بوده و در بیشتر ایام سال باد در جهت جنوب‌غرب جریان دارد. در نیمه اول سال، باد در جهت شمال-شرق تا جنوب‌غرب با سرعت تقریبی ۹۱ تا ۶۱ کیلومتر بر ساعت و در نیمه دوم سال، باد در جهت-های مختلف و با سرعت تقریبی ۵۱ کیلومتر بر ساعت می‌وزد (Hadipourdeshal, 2017).

کارخانه تولید کنسانتره آهن سنگان شامل ۲۱ درصد آهن، ۶ درصد اکسید آهن، ۱۰ درصد گوگرد و کمتر از ۱ درصد اکسید سیلیس است (Hadipourdeshal, 2017). با توجه به فعالیت واحدهای معدنی و فراوری متعدد در محدوده مطالعاتی، مجموعه‌ای از منابع در انتشار آلودگی در منطقه نقش دارد. شهرستان خواف از لحاظ اقلیمی دارای آب و هوای خشک و کویری با تابستان‌های گرم و خشک و زمستان‌های سرد و نسبتاً خشک می‌باشد. براساس داده‌های ایستگاه هواشناسی خواف که در سال ۱۳۸۵ تأسیس شده‌است، متوسط دمای سالیانه در دوره سه ساله ۱۳۸۵ تا ۱۳۸۷، $18/3$ درجه سانتی‌گراد گزارش شده‌است. بر اساس اطلاعات



شکل ۱- موقعیت کارخانه کنسانتره، محدوده معدن و آنومالی‌های سنگان

Fig. 1. Location of the concentrate factory, the mining area and Sanganeh anomalies

نمونه برداری و تجزیه نمونه‌ها

در این پژوهش خاک‌های منطقه معدنی سنگان به دو صورت سطحی و عمقی بررسی شدند. نمونه- برداری از خاک در اردیبهشت ماه ۱۳۹۸ با استفاده از بیلچه پلاستیکی صورت گرفت. هدف اصلی از نمونه برداری به صورت سطحی-عمقی، تعیین اثر فعالیت‌های منطقه بر میزان آلودگی، و عمق نفوذ

فلزات سنگین در خاک منطقه است. در نمونه- برداری از خاک، سعی بر این بود که تمام واحدهای صنعتی و معدنی موجود در محدوده مطالعاتی پوشش داده شود. با توجه به تعدد عوارض موجود، در مجموع تعداد ۴۴ نمونه خاک برداشته شد (شکل ۲) که از این تعداد ۲۳ نمونه خاک سطحی (۰ تا ۵ سانتی‌متر) و ۲۱ نمونه عمقی (۲۰ تا ۲۵ سانتی‌متر) است.

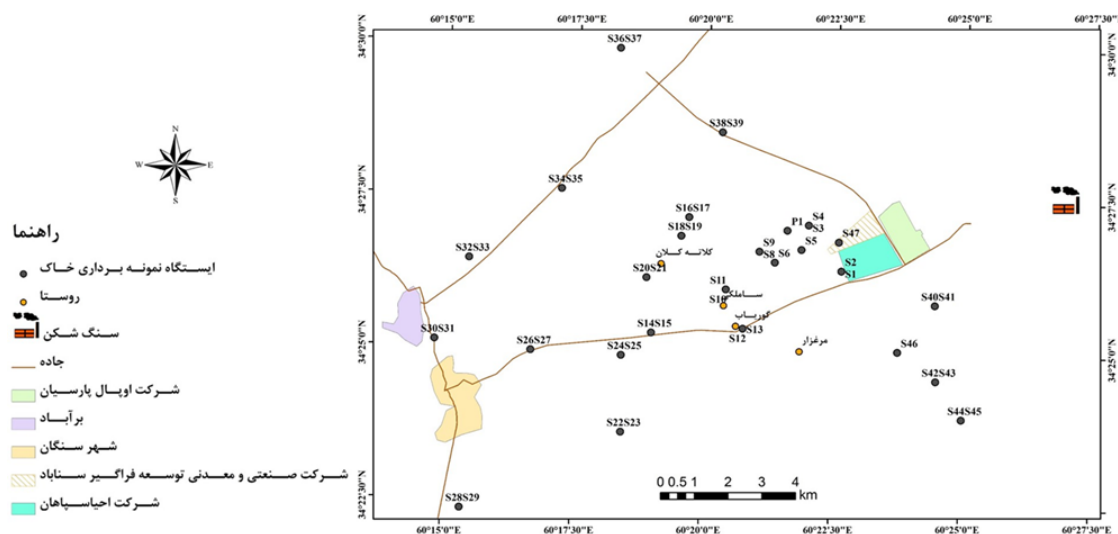


Fig. 2. Location of soil sampling points

شکل ۲. موقعیت نقاط نمونه برداری از خاک

ضریب غنی‌شدگی روشی مؤثر برای ارزیابی غلظت آلاینده‌های فلزی در خاک است (Mohiuddin et al., 2011) که از رابطه ۱ به دست می‌آید:

$$EF = \frac{\left(\frac{X}{RE}\right)_{sample}}{\left(\frac{X}{RE}\right)_{baseline}} \quad (1)$$

در این رابطه $\left(\frac{X}{RE}\right)_{sample}$ نسبت غلظت عنصر مورد نظر به عنصر مرجع (در این مطالعه آلومینیم) در نمونه و $\left(\frac{X}{RE}\right)_{baseline}$ نسبت غلظت عنصر مورد نظر به عنصر مرجع در نمونه زمینه (میانگین غلظت در خاک‌های جهانی) (Kabata-Pendias and Mukherjee, 2007) است. بر مبنای ضریب غنی‌شدگی، خاک‌ها را می‌توان در ۵ گروه

نمونه‌های خاک در کیسه‌های پلاستیکی قرار گرفته و جهت آماده‌سازی به آزمایشگاه ژئوشیمی دانشکده علوم زمین دانشگاه خوارزمی منتقل شدند. در آزمایشگاه نمونه‌ها در دمای اتاق خشک شده و پس از همگن شدن با استفاده از غربال ۲۲۰ مش ذرات ریزتر از ۶۳ میکرومتر آن جدا شده و جهت تجزیه با دستگاه ICP-MS به آزمایشگاه زرآما ارسال شدند. در آزمایشگاه، نمونه‌ها با استفاده از ۳ اسید قوی، HCl، HNO₃ و HF هضم شده و محلول به دست آمده، آنالیز شد.

روش‌های زمین‌شیمیایی تحلیل داده‌ها
ضریب غنی‌شدگی

شاخص آلودگی تنها عناصری مدنظر قرار می‌گیرند که تا حدودی در منطقه غنی‌شدگی نشان می‌دهند.

شاخص خطر بالقوه بوم‌شناختی

برای ارزیابی خطر بوم‌شناختی فلزات سمناک، از شاخص خطر بالقوه بوم‌شناختی (Potential ecological risk) استفاده می‌شود. این روش اولین بار توسط هاکنسون (Hakanson 1980) ارائه شده است و توسط روابط زیر محاسبه می‌گردد:

$$C_r^i = C_s^i / C_n^i \quad (2)$$

$$E_r^i = T_r^i \times C_r^i \quad (3)$$

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

در این روابط C_r^i شاخص آلودگی هر فلز، C_n^i غلظت فلز در نمونه، C_s^i غلظت فلز در نمونه زمينه، E_r^i ضریب خطر بالقوه بوم‌شناختی، T_r^i ضریب پاسخ فلز سنگین است که توسط هاکنسون برای عناصر مختلف تعیین شده ($Zn=1 < Cr=2 < Cu=Ni=Pb=5 < As=10 < Cd=30 < Hg=40$) و RI شاخص خطر بالقوه بوم‌شناختی برای آلودگی کلی فلزی است. رده‌بندی RI و E_r^i در جدول ۲ ارائه شده است (Mei et al., 2011).

Table 2. Degrees of potential ecological risk

	کم	متوسط	قابل توجه	زیاد	شدیداً زیاد
E_r^i	<30	30-60	60-120	120-240	240<
RI	<110	110-220		220-440	440<

خطر (HI) استفاده می‌شود. محاسبات بر اساس روش استاندارد سازمان حفاظت محیط زیست ایالات متحده امریکا (USEPA, 2001) انجام شد. اگر برای هر یک از عناصر بالقوه سمی انتخابی

به شرح جدول ۱ رده‌بندی کرد (Chabukdhara and Nema, 2012).

جدول ۱- رده‌بندی ضریب غنی‌شدگی برای خاک

Table 1. Enrichment Factor classification for soil

رده	ضریب غنی‌شدگی
>2	کمبود یا غنی‌شدگی کم
2-5	غنی‌شدگی متوسط
5-20	غنی‌شدگی قابل توجه
20-40	غنی‌شدگی خیلی زیاد
<40	شدیداً غنی‌شده

شاخص آلودگی (PI)

برای ارزیابی درجه آلودگی خاک به فلزات سنگین می‌توان از شاخص آلودگی (PI) نیز استفاده کرد. این شاخص با تقسیم کردن غلظت فلز در نمونه به غلظت آن در زمینه (در این مطالعه ترکیب میانگین خاک‌های جهانی) محاسبه می‌شود (Yang et al., 2011). شاخص آلودگی کمتر از ۱ نشانگر غیر آلوده بودن نمونه، بین ۱ و ۲ بیانگر آلودگی کم، بین ۲ و ۳ نشان‌دهنده آلودگی متوسط، بین ۳ تا ۵ بیانگر آلودگی شدید و بیش از ۵ مبین آلودگی بسیار شدید است. برای محاسبه

جدول ۲- درجات خطر بالقوه بوم‌شناختی

ارزیابی ریسک سلامت (Health Risk) Assessment

برای تعیین خطر سلامتی عناصر بالقوه سمی از سه مسیر بلع، جذب پوستی و تنفس ذرات خاک در انسان از خارج قسمت خطر (HQ) و شاخص

میانگین غلظت عناصر آرسنیک، کروم و آهن در منطقه، بیشتر از میانگین جهانی غلظت آن‌ها در خاک است. همچنین غلظت آلومینیم، مس و نیکل تقریباً مشابه با میانگین جهانی است در حالی که میانگین غلظت کادمیم و روی در خاک منطقه مطالعاتی کمتر از میانگین جهانی است. لازم به ذکر است که تمام عناصر مورد مطالعه حداقل در یک ایستگاه نمونه‌برداری غلظت بیش از میانگین جهانی دارند. به طور کلی غلظت عناصر در خاک منطقه از روند کاهشی

Al>Fe>Cr>Pb>Zn>Ni>Cu>As>Cd

پیروی می‌کند. مقایسه میانگین غلظت عناصر در نمونه‌های خاک سطحی و عمقی نیز نشان داد که سرب و آهن در خاک‌های سطحی غلظت بیشتری دارند در حالی که آلومینیم غلظت تقریباً مشابه داشته و سایر عناصر تفاوت چندانی نشان نمی‌دهند. بیشترین غلظت عناصر آرسنیک (>100 mg/kg)، کادمیم (0.6 mg/kg)، مس (124 mg/kg)، آهن ($>10\%$) و روی (122 mg/kg) در نمونه برداشته شده از محل دپوی کیک فیلتراسیون مربوط به شرکت احیاسپاهان مشاهده شد. غلظت بالاتر از ده درصد آهن در چند نمونه دیگر از جمله خاک سطحی اطراف حوضچه احیا سپاهان (S5)، جنوب مجتمع شرکت صنعتی و معدنی توسعه فراگیر سناباد، نیز اندازه‌گیری شد که با توجه به ماهیت معدنی منطقه و فراوری آهن، طبیعی است. بیشینه غلظت کروم (148 mg/kg) در نمونه S34 (خاک سطحی-جنوب جاده خواف-تایباد) اندازه‌گیری شد و غلظت‌های زیاد این عنصر در برخی نمونه‌های دیگر مانند S22 (شرق شهر سنگان) و

مقدار HQ کمتر از یک شود، آن عنصر خطر قابل-توجهی از نظر سمی بودن ندارد. نسبت‌های بیش از یک برای HQ نشان‌دهنده احتمال وجود پتانسیل خطر است. شاخص خطر (HI) مجموع مقادیر HQ است و به معنی مجموع خطر غیرسرطان‌زای عناصر از طریق سه مسیر در معرض قرارگیری است. مقدار شاخص خطر کمتر از ۱، هیچ نوع خطر غیرسرطان‌زا را نشان نمی‌دهد در حالی که مقادیر بیش از ۱ نشان‌دهنده احتمال اثرات سوء بر سلامت است (Zheng et al., 2010).

تحلیل آماری

در این مطالعه از تحلیل مؤلفه‌های اصلی و تحلیل خوشه‌ای با استفاده از نرم افزار SPSS-19 برای تحلیل بهتر داده‌ها استفاده شد. مزیت تحلیل مؤلفه اصلی این است که تعداد زیاد عناصر را می‌توان به تعداد اندکی متغیر ناهمبسته کاهش داد (Moore et al., 2005). همچنین آنالیز خوشه‌ای سلسله مراتبی (Hierarchical Cluster Analysis) فاصله بین نمونه‌ها را بررسی می‌کند. شبیه‌ترین نقاط در گروهی رده‌بندی می‌شوند که یک خوشه را تشکیل می‌دهد و این فرآیند تکرار می‌شود تا همه نقاط در یک خوشه قرار گیرند. نتیجه به دست آمده را می‌توان در یک طرح دو بعدی به نام دندروگرام نشان داد (Chabukdhara et al., 2012).

نتایج و بحث

آلودگی فلزات سنگین در خاک

خلاصه آماری نتایج تجزیه نمونه‌های خاک و غلظت میانگین فلزات در خاک‌های جهانی در جدول ۳ آورده شده است. نتایج نشان می‌دهد که

سرب بیشترین ضریب تغییر را در نمونه‌های مختلف دارد و پس از آن آرسنیک، مس، آهن و کادمیم تغییرات بیشتری را نسبت به سایر عناصر نشان می‌دهند. بر اساس ضریب تغییرات و همچنین میزان چولگی می‌توان نتیجه گرفت که این عناصر، در محدوده مطالعاتی توزیع غیرنرمال داشته و به عبارتی دارای آنومالی هستند.

S32 (شمال جاده خواف-تایباد) نیز مشاهده شد. نمونه شماره S22 بیشترین غلظت عنصر سرب (2451 mg/kg) را نیز نشان داد. این ایستگاه مجاور محل برداشت آهن پلاستی شرکت احیاسپاهان قرار دارد. غلظت بالای سرب (398 mg/kg) در سایر نمونه‌های سطحی و عمقی خاک برداشته شده از مجاور جداکننده و پلاستر شرکت احیا سپاهان (S24) نیز مشاهده شد. از میان عناصر مورد مطالعه،

جدول ۳- خلاصه آماری غلظت فلزات سنگین در نمونه‌های خاک

Table 3. Statistical summary of heavy metal concentration in soil samples

Element	Average	Median	Std. Deviation	Skewness	Min	Max	VC	World-Soil Average	Average Topsoil	Average Subsoil
Al (%)	6	6.1	1.2	-1.9	1.1	8.2	0.2	7.1	5.5	6.7
As (mg/kg)	16.5	13.2	13.3	5.6	7.5	>100	0.8	7.2	13.2	15.4
Cd (mg/kg)	0.2	0.2	0.1	1.9	<0.1	0.6	0.4	0.3	0.2	0.2
Cr (mg/kg)	102.3	104	17.4	-0.4	47	148	0.2	70	104.3	102.2
Cu (mg/kg)	35.3	32	16.1	4.2	23	124	0.5	23	32.2	34.4
Fe (%)	4.5	3.7	2	2.1	2.9	>10	0.4	3.5	5.1	3.6
Ni (mg/kg)	38.7	38	9.3	1	12	75	0.2	21	36.4	42.8
Pb (mg/kg)	85.4	17	360.5	6.4	7	2451	4.2	32	138.4	35.7
Zn (mg/kg)	81.7	78	12.2	1.4	61	122	0.1	90	79.1	83.1

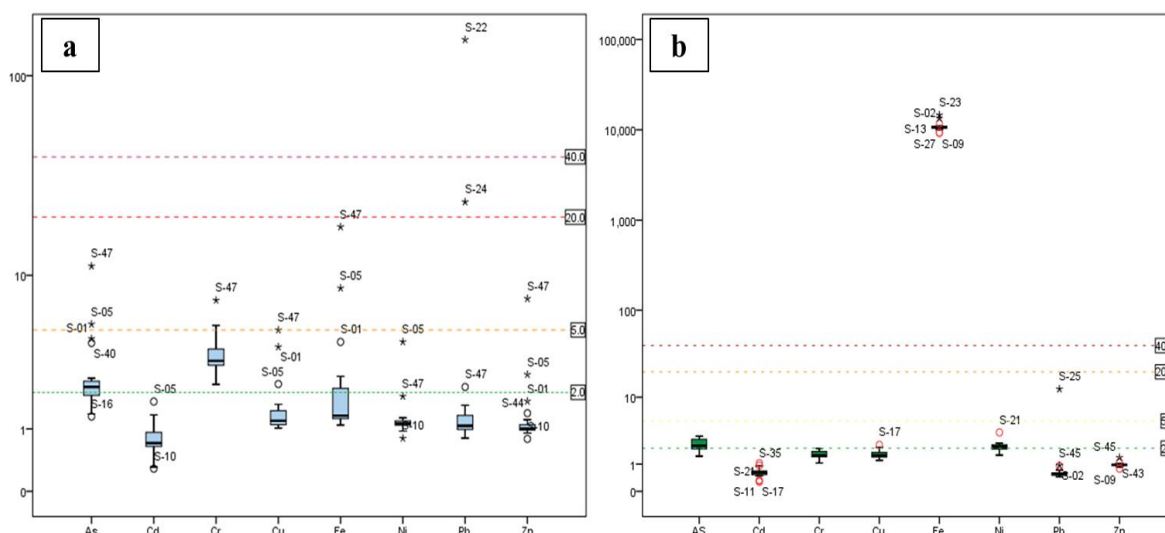
۱۳ درصد نمونه‌ها غنی‌شدگی بین ۲ تا ۵ داشته و در رده غنی‌شدگی متوسط قرار می‌گیرند. همچنین نیکل و روی نیز حداقل در یک ایستگاه نمونه- برداری غنی‌شدگی متوسط دارند. در میان نمونه- های برداشته شده از سطح خاک منطقه، نمونه S47 که از محوطه انباشت پسماند شرکت برداشته شده است، بیشترین مقدار ضریب غنی‌شدگی را نشان می‌دهد و بیشتر عناصر در این نقطه غنی‌شدگی قابل توجه دارند.

تعیین درجه آلودگی نمونه‌های خاک ضریب غنی‌شدگی

نمودار جعبه‌ای ضریب غنی‌شدگی فلزات سنگین در نمونه‌های خاک سطحی و عمقی در شکل ۳ آورده شده است. عناصر کادمیم، مس، نیکل و روی در تمام ایستگاه‌های نمونه‌برداری در نمونه- های خاک عمقی ضریب غنی‌شدگی کمتر از ۲ داشته و در رده بدون غنی‌شدگی قرار می‌گیرند. این عناصر در بیشتر نمونه‌های خاک سطحی نیز وضعیت مشابهی داشته و فاقد غنی‌شدگی هستند با این تفاوت که آرسنیک و مس به ترتیب در ۶۰ و

دو نمونه خاک سطحی S22، S24 و یک نمونه خاک عمقی S25 که از اطراف منطقه برداشت پلاسر شرکت احیاسپاهان برداشته شده‌اند، به ترتیب غنی‌شدگی ۱۴۹، ۲۳/۸ و ۲۰/۱ نشان می‌دهد که بیانگر غنی‌شدگی خیلی بالا و شدید است.

در مقایسه با عناصر فوق، آرسنیک، کروم، آهن و تا حدودی، سرب، در خاک سطحی و عمقی غنی-شدگی نسبتا بیشتری دارند. به عنوان مثال کروم در ۹۵ درصد از ایستگاه‌های نمونه‌برداری خاک سطحی و عمقی غنی‌شدگی متوسط دارد. سرب در



شکل ۳- نمودار جعبه‌ای ضریب غنی‌شدگی عناصر در (a) نمونه‌های خاک‌های سطحی و (b) خاک‌های عمقی
Fig. 3. Box plot of elements' enrichment factor in a) top soil samples and b) sub soil samples

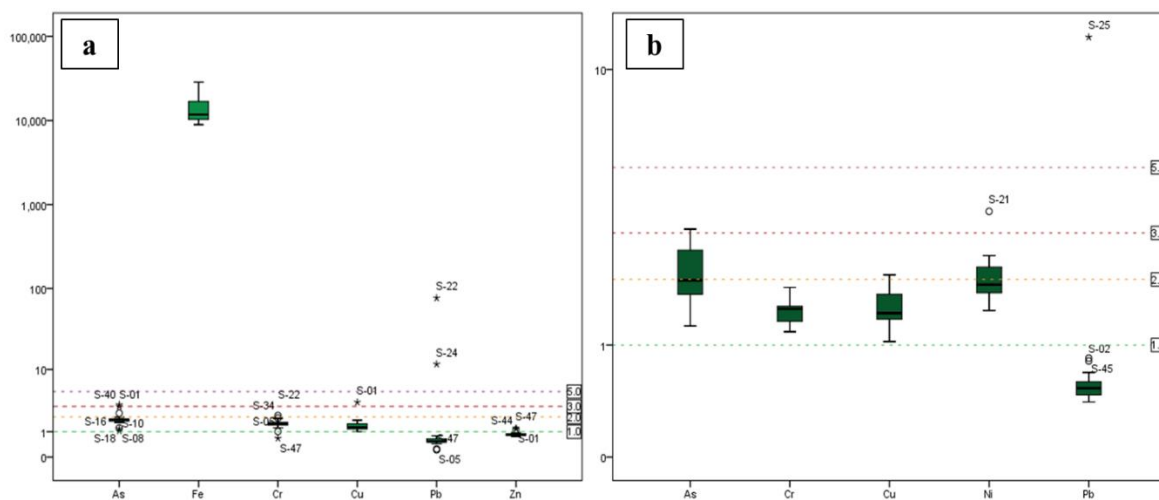
از محاسبه ضریب غنی‌شدگی است. آرسنیک، کروم، مس، سرب و روی در بیشتر ایستگاه‌های نمونه‌برداری خاک سطحی ضریب آلودگی کمتر از یک داشته و شرایط غیرآلوده نشان می‌دهند. این عناصر در تعداد کمی از نمونه‌ها نیز آلودگی کم (PI بین ۱ تا ۲) دارند. در این میان، سرب در نمونه‌های برداشته شده از شرق شهر سنگان و پلاسر شرکت احیاسپاهان آلودگی بسیار شدید را نشان می‌دهد. همچنین کروم و آهن به ترتیب در ۳۹ و ۱۳ درصد از ایستگاه‌های نمونه‌برداری خاک سطحی آلودگی متوسط نشان می‌دهند. در خاک عمقی منطقه مس، کروم و سرب در بیشتر ایستگاه‌های نمونه-برداری ضریب آلودگی کم دارند. در این میان، سرب در نمونه محدوده پلاسر شرکت احیاسپاهان با

شاخص آلودگی (PI)

برای محاسبه شاخص آلودگی تنها عناصری مدنظر قرار می‌گیرند که تا حدودی در منطقه غنی-شدگی نشان می‌دهند. بر این اساس در خاک سطحی عناصر آرسنیک، کروم، مس، آهن، سرب و روی، و در نمونه‌های خاک عمقی عناصر آرسنیک، کروم، مس، نیکل و سرب در محاسبه این شاخص‌ها استفاده شدند. همچنین از غلظت عناصر در خاک-های جهانی به عنوان مرجع استفاده شد. شکل ۴ نتایج محاسبه شاخص آلودگی را برای خاک‌های سطحی و عمقی منطقه نشان می‌دهد. براساس نتایج، این شاخص برای عناصر مختلف نسبتا متفاوت است و به عبارتی موید نتایج به دست آمده

می‌دهند. همچنین آرسنیک در ۹ نمونه آلودگی کم و در ۹ نمونه آلودگی متوسط دارد، در حالی که دو ایستگاه نمونه‌برداری که از شرق و جنوب شهر سنگان برداشته شده‌اند آلودگی شدید این عنصر اندازه‌گیری شد.

شاخص آلودگی ۱۸، آلودگی بسیار شدید را نشان می‌دهد. کروم و نیکل در بیش از ۶۰ درصد ایستگاه‌های نمونه‌برداری خاک عمقی شاخص آلودگی بین ۱ تا ۲ داشته و آلودگی کم دارند. این دو عنصر در برخی نقاط آلودگی متوسط نیز نشان



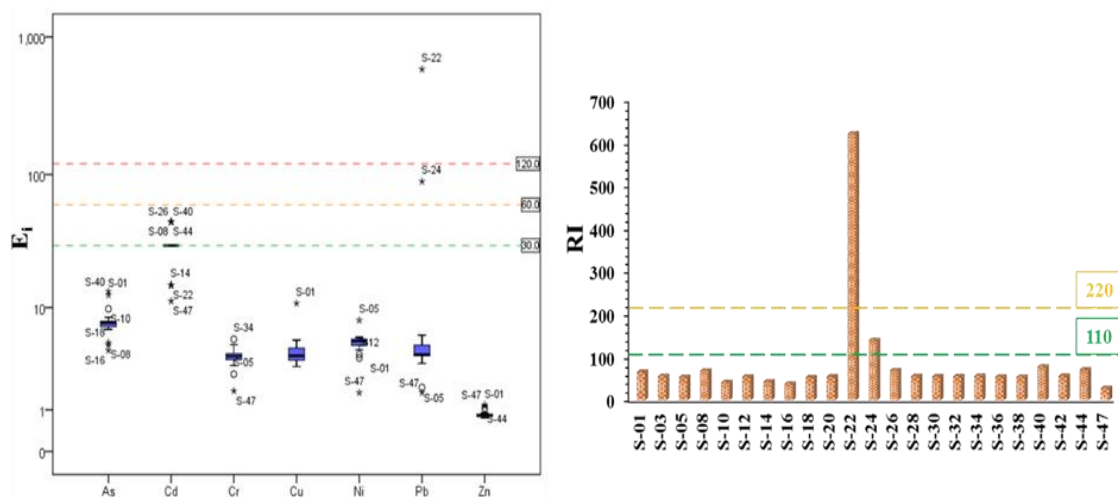
شکل ۴- نمودار شاخص آلودگی نمونه‌های خاک الف) سطحی و ب) عمقی

Fig. 4. Pollution index diagram of a) top soil and b) sub soil samples

شرق سنگان خطر متوسط بوم‌شناختی دارد. خطر متوسط برای این عنصر در سه نمونه خاک عمقی جنوب روستای گوریاب، روستای برآباد و شمال حوضچه باطله شرکت اوپال پارسیان نیز مشاهده شد. محاسبه شاخص خطر نشان داد که جز سه نمونه خاک برداشته شده از اطراف محدوده پلاسر شرکت احیاسپاهان، سایر ایستگاه‌های نمونه‌برداری در رده خطر کم قرار می‌گیرند. عامل اصلی خطر بوم‌شناختی بالای این نمونه‌ها، غلظت بالای عنصر سرب در آن‌هاست.

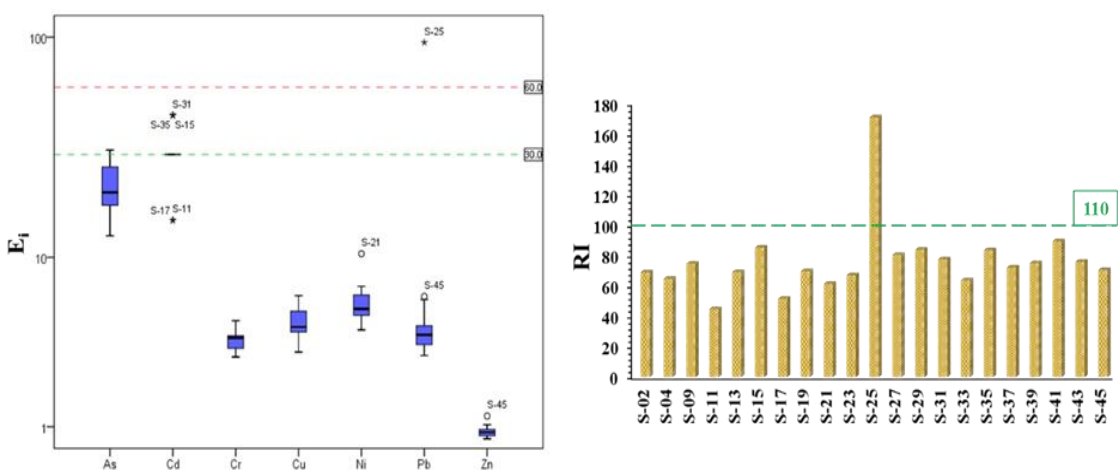
شاخص خطر بالقوه بوم‌شناختی

نتایج شاخص خطر بالقوه بوم‌شناختی برای خاک‌های سطحی و عمقی به ترتیب در شکل‌های ۵ و ۶ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که بیشتر عناصر مورد مطالعه در رده خطر کم بوم‌شناختی ($E < 30$) قرار می‌گیرند. سرب در هر دو نمونه سطحی و عمقی برداشته شده از پلاسر احیاسپاهان در رده خطر قابل توجه بوم‌شناختی قرار می‌گیرد. همچنین کادمیم در شمال حوضچه باطله شرکت اوپال پارسیان، اطراف حوضچه باطله احیاسپاهان و



شکل ۵- نمودار شاخص خطر فلزات و شاخص خطر بالقوه بوم شناختی در نمونه‌های خاک سطحی

Fig. 5. The diagram of metal risk index and potential ecological risk index in topsoil samples



شکل ۶- نمودار شاخص خطر فلزات و شاخص خطر بالقوه بوم شناختی در نمونه‌های خاک عمقی

Fig. 6. Diagram of metal risk index and potential ecological risk index in subsoil samples

ارزیابی ریسک سلامت

مقادیر خارج قسمت خطر (HQ) و شاخص خطر (HI) برای عناصر بالقوه سمی در نمونه‌های خاک سطحی از سه طریق بلع، تماس پوستی و تنفس محاسبه شد و در جدول ۴ ارائه شده است. با توجه به نزدیکی مراکز جمعیتی روستایی و نیز شهر سنگان به محدوده مطالعاتی، این شاخص‌ها برای رده سنی کودکان نیز محاسبه شده است. نتایج نشان می‌دهد که مقدار کل نسبت خطر برای تمام

عناصر انتخابی از طریق بلع، تنفس و تماس پوستی در کودکان بیشتر از بزرگسالان است. مقدار شاخص خطر عناصر مورد مطالعه برای بزرگسالان و کودکان به ترتیب $As > Pb > Cr > Ni > Cu > Zn > Cd$ کاهش پیدا می‌کند. نتایج به دست آمده در بزرگسالان نشان می‌دهد که میانگین مقدار شاخص خطر برای عناصر مس، نیکل، روی، سرب، آرسنیک، کروم و کادمیم کمتر از یک است. این نتایج نشان می‌دهد که هیچ‌کدام از اثرات خطر غیرسرطان‌زایی رخ

نمی‌دهد. محاسبه شاخص خطر در کودکان نشان می‌دهد که مقدار این شاخص از ۳ طریق بلع، تنفس و جذب پوستی برای تمامی عناصر مورد مطالعه کمتر از یک است که هیچ‌کدام از اثرات خطر غیرسرطان‌زایی رخ نمی‌دهد.

جدول ۴- میانگین مقادیر شاخص خطر و خارج قسمت خطر برای نمونه‌های خاک سطحی

Table 4. Average values of HQ and HI for topsoil samples

		As	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
RfD	Oral	3.E-04	1.E-03	3.E-03	4.E-02	2.E-02	4.E-03	3.E-01
	Dermal	1.E-04	1.E-05	6.E-04	1.E-02	5.E-03	5.E-04	6.E-02
	Inhal.	2.E-05	1.E-03	1.E-04	4.E-02	5.E-05	4.E-03	3.E-01
Ingestion pathway								
HQ (Children)	Mean	6.E-01	2.E-03	4.E-01	1.E-02	2.E-02	5.E-01	3.E-03
	Min	3.E-01	1.E-03	2.E-01	7.E-03	8.E-03	3.E-02	3.E-03
	Max	1.E+00	4.E-03	6.E-01	3.E-02	4.E-02	9.E+00	5.E-03
HQ (Adults)	Mean	6.E-02	3.E-04	5.E-02	1.E-03	2.E-03	5.E-02	4.E-04
	Min	3.E-02	1.E-04	2.E-02	8.E-04	8.E-04	3.E-03	3.E-04
	Max	1.E-01	4.E-04	7.E-02	3.E-03	4.E-03	1.E+00	5.E-04
Dermal pathway								
HQ (Children)	Mean	4.E-03	7.E-04	6.E-03	1.E-04	2.E-04	9.E-03	5.E-05
	Min	2.E-03	3.E-04	3.E-03	7.E-05	8.E-05	5.E-04	4.E-05
	Max	7.E-03	1.E-03	9.E-03	2.E-04	4.E-04	2.E-01	6.E-05
HQ (Adults)	Mean	6.E-04	1.E-04	1.E-03	1.E-05	4.E-05	1.E-03	7.E-06
	Min	3.E-04	4.E-05	4.E-04	1.E-05	1.E-05	7.E-05	6.E-06
	Max	1.E-03	2.E-04	1.E-03	4.E-05	6.E-05	3.E-02	1.E-05
Inhalation pathway								
HQ (Children)	Mean	3.E-04	7.E-08	4.E-04	3.E-07	3.E-04	1.E-05	9.E-08
	Min	2.E-04	3.E-08	2.E-04	2.E-07	9.E-05	7.E-07	8.E-08
	Max	5.E-04	1.E-07	5.E-04	7.E-07	4.E-04	3.E-04	1.E-07
HQ (Adults)	Mean	1.E-04	3.E-08	1.E-04	1.E-07	9.E-05	5.E-06	3.E-08
	Min	6.E-05	1.E-08	6.E-05	7.E-08	3.E-05	3.E-07	3.E-08
	Max	2.E-04	4.E-08	2.E-04	3.E-07	1.E-04	9.E-05	5.E-08
HI								
Children	Mean	6.E-01	3.E-03	5.E-01	1.E-02	2.E-02	5.E-01	3.E-03
	Min	3.E-01	1.E-03	2.E-01	7.E-03	8.E-03	3.E-02	3.E-03
	Max	1.E+00	5.E-03	6.E-01	3.E-02	4.E-02	9.E+00	5.E-03
Adults	Mean	6.E-02	4.E-04	5.E-02	1.E-03	3.E-03	6.E-02	4.E-04
	Min	3.E-02	1.E-04	2.E-02	8.E-04	9.E-04	3.E-03	3.E-04
	Max	1.E-01	6.E-04	7.E-02	3.E-03	4.E-03	1.E+00	5.E-04

آرسنیک و مس است که عنصر روی نیز با شدت کمتر در این مولفه قرار گرفته است. دلیل اصلی قرارگیری این عناصر در مولفه اول، غلظت بیشتر آنها در دو نمونه برداشته شده از جنوب و غرب منطقه معدنی (S1 و S40) است که با توجه به نزدیکی به محدوده معدنی، تحت تاثیر آنها قرار گرفته‌اند. مؤلفه دوم ۲۶/۷۴ درصد واریانس کل را به خود اختصاص می‌دهد و شامل نیکل است. توزیع این عنصر در خاک سطحی محدوده مطالعاتی به

آزمون‌های آماری

برای بررسی داده‌ها به روش تحلیل مؤلفه اصلی، بار مؤلفه‌ها با استفاده از چرخش Varimax و همچنین درصد انباشتی واریانس‌ها محاسبه شد. نتایج به ترتیب برای خاک‌های سطحی و عمقی در جدول ۵ و ۶ ارائه شده است. برای خاک‌های سطحی تمام عناصر در ۴ مؤلفه با واریانس کل بیش از ۸۸ درصد قرار می‌گیرند. مؤلفه اول ۳۰/۸۲ درصد واریانس کل را توضیح می‌دهد و شامل عناصر

مدنظر قرار نگرفت. در مولفه چهارم سرب با توضیح ۱۱/۰۵ درصد واریانس کل قرار دارد. براساس نتایج بخش‌های قبل، تمام این عناصر نیز در رده آلودگی کم قرار دارند، اما سرب به صورت موردی، غنی‌شدگی در چند نمونه نشان داد. به طور کلی عواملی چون شرایط فیزیکوشیمیایی خاک (pH، درصد کربن آلی و ...)، بارش، فعالیت میکروارگانیسم‌ها، تحرک و گونه‌پذیری عناصر بر انتقال و جابجایی آنها در نیمرخ خاک اثرگذار هستند. بنابراین علیرغم شباهت‌های که در خاک سطحی و عمقی (مانند قرارگیری روی و آهن در یک مولفه) مشاهده می‌شود، تفاوت‌هایی نیز در غلظت و همبستگی عناصر مختلف در سطح و عمق خاک قابل مشاهده است.

جدول ۵- نتایج تحلیل مؤلفه اصلی با چرخش واریماکس عناصر در خاک‌های سطحی

Table 5. Results of principal component analysis with Varimax rotation of elements in top soils

	Component			
	1	2	3	4
Al	0.073	-0.333	-0.914	-0.087
As	0.782	0.146	0.091	0.007
Cd	0.324	0.174	-0.2	-0.486
Cr	0.175	-0.186	-0.725	0.267
Cu	0.821	0.005	0.007	0.073
Fe	0.326	0.417	0.703	0.177
Ni	-0.254	0.72	-0.525	-0.103
Pb	0.007	0	-0.144	0.957
Zn	0.49	-0.086	0.781	-0.082

صورتی است که در نمونه S5 بیشینه غلظت را دارد. بنابراین با توجه به این موضوع و اثر حوضچه باطله شرکت احیاسپاهان در این محدوده (آثار شسته شدن رسوب و جریان پساب) این مولفه نیز منشأ احتمالاً انسان‌زاد و معدنی دارد. لازم به ذکر است که آهن نیز به صورت متوسط در این مولفه قرار دارد. مؤلفه سوم ۲۰/۳ درصد واریانس کل داده‌ها را به خود اختصاص می‌دهد. در این مؤلفه عناصر آهن و روی قرار دارند. بیشترین غلظت‌های آهن و روی در سه نمونه S1، S5 و S47 به دست آمده‌است و همین امر اصلی‌ترین دلیل قرارگیری این عناصر در یک مولفه است. در عین حال به نظر می‌رسد که عناصر قرار گرفته در این مولفه از نظر منشأ حالت بینابین زمین‌زاد و انسان‌زاد دارند. مولفه چهارم ۱۰/۴ درصد واریانس را دربرمی‌گیرد و شامل سرب است. با توجه به درصد واریانس کمتر آن، این مولفه نسبت به سایر مولفه‌ها از اهمیت کمتری برخوردار است. با این وجود سرب به دلیل آلودگی شدید در دو نمونه S22 و S24 به صورت مجزا قرار گرفته است.

درمورد خاک عمقی، ۴ مولفه که مجموعاً بیش از ۷۹ درصد واریانس را توضیح می‌دهند به دست آمد. مولفه اول با ۲۷/۱ درصد واریانس کل، بیشتر عناصر آلومینیم، آرسنیک، مس و نیکل را دربر می‌گیرد. روی که می‌توان گفت نسبت به عناصر مولفه اول در تعداد نمونه کمتری آلودگی نشان داد در مولفه دوم با حدود ۱۴/۵ درصد واریانس کل قرار دارد. کادمیم در مولفه سوم قرار دارد که ۱۳/۶ درصد واریانس کل را توضیح می‌دهد. این عنصر در خاک عمقی جزء عناصری بود که به دلیل عدم غنی‌شدگی، در محاسبه شاخص آلودگی خاک

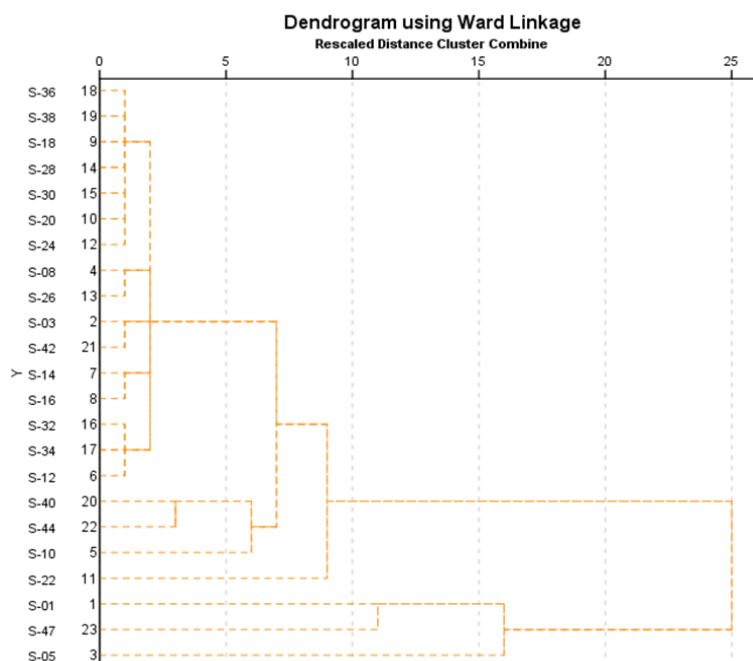
اندازه‌گیری شده است. همچنین عنصر روی نیز بیشینه غلظت‌های خود را در این نمونه‌ها نشان داد. با این وجود به نظر می‌رسد که همبستگی این سه نمونه و شباهت آن‌ها بیشتر مربوط به غلظت زیاد آهن در آن‌هاست. سایر ایستگاه‌های نمونه‌برداری در شاخه دوم قرار دارند با این تفاوت که نمونه S22 (جنوب منطقه-پلاسر احیاسپاهان)، فاصله بیشتری از سایر نمونه‌ها دارد که به نظر می‌رسد آلودگی بالای سرب در این نقطه عامل این جدایش است. در خاک عمقی نیز نمونه‌های S9 (اطراف محل حوضچه باطله جدید)، S15 (روستای گوریاب)، S19 (شمال روستای کلاته کلان)، S21 (روستای کلاته کلان)، S25 (مجاور پلاسر و جداکننده احیاسپاهان)، S29 (جنوب شهر سنگان) و S37 (شمال غرب سایت) شاخه‌ای مجزا را تشکیل دادند. همچنین در شاخه دوم نیز که شامل سایر نمونه‌های عمقی می‌شود، پنج نمونه S11 (روستای ساملکی)، S17 (شمال روستای کلاته کلان)، S31 (برآباد)، S33 (شمال شرق روستای برآباد) و S35 (جاده تایباد-خواف) شباهت بیشتری را از نظر ترکیب عنصری با هم نشان می‌دهند.

جدول ۶. نتایج تحلیل مؤلفه اصلی با چرخش واریماکس عناصر در خاک‌های عمقی

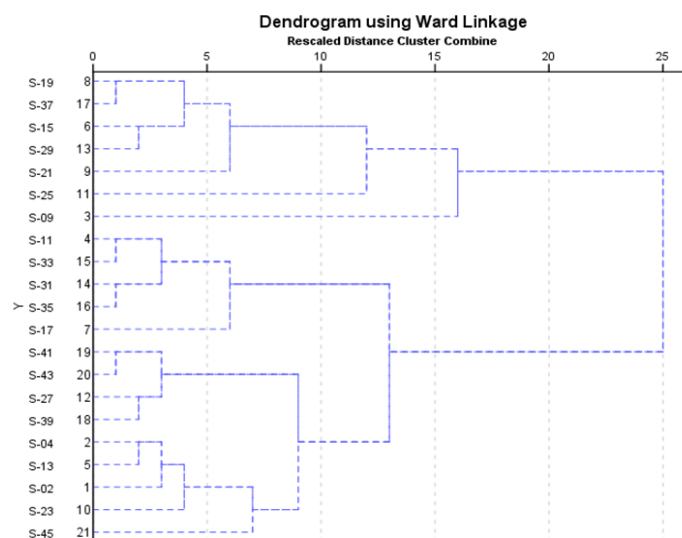
Table 6. Results of principal component analysis with Varimax rotation of elements in subsoils

	Component			
	1	2	3	4
Al	0.842	0.198	0.166	-0.039
As	0.583	-0.022	0.578	0.31
Cd	-0.115	0.193	0.523	-0.086
Cr	0.055	0.335	-0.837	0.047
Cu	0.747	0.012	-0.002	-0.102
Fe	0.385	0.401	0.156	0.361
Ni	0.752	0.286	-0.39	0.174
Pb	0.109	-0.066	-0.017	0.888
Zn	0.307	0.849	0.084	-0.064

از تحلیل خوشه‌ای سلسله مراتبی برای بررسی ارتباط بین ایستگاه‌های نمونه‌برداری خاک استفاده شد. نمودار تحلیل خوشه‌ای در خاک سطحی و عمقی به روش Ward به ترتیب در شکل‌های ۷ و ۸ آورده شده است. برای خاک سطحی، دو شاخه اصلی در شکل وجود دارد. یک شاخه شامل نمونه‌های S1، S5 و S47 است. در هر سه ایستگاه که به ترتیب از جنوب مجتمع صنعتی، مجاور حوضچه باطله احیاسپاهان و محل انباشت ضایعات شرکت صنعتی و معدنی توسعه فراگیر سناباد برداشته شده‌اند غلظت زیاد عنصر آهن وجود داشته و غلظت بیشتر از ۱۰ درصد این عنصر در هر سه ایستگاه



شکل ۷- نمودار خوشه‌ای ایستگاه‌های نمونه‌برداری خاک سطحی Cluster analysis of topsoil sampling stations



شکل ۸- نمودار خوشه‌ای ایستگاه‌های نمونه‌برداری خاک عمقی Cluster analysis of subsoil sampling stations

نتیجه‌گیری

شد. لازم به ذکر است که با توجه به ماهیت معدنی منطقه و وجود آنومالی طبیعی، غنی‌شدگی بیشتر عناصر در بخش عمده خاک منطقه طبیعی بوده و از طرفی، برداشت‌های پلاستیکی موجب اختلاط و در نتیجه اختلاف اندک غلظت عناصر در خاک سطحی و عمقی شده‌است. با این وجود عنصر آهن علیرغم غنی‌شدگی طبیعی در خاک منطقه، در اثر فعالیت‌های معدنی و فرآوری، و ایجاد غبارهای غنی

انباشت غیراصولی پسماند و ضایعات، اگرچه به صورت موقت و در داخل سایت شرکت باشد علاوه بر امکان نفوذ آلاینده‌ها به عمق و آلودگی سفره‌های زیرزمینی منطقه، با توجه به شدت وزش باد و سست بودن خاک محدوده مطالعاتی، به انتقال آلودگی از طریق غبار به مناطق دورتر منجر خواهد

پارامترهای ارائه شده بصورت دوره‌ای و منظم مورد بررسی قرار گرفته و گزارشی مبتنی بر وضعیت محیط زیست پروژه تهیه شده در اختیار مسئولان طرح و اداره حفاظت محیط زیست شهرستان قرار گیرد تا هر زمان وضعیت پارامترها نزدیک به آستانه و نگران کننده بود با انجام تمهیدات مقتضی از بروز اثرات زیانبار جلوگیری به عمل آید.

از این عنصر، در خاک سطحی منطقه غنی‌شدگی چشمگیری دارد. همچنین با توجه به شرایط آب و هوایی منطقه نظیر بادخیزی و کمبود بارش و نیمه‌خشک بودن منطقه و خطر انتقال آلودگی از طریق غبار به مناطق دورتر و وجود ریسک سلامتی برای کارکنان معدن و ساکنان مراکز جمعیتی پیرامون، ضروری است که نتایج اندازه‌گیری

References

- Aqanabati, S.A., 2004. Geology of Iran. Geological Organization of Iran.
- Behjati, R., 2013. Climatic characteristics (climatology) of Khaf city, <http://khafgeography.blogfa.com/>.
- Chabukdhara, M., Nema, A.K., 2012. Assessment of heavy metal contamination in Hindon River sediments: A chemometric and geochemical approach, *Chemosphere*, NO. 87, pp. 945-953.
- Golmohammadi, A., Karimpour, M.H., Malekzadeh Shafaroudi, A., Mazaheer, S.A., 2015. Alteration-mineralization, and radiometric ages of the source pluton at the Sangan iron skarn deposit, northeastern Iran. *Ore Geology Review*, NO. 65, pp. 545-563.
- Hadipourdeshal, M., 2017. Evaluation project of environmental effects and consequences - EIA studies of Sangan iron concentrate and pellets production plan.
- Hakanson, L., 1980. An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach. *Water Research*, NO. 8, pp. 975-1001.
- Iron Ore Anomalies Discovery Report, 2005. Miner Consulting Engineers.
- Irshad M.K., Ibrahim M., Noman A., Shang J., Mahmood A., Mubashir M., Khoo K.S., Ng H.S., Show P.L., 2022. Elucidating the impact of goethite-modified biochar on arsenic mobility, bioaccumulation in paddy rice (*Oryza sativa* L.) along with soil enzyme activities, *Process Safety and Environmental Protection*, 160, pp. 958-967
- Karimpour, M., Malekzadeh Shafarodi, A., Gulmohammadi, A., 2007. Mineralization and exploration of magnetite by ground magnetometer method in the area between Baghek and North C-, Sangan Khaf iron ore mine, *Advanced Applied Geology*, Vol. 1, pp. 54-38.
- Kheshtabeh, R., Akbari, M., Heydari, A., Najafpour, A., 2022. Quantitative investigation of the effect of heavy metals caused by iron ore mining on the health of the residents of Khaf city. The first international conference and the 8th national conference on pastures of Iran.
- Mei Z., Cogswell, E., Looker, A., Pfeiffer, Ch., Cusick, S., Lacher, D., Grummer-Strawn, L., 2011. Assessment of iron status in US pregnant women from the National Health and Nutrition Examination Survey (NHANES), 1999-2006, Free article, 21430118.
- Mohiuddin, K. M., Ogawa, Y., Zakir, H., Otomo, K., Shikazono, M., 2011. Heavy metals contamination in water and sediments of an urban river in a developing country, *International Journal of Environmental Science & Technology*, NO. 8, pp. 723-736.
- Moore, F., Rastmanesh, F., Hashemitangestani, M., 2005. The application of principal component analysis in the separation of clay outcrops from carbonate using ETM+ sensor data, The 7th annual conference of the Geological Society of Iran.
- Ran H., Guo Z., Yi L., Xiao X., Zhang L., Hu Z., Li C., Zhang Y., 2021. Pollution characteristics and source identification of soil metal(loid)s at an abandoned arsenic-containing mine, China. *Journal of Hazardous Materials*, 413, Article 125382.
- Shakeri, A., Hadipour, M., Rasteagari Mehr, M., 2019. Environmental impact assessment project of tailings pond of iron ore concentrates production plant of Sanabad Industrial and Mineral Development Company "Environmental Assessment Plan

- Report". Vice President of Research and Technology of Kharazmi University.
- Siegel, A., 2002. Investigation of Dioxin/Furans, PAHs and Heavy Metals in Sarcheshmeh Copper Complex Soil, Iran, *Journal of Geoscience and Environment Protection*, Vol.5 No.8.
- USEPA (US Environmental Protection Agency), "Supplemental guidance for developing soil screening levels for superfund sites", OSWER, (2001) 9355.4-24.
- Xiang M., Li Y., Yang J., Lei K., Li Y., Li F., Zhang D., Fang X., Cao Y., 2021. Heavy metal contamination risk assessment and correlation analysis of heavy metal contents in soil and crops *Environmental Pollution*, 278, Article 116911.
- Yang, H., Li, H., M. Wu., Zhang, Zh., Li. L., Wan, Sh., 2011. Plant community responses to nitrogen addition and increased precipitation: the importance of water availability and species traits, *wildlife Biology*, NO. 17, pp. 2936-2944.
- Zheng, N., Liu, J., Wang, Q., Liang, Z., 2010. Health risk assessment of heavy metal exposure to street dust in the zinc smelting district, Northeast of China. *Science of the Total Environment*, 408, 726-733.