



RESEARCH ARTICLE

doi 10.22067/econg.2025.1141



Determination of source and assessment of contamination of potentially toxic elements mineral dusts of the Chadormalu Iron Mine, Bafq, Northeast of Yazd

Shiva Mehrabani¹, Mohammad Maanijou^{2*} , Afshin Qishlaqi³ , Yokoo Yoriko⁴

¹ Ph.D. Student, Department of Geology, Faculty of Science, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

² Professor, Department of Geology, Faculty of Science, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

³ Assistant Professor, Department of Environmental Geology and Hydrology, Faculty of Earth Science, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

⁴ Assistant Professor, Department of Environmental Systems Science, Faculty of Science and Engineering, Doshisha University, Kyoto-shi, Kyoto, Japan

ARTICLE INFO

Article History

Received: 11 February 2025
Revised: 28 June 2025
Accepted: 30 June 2025

Keywords

Potentially toxic elements
mineral dust
Chadormalu Mine
Bafq

*Corresponding author

Mohammad Maanijou
✉ mohammad@basu.ac.ir

ABSTRACT

This study evaluates the concentration and source of potentially toxic elements in thirteen samples of in-situ dust collected from the Chadormalu iron mine, located 180 km northeast of Yazd city. Various geochemical indices including the geoaccumulation index, potential ecological risk index, the nemerow integrated pollution index, enrichment index and health risk were applied to assess the level of pollution in the mineral dust. Based on the I_{geo} index, the studied samples are classified as the severely polluted with elements such as Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, As, Sn, Pb and V. They also exhibit moderate to severe contamination with respect to Mo. The potential ecological risk index of the element arsenic falls into the extremely high-risk category. The elements Mo, Cu, Zn, As, Sn and V are classified as severely polluted based on the integrated pollution index (NIPI), while the metals Pb, Ni and Co are categorized as moderately polluted. The enrichment index of the dust samples indicates the minimal enrichment for the studied elements. Based on the health risk assessment data, As and Cr exhibited the highest hazard quotient (HQ) values through the ingestion pathway. The non-carcinogenic risk associated with all the studied elements, when inhalation and dermal contact, was estimated to be less than 1. Consequently, individuals experience no adverse health effects. The risk of carcinogenicity exists for adults and children through ingestion of arsenic and for children through ingestion of chromium. Principal component analysis (PCA) revealed that the elements Co, Ni, Mo, V, and Sn have geogenic origins, while other elements are influenced by anthropogenic sources, including mining and processing activities.

How to cite this article

Mehrabani, Sh., Maanijou, M., Qishlaqi, A. and Yoriko, Y., 2025. Determination of source and assessment of contamination of potentially toxic elements mineral dusts of the Chadormalu Iron Mine, Bafq, Northeast of Yazd. *Journal of Economic Geology*, 17(3): 1–24. (in Persian with English abstract) <https://doi.org/10.22067/econg.2025.1141>



©2025 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers.

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Mining and mineral processing are often associated with the release of toxic dust and effluents from tailings dams and metallurgical slag. Dust particles emitted during mining and mineral processing operations directly affect human health by being ingested or inhaled. The Chadormalu iron mine, situated 180 km northeast Yazd, is the largest iron deposit in Central Iran and part of the Bafq-Saghand metallogenic province. The sources of mineral dust production in the Chadormalu mine include the explosion sites surrounding the mine, the crusher, the tailings silo, the reclaimer, and the mineral dust emanating from the dry surface of the tailing dams. The aims of the present study to investigate the source and determine the contamination of potentially toxic elements (PTEs) in mineral dust and its impact on human health.

Materials and methods

To assess the PTEs, thirteen mineral dust samples were collected from various locations within the Chadormalu mine using plastic brushes and a dustpan in December 2023. The samples dried at room temperature and then passed a 2-mm sieve to eliminate roots, debris and stones. To determine the concentration of elements, sample of powdered material subsampled to 230- mesh sieve by an agate miller. Approximately, 0.5 gr of prepared sample digested in a mixture of 2 ml of HF (40%), 2 ml of HNO₃ (65%), and 6 ml of HCl (37%), following the standard method (DIN EN 13656: 2021-07), and subsequently, the elemental concentrations were determined using an Agilent 7850 ICP-MS instrument at the Eurofins Umwelt Ost GmbH laboratory, Freiberg, Germany. Quality control of the samples was performed using certified reference materials (CRMs) to measure accuracy, blank samples to assess contamination, and replicate samples to assess precision.

Results and discussion

The average concentrations of elements (mg/kg) in the mineral dust samples follow this order: Mn > V > Ni > Zn > Cu > As > Cr > Co > Pb > Sn > Mo. To determine the level of pollution, the geoaccumulation index (I_{geo}) was determined as fallow (Müller, 1969):

$$I_{geo} = \log_2(C_n/1.5B_n)$$

Where C_n and B_n represent the concentrations of elements in the sample and reference element (upper crust content), respectively. Based on the geoaccumulation index results, the elements Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, As, Pb and V are considered very strong polluted. The enrichment factor (EF) is expressed using the following equation (Liu et al., 2014), considering Fe as the reference element:

$$EF = (C_i/C_r)_{Sample}/(C_i/C_r)_{Baseline}$$

The C_i and C_r values refer to the element concentrations in the sample and reference material. The results indicates the minimal enrichment for the studied elements.

The ecological risk index (RI) is obtained by the follows (Zhang et al., 2018):

$$RI = \sum_i^m E_r^i = \sum_i^m T_r^i \times \left(\frac{C_i}{C_n^i}\right)$$

Where E_r^i and T_r^i are the ecological risk index and toxicity index of elements, C_i and C_n^i are the elements measured in the sample and reference material, respectively. On the basis of the results, the E_r^i values of elements Cr, Mn, Ni, Cu, Pb, V and Zn are considered low ecological risk at all mineral dust sampling stations. However, arsenic exhibits a moderate ecological risk in the study area. The RI value indicated the highest level of pollution and potential ecological risk at station FD8.

Sawut et al. (2018) defined the Integrated Pollution Index of Nemerow (NIPI) as follows:

$$NIPI = \sqrt{(P_{imax}^2 + P_{iave}^2)/2}$$

That P_i is the single-factor pollution index for each element. The NIPI values indicated that Cu, Zn, As, Mo, Sn and V in the mineral dust samples belong to the heavy pollution class, while Co, Ni and Pb belong to the moderate pollution categories. Additionally, the element Cr classified as clean, while Mn classified as slightly polluted.

In this study, health risk assessment for both adults and children were conducted based on inhalation, ingestion and dermal contact with PTEs present in mineral dust. The calculations were performed by the following relationship (USEPA, 1997):

$$ADD_{ing} = \frac{C_n \times IngR \times EF \times ED}{BW \times AT} \times CF$$

$$ADD_{inh} = \frac{C_n \times InhR \times EF \times ED}{PEF \times BW \times AT}$$

$$\text{ADD}_{\text{dermal}} = \frac{C_n \times SA \times AF \times ABS \times EF \times ED}{BW \times AT} \times CF$$

The non-carcinogenic risks associated with elements are determined using the following equation (Hossen et al., 2021): $HQ = \frac{ADD}{RfD}$

Where HQ is the hazard quotient to assess the non-carcinogenic hazard and RfD is the reference dose value (mg/kg/day). The hazard index (HI) is the cumulative sum of hazard quotient (HQ) values used to evaluate the overall non-carcinogenic risk posed by multiple toxicants (Hossen et al., 2021):

$$HI = \sum HQ = HQ_{\text{ing}} + HQ_{\text{inh}} + HQ_{\text{derm}}$$

If HQ, $HI < 1$, indicates the absence of non-carcinogenic effects, while if HQ, $HI > 1$, it suggests the presence of non-carcinogenic effects. The health risk assessment and HQ values indicate that the non-carcinogenic risk of the potentially toxic elements Ni, Cu, Zn, and Pb for adults and children is less than 1, indicating that there is a carcinogenic risk associated with these PTEs in the study area. Based on the HI values, both adults and children face a non-carcinogenic health risk when ingested occurs. The health risk assessment reveals that the non-carcinogenic risk is higher in children compared to adults. Arsenic emerges as the main risk factor for both age groups. The ingestion of As for children and adult, as well as Cr for children is associated with

carcinogenic risks.

Conclusion

This study assessed the contamination of mineral dust with PTEs, determined the source of contamination and evaluated the health risks associated with the Chadormalu iron mine. The study of the concentration of total toxic elements revealed that the average concentration of all elements except for Cr and Mn is more than the concentration of metals found in the upper crust content. Non-carcinogenic risk of elements is higher in children than in adults, with As being the primary risk factor. The health risk assessment reveals that ingestion is the most important pathway for PTEs exposure. The results of calculating pollution indicators in the study area revealed that the main source of PTEs pollution is the mineralization of natural iron ore and mineral processing. These activities pose significant risks to human health and the environment.

Acknowledgment

We are grateful to the Chadormalu Industrial and Mining Company, particularly Mr. Mahmoudi, for their cooperation and Mr Meinhold (TU Bergakademie Freiberg, Germany) for providing the geochemical data. The authors express their sincere gratitude to the reviewer of Journal of Economic Geology for their valuable and insightful comments.



تعیین منشأ و ارزیابی آلودگی عناصر بالقوه سمی در غبار برج‌های معدن آهن چادرملو، بافق، شمال شرق یزد

شیوا مهربانی^۱، محمد معانی‌جو^{۲*}، افشین قشلاقی^۳، یو کو یوریکو^۴

^۱ دانشجوی دکتری، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

^۲ استاد، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

^۳ استادیار، گروه زمین‌شناسی زیست محیطی و آب‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

^۴ استادیار، گروه علوم سیستم‌های محیطی، دانشکده علوم و مهندسی، دانشگاه دوشیسا، کیوتو، ژاپن

چکیده

در این پژوهش، غلظت عناصر بالقوه سمی در ۱۳ نمونه غبار برج‌های معدن آهن چادرملو واقع در ۱۸۰ کیلومتری شمال‌شرق شهرستان یزد ارزیابی شد. برای بررسی شدت آلودگی ذرات غبار از ضریب زمین‌انباشت، شاخص خطر اکولوژیکی، شاخص آلودگی نمره، ضریب غنی‌شدگی و شاخص خطر سلامت استفاده شد. بر اساس ضریب زمین‌انباشت، نمونه‌های غبار نسبت به عناصر کروم، منگنز، کبالت، نیکل، مس، روی، آرسنیک، قلع، سرب و وانادیوم دارای آلودگی خیلی شدید و نسبت به مولیبدن دارای آلودگی متوسط تا شدید هستند. شاخص خطر اکولوژیکی رده خطر بسیار زیاد را برای عنصر آرسنیک نشان می‌دهد. نتایج شاخص آلودگی نمره و بیانگر آلودگی شدید عناصر مولیبدن، مس، روی، آرسنیک، قلع و وانادیوم و آلودگی متوسط عناصر سرب، نیکل و کبالت است. نتایج ضریب غنی‌شدگی در نمونه‌ها کمترین غنی‌شدگی را برای عناصر مورد بررسی نشان می‌دهند. بر اساس نتایج حاصل از ارزیابی خطر سلامتی، بیشترین مقدار ضریب خطر غیرسرطان‌زایی برای عناصر آرسنیک و کروم و از طریق مسیر بلعیدن به دست آمد. میزان خطر غیر سرطان‌زایی همه عناصر مورد بررسی، از طریق مسیر تنفسی و تماس پوستی کمتر از ۱ تخمین زده شد و لذا نشان‌دهنده نبود اثر منفی بر سلامت افراد است. خطر سرطان‌زایی در بزرگسالان و خردسالان نیز برای عنصر آرسنیک از مسیر بلعیدن وجود دارد و برای عنصر کروم، از طریق مسیر بلع برای خردسالان دارای خطر سرطان‌زایی است. نتایج تحلیل مؤلفه اصلی نشان‌داد که عناصر کبالت، نیکل، مولیبدن، وانادیوم و قلع دارای منشأ زمین‌زاد و سایر عناصر از منابع انسان‌زاد مانند فعالیت‌های معدنی و فراوری منشأ گرفته‌اند.

اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۲۳

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۴/۰۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۴/۰۹

واژه‌های کلیدی

عناصر بالقوه سمی

غبار برج‌ها

معدن چادرملو

بافق

نویسنده مسئول

محمد معانی‌جو

mohammad@basu.ac.ir ✉

استناد به این مقاله

مهربانی، شیوا؛ معانی‌جو، محمد؛ قشلاقی، افشین و یوریکو، یو کو، ۱۴۰۴. تعیین منشأ و ارزیابی آلودگی عناصر بالقوه سمی در غبار برج‌های معدن آهن چادرملو، بافق، شمال‌شرق یزد. زمین‌شناسی اقتصادی، ۱۷(۳): ۱-۲۴. <https://doi.org/10.22067/econg.2025.1141>

مقدمه

تأثیر معدن کاری و فراوری مواد معدنی بر محیط زیست در نواحی معدنی در بررسی‌های بسیاری مورد بحث قرار گرفته است. فعالیت‌های معدنی معمولاً به ورود عناصر بالقوه سمی به محیط زیست منجر می‌شود (Zhang et al., 2018). آلودگی محیط به این عناصر به دلیل خطراتی که برای سلامت انسان و کیفیت بوم سامانه دارد، یک نگرانی بزرگ جهانی است؛ به طوری که برخی از این عناصر حتی در غلظت کم، بسیار سمی هستند (Dou et al., 2021; Boumaza et al., 2021; Khelifi et al., 2021; al., 2013). استخراج و فراوری مواد معدنی اغلب با انتشار گرد و غبار حاوی عناصر بالقوه سمی از سدهای باطله و سرباره‌های متالورژی همراه است. ذرات غبار ساطع شده از عملیات معدن کاری و فراوری مواد معدنی، تأثیر مستقیمی بر کیفیت محصولات مورد استفاده برای تولید مواد غذایی (Křibek et al., 2014) و سلامتی انسان دارند که می‌توانند ذرات ریز غبار را بلع یا استنشاق کنند (Banza et al., 2019; Smolders et al., 2019; Ettler et al., 2019; al., 2009). قرار گرفتن بیش از حد در معرض غبار کانی‌های آیزستی، باعث بیماری‌هایی مانند آیزستوسیس، مزوتلیوما، سرطان ریه، در معرض قرارگیری با ذرات غبار سیلیس سبب بیماری سیلیکوسیس، سرطان ریه و غبار زغال‌سنگ باعث بیماری پنوموکونیوسیس می‌شود (Plumlee et al., 2006; Singh et al., 2009). سرطان ریه یک بیماری شایع در بین کارگرانی است که در معرض گرد و غبار سنگ آهن هستند (Chen et al., 1990; Chau et al., 2009; Wild et al., 1993).

کانسار آهن چادرم‌لو بزرگ‌ترین کانسار آهن در ایران مرکزی و بخشی از ایالت متالوژنیک بافق- ساغند است که در پهنه ایران مرکزی در ۱۸۰ کیلومتری شمال شرق شهرستان یزد، ۶۵ کیلومتری شمال معدن چغارت و ۳۰۰ کیلومتری جنوب طبس قرار گرفته است. کانسار آهن چادرم‌لو از مرحله شناسایی (۱۳۱۹) تا اکتشاف تفصیلی (۱۳۵۸) با ۹/۶۸ کیلومتر مربع مغناطیس‌سنجی زمینی به پایان رسید. سپس مقدمات عملیات بهره‌برداری از معدن فراهم شد

و در سال ۱۳۷۷ شروع به فعالیت رسمی کرد (Kani Kavan, 2021). سنگ آهن استخراج شده، پس از استخراج به کارخانه فراوری ارسال شده و بعد از فراوری، عیار آهن به ۶۷/۵ درصد، فسفر ۰/۰۶ درصد و گوگرد به کمتر از ۰/۰۳ درصد رسیده و به صورت کنسانتره در می‌آید. آن‌گاه بعد از تبدیل به گندله، به کارخانه‌های فولادسازی و ذوب آهن ارسال می‌شود. کارخانه گندله‌سازی چادرم‌لو با ظرفیت تولید سالانه ۳/۴ میلیون تن گندله از کنسانتره سنگ آهن در ۲۵ کیلومتری غرب اردکان- ناین قرار دارد. محصول این کارخانه ماده اولیه اصلی برای تولید آهن اسفنجی است که با استفاده از روش احیا در تولید شمش فولادی به کار می‌رود. تولیدات اصلی کنسانتره سنگ آهن، گندله، سنگ آهن دانه‌بندی شده (درشت‌دانه و ریزدانه) و کنسانتره آپاتیت است. سنگ آهن دانه‌بندی شده برای مصرف در صنایع فولاد به روش کوره بلند مصرف می‌شود. سنگ آهن به عنوان ماده اولیه اصلی مورد نیاز در صنایع فولاد است. منابع تولید غبار در معدن چادرم‌لو، محل انفجارهای اطراف معدن، سنگ‌شکن، سیلوی باطله، ریکلایمر و غبارهای برجا حاصل از سطح خشک سدهای باطله است. مهم‌ترین عامل آلودگی در منطقه، آزادسازی و نهشت ذرات غبار سنگ آهن طی خردایش و انتشار ذرات از سدهای باطله است. فعالیت‌های معدنی و فراوری مقادیر بسیار زیادی عناصر بالقوه سمی تولید می‌کنند که می‌توانند از طریق بلع، استنشاق و تماس‌های پوستی وارد بدن شوند، در نتیجه به اثرات جدی بر سلامتی منجر می‌شوند. هدف از این پژوهش، ارزیابی شدت آلودگی ذرات غبار برجا معدن آهن چادرم‌لو به عناصر بالقوه سمی، تعیین منشأ این عناصر و بررسی خطر سلامتی ناشی از قرارگیری در معرض غبار آلوده به عناصر بالقوه سمی است.

آب و هوا و زمین‌شناسی منطقه

منطقه چادرم‌لو به دلیل موقعیت جغرافیایی کویری، دارای آب و هوای سرد و خشک در زمستان و گرم در تابستان است. متوسط بارندگی سالیانه در منطقه ۷۰ میلی‌متر و دمای هوا بین ۱۰ تا ۴۵

پی سنگ پر کامبرین در ناحیه چادرملو سنگ‌های دگرگونی درجه متوسط تا بالا از قبیل شیست، آمفیبولیت، گنیس، کوارتزیت و مرمر (کمپلکس بنه‌شور و سرکوه) و سنگ‌های دگرگونی درجه پایین مانند شیل، ماسه‌سنگ کوارتزیتی، گری‌وک و فیلیت است (Torab and lehmann, 2007). این سنگ‌های دگرگونی توسط توالی آتشفشانی-رسوبی کامبرین زیرین (Ramezani, 1997) پوشیده شده است. این توالی آتشفشانی-رسوبی دربرگیرنده ریولیت‌های کالک‌آلکالن، ریوداسیت، بازالت، کمی واحد تبخیری، کربناته، ماسه‌سنگ و گل سنگ است.

در این کانسار، سنگ‌ها شامل سنگ‌های آذرین نفوذی و بیرونی کامبرین آغازین است و طیف وسیعی از ترکیب‌ها از سنگ‌های مافیک (گابرو-دیوریت) تا فلسیک (ریولیت) را نشان می‌دهند و درجه‌های مختلفی از دگرسانی گرمایی و متامورفیسم را تجربه کرده‌اند. سنگ‌های دگرگونی در منطقه از میکاشیست، گارنت‌شیست، آندالزیت-سیلیمانیت‌شیست، آمفیبولیت و گنیس و مجموعه‌ای از سنگ‌های رسوبی متشکل از کنگلومرا، سنگ آهک، دولومیت، ماسه‌سنگ و برش تشکیل شده است. سنگ میزبان این کانسار سنگ‌های دگرگونی پرکامبرین و سنگ‌های آتشفشانی دگرسان‌شده گرمایی کامبرین آغازین (اغلب ریولیت) با ترکیب‌های دولومیت سیلیسی و برش‌های آذرآواری، متعلق به سازند ریزو و در ارتباط با گرانیتوئیدهای کامبرین آغازین چادرملو هستند. تمام انواع سنگ‌ها در منطقه توسط دایک‌های مافیک قطع شده‌اند. کانسنگ توده‌ای توسط رگه‌های آلپیتی در برخی قسمت‌ها بریده شده است. سنگ‌های میزبان ریولیت نیز به شدت دگرسان شده‌اند. مگنتیت کانی اصلی آهن در کانسار چادرملو، با هماتیت، آنکرایت و سیدریت همراه است. کانی‌های سولفیدی به صورت جزئی به ویژه پیریت در طی مراحل پایانی کانی‌سازی مگنتیت تشکیل شده‌اند. کانی‌های فرعی دیگر در کانسنگ آهن شامل آپاتیت، کلسیت و کلریت است (Daliran et al., 2010; Heidarian et al., 2017).

درجه سانتی گراد متغیر است. میزان بارش سالانه ۱۱۰ میلی‌متر و میزان رطوبت ۱۲ درصد است. میزان تبخیر سالانه ۴۳۷۸ میلی‌متر بوده که حدود ۴۰ برابر بارندگی است. وزش باد تقریباً همیشگی است. در تابستان جهت عمده باد از جنوب به شمال است؛ در حالی که در فصل پاییز جهت وزش باد از شمال غرب به جنوب شرق است و جهت باد غالب در منطقه شمال غرب به جنوب شرق است. بیشترین سرعت باد ۱۴/۴ متر بر ثانیه گزارش شده است (Moghtaderi, 2006). کانسار آهن در ایران مرکزی و بخشی از ایالت متالورژیک بافق-ساغند است. ناحیه معدنی بافق در بلوک پشت بادام (Stöcklin, 1971; Haghipour, 1977) یا در بخش میانی پهنه زمین‌ساختی کاشمر-کرمان بین دو بلوک ساختاری یزد و طبس در ایران مرکزی قرار گرفته است (Ramezani and Tucker, 2003). این محدوده معدنی از مهم‌ترین ایالت‌های فلززایی در ایران به شمار می‌رود که میزبان ۳۹ کانسار و اندیس معدنی آهن با ذخیره‌ای حدود دو میلیارد تن کانسنگ آهن است (Daliran, 2002). ذخیره آهن در اغلب این کانسارها بین ۱ تا ۴۰۰ میلیون تن متغیر بوده است که کانسارهای چادرملو (۴۰۰ میلیون تن)، چغارت (۲۱۶ میلیون تن) و سه‌چاهون (۱۴۰ میلیون تن) بزرگ‌ترین کانسارها را تشکیل می‌دهند (Torab and lehmann, 2006). علاوه بر کانسارهای مگنتیت-آپاتیت، کانسارهای دیگری چون منگنز، سرب-روی، اورانیوم، توریم و عناصر نادر خاکی وجود دارد (NISCO, 1980; Daliran, 2002; Torab, 2008). کانی‌سازی مگنتیت-آپاتیت در کانسار چادرملو به صورت دو توده بزرگ مجزا است. یک توده در شمال (گودال روباز اصلی معدن که ۸۰ درصد کل ذخیره سنگ معدن را در برمی‌گیرد) و یک توده کوچک‌تر در جنوب که همبری‌های گسلی و برشی شده با سنگ‌های میزبان متاسوماتیزه شده متمایل به سبز، همچنین رگه‌های پراکنده مگنتیت-آپاتیت در اکتینولیت‌های دگرسان‌شده و یا سنگ‌های غنی از آلپیت است (Heidarian et al., 2017). شکل ۱- A، نقشه زمین‌شناسی کانسار چادرملو را نشان می‌دهد.

روش مطالعه

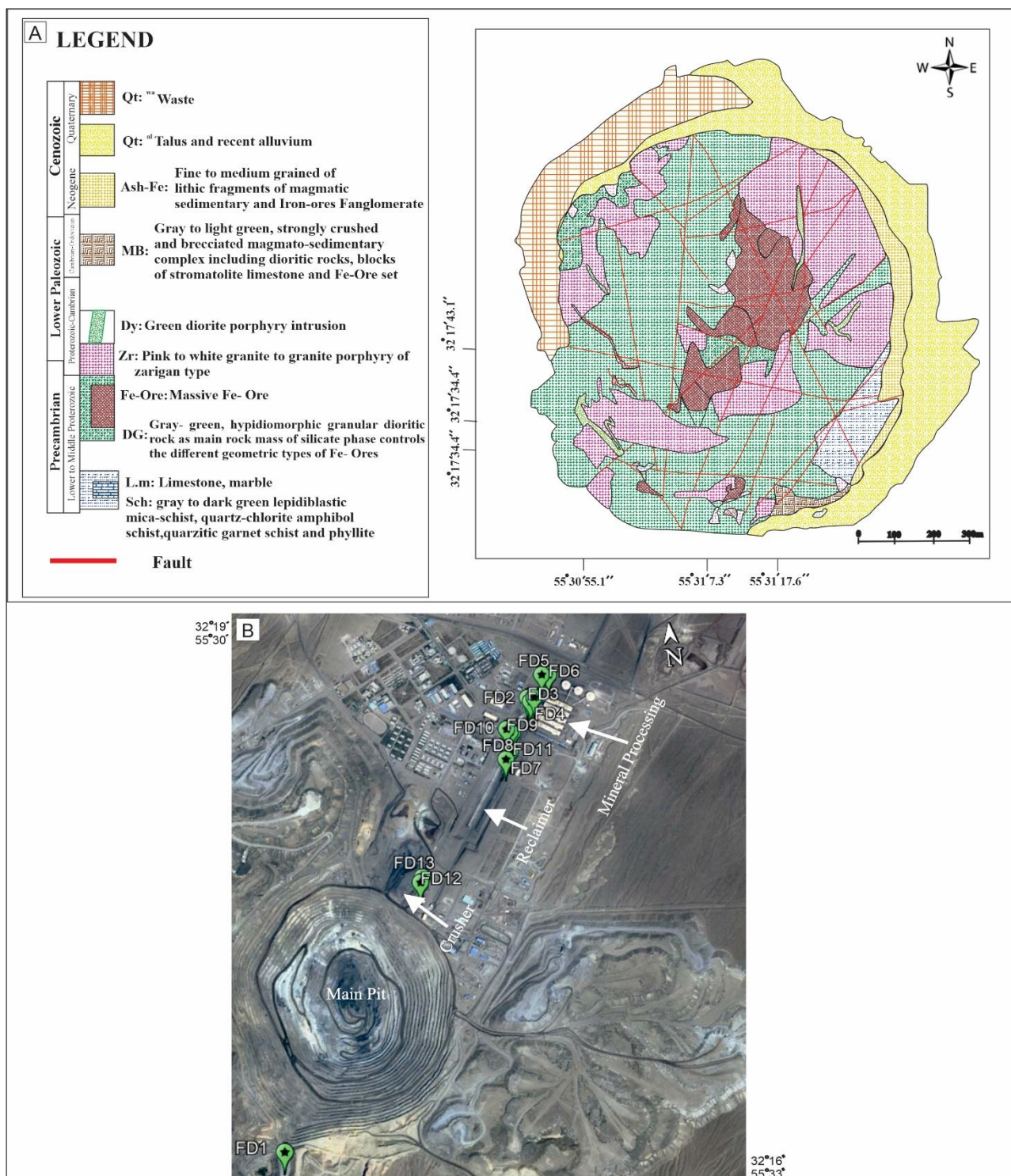
نمونه برداری و تجزیه شیمیایی نمونه‌ها

با توجه به اهداف مورد نظر در این پژوهش که ارزیابی عناصر بالقوه سمی در غبار برجها معدن آهن چادرملو است و به منظور پیش‌بینی مناطق متأثر از عملیات معدن کاری، پس از بررسی‌های میدانی با توجه به امکان نمونه‌برداری از قسمت‌های مختلف معدن چادرملو و جهت وزش باد غالب در منطقه، در مجموع ۱۳ نمونه غبار برجها در آذرماه ۱۴۰۲ به وسیله فرچه و خاک‌روبه پلاستیکی برداشت شد (شکل ۱- B). از هر ایستگاه نمونه‌برداری ۵۰۰ گرم غبار از ایستگاه سنگ‌شکن تا کارخانه فراوری جمع‌آوری و در داخل کیسه‌های زیپ‌دار نایلونی ریخته‌شد. نمونه‌های جمع‌آوری شده کدگذاری و تا قبل از ارسال به آزمایشگاه در محیط خشک و خنک نگهداری شدند. ابزارهای نمونه‌برداری در هر ایستگاه بعد از هر نمونه‌برداری با استفاده از آب مقطر و استون شسته و سپس خشک شدند. بعد از انتقال نمونه‌ها به آزمایشگاه رسوب‌شناسی دانشگاه بوعلی‌سینا، نمونه‌های غبار در دمای اتاق خشک شده و سپس برای حذف ذرات درشت و مواد زائد از الک ۲ میلی‌متر (۱۰ مش) عبور داده شدند. برای تعیین غلظت عناصر بالقوه سمی در کسر ریزتر از ۲ میلی‌متر ابتدا نمونه‌ها همگن‌شده و سپس از الک ۲۳۰ مش (۶۳ میکرون) عبور داده شدند. مقدار ۰/۵ گرم از نمونه غبار (۶۳ میکرون) در مخلوطی از ۲ میلی‌لیتر اسید هیدروفلوئوریک با غلظت ۴۰ درصد، ۲ میلی‌لیتر اسید نیتریک با غلظت ۶۵ درصد و ۶ میلی‌لیتر اسید هیدروکلریک با غلظت ۳۷ درصد به روش استاندارد (DIN EN 13656: 2021-07) حل شد و در نهایت غلظت عناصر به کمک دستگاه ICP- MS مدل Agilent 7850 در آزمایشگاه Eurofins Umwelt Ost GmbH، فرایبورگ آلمان اندازه‌گیری شد. حد آشکارسازی دستگاه برای عناصر آرسنیک، کروم، مس، منگنز، مولیبدن، نیکل، سرب و قلع ۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم، برای عناصر روی و وانادیوم ۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم و برای عنصر کبالت ۰/۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم است. کنترل کیفی نمونه‌ها با استفاده از مواد مرجع معتبر

نتایج و بحث

ارزیابی غلظت عناصر بالقوه سمی در نمونه‌های غبار برجها

غلظت عناصر بالقوه سمی و خلاصه نتایج آمار نمونه‌های غبار و غلظت عناصر در پوسته بالایی (Rudnick and Gao, 2003) در جدول ۱ آورده شده است. میانگین غلظت آرسنیک، کبالت، کروم، مس، منگنز، مولیبدن، نیکل، سرب، قلع، وانادیوم و روی به ترتیب ۵۰/۸، ۲۹/۴، ۳۷/۶، ۶۹/۸، ۶۹۱/۳، ۵/۹، ۹۵/۱، ۲۳/۲، ۱۳/۱، ۷۴۸/۱ و ۹۴/۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم است. مقایسه میانگین غلظت عناصر بالقوه سمی در نمونه‌های غبار کانسار چادرملو با غلظت عناصر در پوسته بالایی (جدول ۱) نشان می‌دهد، میانگین غلظت عناصر کبالت، نیکل، مس، روی، آرسنیک، مولیبدن، قلع، سرب و وانادیوم بیشتر از مقدار آنها در ترکیب پوسته بالایی است؛ در حالی که برای عناصر کروم و منگنز کمتر از ترکیب پوسته بالایی است. ضریب تغییرات (نسبت انحراف معیار به میانگین) عناصر کبالت، کروم، مس، منگنز، مولیبدن، نیکل، قلع، وانادیوم و روی کمتر از ۱ است (جدول ۱)، که توزیع یکنواخت این عناصر را در نمونه‌های غبار منطقه نشان می‌دهد. عناصر آرسنیک و سرب ضریب تغییرات بیشتر از ۱ را نشان می‌دهند که ممکن است به دلیل تنوع در اندازه و ترکیب ذرات غبار باشد. ترکیب ذرات غبار به ترکیب شیمیایی ماده معدنی، روش فراوری، اندازه ذرات و فاصله ذرات غبار از منبع آلودگی بستگی دارد (Soltani, 2017). دامنه تغییرات وانادیوم ۱۰/۲۰ تا ۱۶۵۰/۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم، منگنز ۲۱۰/۰۰ تا ۱۴۸۰/۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم، آرسنیک ۳/۸۱ تا ۳۶۶/۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم، روی ۲۸/۶۰ تا ۳۰۱/۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم، نیکل ۱۱/۰۰ تا ۱۷۲/۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم و مس ۱۴/۹۰ تا ۱۹۴/۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم است. زیاد بودن دامنه تغییرات غلظت عناصر می‌تواند ناشی از تأثیر فعالیت‌های انسان‌زاد مانند معدن کاری و فراوری باشد.



شکل ۱. A: نقشه زمین شناسی ۱:۱۰۰۰ گودال روباز معدن چادرمالو (Kani Kavan sharq, 2021) و B: موقعیت ایستگاه‌های نمونه برداری

Fig. 1. A: The geological map 1:1000 of the open pit of Chadormalu Mine (Kani Kavan sharq, 2021), and B: the locations of sampling sites

جدول ۱. غلظت و نتایج آمار عناصر در نمونه‌های غبار معدن چادرملو در مقایسه با ترکیب پوسته بالایی (مقادیر غلظت بر حسب mg/kg)

Table 1. Concentration and statistical results of elements in mineral dust samples of the Chadormalu Mine compared with the composition of the upper crust content (concentration values in mg/kg)

Sample	As	Co	Cr	Cu	Mn	Mo	Ni	Pb	Sn	V	Zn
FD1	15.8	26.5	64.3	54.9	844.0	9.4	64.5	18.2	10.6	374.0	84.1
FD2	37.9	38.8	27.5	101.0	624.0	9.4	159	5.6	20.8	1580.0	46.2
FD3	38.4	41.7	20.5	92.0	597.0	9.1	156	5.7	20.0	1540.0	43.5
FD4	29.0	12.6	35.6	40.7	649.0	1.5	31.6	55.5	13.2	41.1	180.0
FD5	3.8	6.5	11.9	14.9	210.0	1.5	11	65.8	7.2	10.2	55.7
FD6	20.9	34.6	63.4	41.5	656.0	1.5	82.4	20.4	1.5	114.0	154.0
FD7	366.0	29.0	51.5	194.0	1480.0	1.5	51.3	64.2	18.3	61.1	301.0
FD8	13.6	10.4	33.9	20.5	614.0	1.5	26.8	27.5	1.5	42.5	128.0
FD9	34.1	41.3	19.6	51.9	540.0	9.0	142	4.4	21.5	1350.0	31.8
FD10	37.9	40.5	22.2	118.0	597.0	8.7	157	5.9	17.7	1510.0	49.2
FD11	9.8	29.5	42.7	34.8	610.0	4.8	113	4.2	7.4	1060.0	28.6
FD12	15.4	28.7	67.8	50.3	903.0	9.7	68.8	18.2	10.1	393.0	86.6
FD13	38.3	41.9	28.8	92.9	663.0	9.7	172	5.6	20.1	1650.0	45.9
Mean	50.8	29.4	37.6	69.8	691.3	5.9	95.1	23.0	13.1	748.1	94.9
Min	3.8	6.5	11.9	14.9	210.0	1.5	11.0	4.2	1.5	10.2	28.6
Max	366.0	41.9	67.8	194.0	1480.0	9.7	172.0	65.8	21.5	1650.0	301.0
Std.Dev	95.4	12.4	18.7	49.1	286.2	3.8	57.3	23.3	7.2	698.5	78.4
CV	1.8	0.4	0.5	0.7	0.4	0.6	0.6	1.1	0.5	0.9	0.8
Upper crust content ^a	4.8	17.3	92.0	28.0	950.0	1.1	47.0	17.0	2.1	97.0	67.0

^a (Rudnick and Gao, 2003)

سلامت استفاده شد. ضریب زمین‌انباشت توسط مولر (Müller,

1969) برای ارزیابی درجه آلودگی پیشنهاد شده است و از رابطه ۱

محاسبه می‌شود:

رابطه ۱:

$$I_{geo} = \log_2(C_n/1.5B_n)$$

ارزیابی کمی آلودگی غبار برجها به عناصر بالقوه سمی

در این پژوهش، برای ارزیابی میزان آلودگی نمونه‌های مورد

بررسی به عناصر بالقوه سمی از ضریب زمین‌انباشت، ضریب

غنی‌شدگی، شاخص بار آلودگی، پتانسیل خطر بوم‌شناختی،

شاخص آلودگی تک عاملی و یکپارچه نمره و شاخص خطر

آلوده و نسبت به عناصر کروم (۱۱/۰۲)، منگنز (۱۸/۵۹)، کبالت (۸/۴۱)، نیکل (۱۱/۳۳)، مس (۹/۹۲)، روی (۱۱/۲۸)، آرسنیک (۶/۵۳)، سرب (۷/۶۸) و وانادیوم (۱۴/۶۳) در رده به شدت آلوده قرار می گیرند. بنابراین، منشأ آلودگی در منطقه کانی زایی آهن به طور طبیعی است و تشدید آلودگی ها به دلیل فعالیت های انسان زاد (معدن کاری و فراوری سنگ آهن) است.

که در آن C_n و B_n به ترتیب غلظت عنصر در نمونه و ماده زمینه و ضریب ۱/۵ ضریب تصحیح تغییرات ناشی از اثر لیتوسفر است (Müller, 1979). در این بررسی، از ترکیب پوسته بالایی (Rudnick and Gao, 2003) به عنوان مقدار زمینه استفاده شد. بر اساس این شاخص (جدول ۲)، نمونه های غبار مورد بررسی نسبت به عنصر مولیبدن (۲/۶۸) در رده آلودگی متوسط تا خیلی آلوده، نسبت به عنصر قلع (۴/۲۰) در رده خیلی آلوده تا به شدت

جدول ۲. شدت آلودگی نمونه های غبار برجا معدن چادرملو بر اساس رده بندی ضریب زمین انباشت (Adamu et al., 2015)

Table 2. The pollution level of the Chadormalu Mine mineral dust samples based on the classification of Geoaccumulation Index (Adamu et al., 2015)

I_{geo} class	I_{geo} value	Pollution level	Elements
0	$I_{geo} \leq 0$	Practically unpolluted	-
1	$0 < I_{geo} \leq 1$	Slightly polluted	-
2	$1 < I_{geo} \leq 2$	Moderately polluted	-
3	$2 < I_{geo} \leq 3$	Moderately to strongly polluted	Mo
4	$3 < I_{geo} \leq 4$	Strongly polluted	-
5	$4 < I_{geo} \leq 5$	Strongly to very strong polluted	Sn
6	$I_{geo} > 5$	Very strong polluted	Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, As, Pb, V

در این بررسی از ترکیب پوسته بالایی (Rudnick and Gao, 2003) به عنوان محیط مرجع و از عنصر آهن به عنوان عنصر مرجع استفاده شد؛ زیرا آهن معمولاً غلظت طبیعی نسبتاً بالایی دارد و انتظار نمی رود که به طور قابل توجهی از منابع انسان زاد غنی شود (Niencheski et al., 1994). ضریب غنی شدگی بین ۰/۵ تا ۱/۲ منشأ طبیعی و ضرایب بیشتر از ۲ (Hernandez et al., 2003) و یا بیشتر از ۳ (Eby, 2004) منشأ انسان زاد را نشان می دهند. جدول ۳ رده بندی ضریب غنی شدگی را نشان می دهد (Loska and Wiechula, 2003).

ضریب غنی شدگی نشان دهنده مقدار افزایش غلظت یک عنصر نسبت به منشأ طبیعی آن (پوسته، سنگ بستر یا خاک) است. ضریب غنی شدگی به طور گسترده برای تعیین منشأ آلاینده ها در هوا، غبار، بارش و سایر نمونه های محیطی استفاده (Reimann and DeCaritat, 2000; Sucharovà et al., 2012) و از رابطه ۲ تعیین می شود (Liu et al., 2014):

رابطه ۲:

$$EF = (C_i/C_r)_{\text{Sample}} / (C_i/C_r)_{\text{Baseline}}$$

در این رابطه، C_i غلظت عنصر i و C_r غلظت عنصر مرجع است.

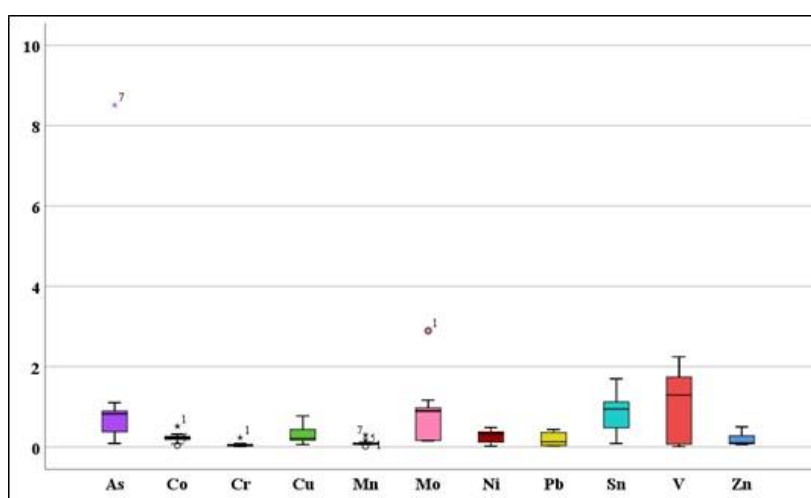
جدول ۳. رده بندی ضریب غنی شدگی نمونه های غبار برجا معدن چادرملو (Loska and Wiechula, 2003)

Table 3. Classification of Enrichment Index of the Chadormalu Mine mineral dust samples (Loska and Wiechula, 2003)

EF class	Enrichment level
EF < 2	Deficiency to minimal enrichment
EF= 2-5	Moderate enrichment
EF= 5-20	Significant enrichment
EF= 20-40	Very high enrichment
EF > 40	Extremely high enrichment

EF) عنصر آرسنیک مقدار غنی شدگی قابل توجهی را نشان می دهد. این نتایج نشان دهنده منشأ زمین زاد برای عناصر مورد بررسی در منطقه است.

با توجه به نتایج به دست آمده (شکل ۲)، نمونه های غبار مورد بررسی نسبت به عناصر بالقوه سمی آرسنیک، کبالت، کروم، مس، نیکل، منگنز، مولیبدن، نیکل، سرب، روی، قلع و وانادیوم، کمبود تا کمترین غنی شدگی را نشان می دهند. ایستگاه FD7 (۸/۵ =



شکل ۲. مقادیر ضریب غنی شدگی عناصر در نمونه های غبار برجا معدن چادرملو

Fig. 2. Enrichment factor values for the elements in mineral dust samples of the Chadormalu Mine

که RI شاخص خطر اکولوژیکی بالقوه مجموع عناصر، E_r^i شاخص خطر بالقوه اکولوژیکی هر عنصر مورد بررسی، T_r^i شاخص سمی بودن عناصر (Xu et al., 2008; Yuan et al., 2014; Wang et al., 2020) (As = 10; Pb = Cu = Ni =)

در این بررسی، شاخص خطر اکولوژیکی بالقوه با استفاده از رابطه ۳ محاسبه شد (Zhang et al., 2018):
رابطه ۳:

$$RI = \sum_i^m E_r^i = \sum_i^m T_r^i \times \left(\frac{C_i}{C_n^i} \right)$$

شده در نمونه غبار مورد بررسی، C_n^i غلظت عنصر مورد نظر در زمینه را نشان می‌دهد. در این بررسی از غلظت عناصر در پوسته بالایی به عنوان عنصر مرجع استفاده شد. رده‌بندی شاخص خطر اکولوژیکی و موقعیت عناصر مورد بررسی در **جدول ۴** ارائه شده است. بر اساس نتایج (**شکل ۳-۱**)، در تمام ایستگاه‌های نمونه‌برداری عناصر کروم، منگنز، نیکل، مس، سرب، وانادیوم و روی خطر اکولوژیکی کم را نشان می‌دهند. آرسنیک خطر اکولوژیکی متوسط را در منطقه مورد بررسی نشان می‌دهد. بر اساس مقادیر شاخص خطر اکولوژیکی بالقوه مجموع عناصر (**شکل ۳-۲**)، ایستگاه‌های نمونه‌برداری FD1 (توده

جنوب شرقی گودال روباز اصلی معدن)، FD3، FD4، FD5 و FD6 (کارخانه فراوری)، FD8، FD9 و FD11 (ایستگاه ریکلایمر) و FD12 (ایستگاه سنگ‌شکن، اولین ایستگاهی که سنگ آهن از معدن استخراج و برای خردایش اولیه به این ایستگاه منتقل می‌شود) شاخص خطر اکولوژیکی کم دارند. ایستگاه FD2 (کارخانه فراوری)، FD10 (ایستگاه ریکلایمر) و FD13 (ایستگاه سنگ‌شکن) دارای خطر اکولوژیکی متوسط بوده و ایستگاه FD7 (ایستگاه ریکلایمر) دارای شاخص خطر زیاد است؛ به طوری که بیشترین مقدار آلودگی و خطر اکولوژیکی بالقوه در ایستگاه FD7 مشاهده شده است.

جدول ۴. شدت خطر نمونه‌های غبار برجا معدن چادرمالو بر اساس رده‌بندی شاخص خطر اکولوژیکی بالقوه (Hakanson, 1980)

Table 4. The hazard level of the Chadormalu Mine mineral dust samples on the basis of the classification of the Potential Ecological Risk (Hakanson, 1980)

E_r^i	Risk level	Elements	RI	Risk level	Elements
$E_r^i < 40$	Low risk	Cr, Mn, Ni, Cu, Zn, Pb, V	$RI < 150$	Low risk	Cr, Mn, Ni, Pb, Zn
$40 \leq E_r^i < 80$	Moderate risk	As	$150 \leq RI < 300$	Moderate risk	Cu, V
$80 \leq E_r^i < 160$	Considerable risk	-	$300 \leq RI < 600$	Considerable risk	-
$160 \leq E_r^i < 320$	Very high risk	-	$RI \geq 600$	Very high risk	As
$E_r^i \geq 320$	Dangerous	-			

عاملی و موقعیت عناصر مورد بررسی را نشان می‌دهد (Zhang et al., 2018).

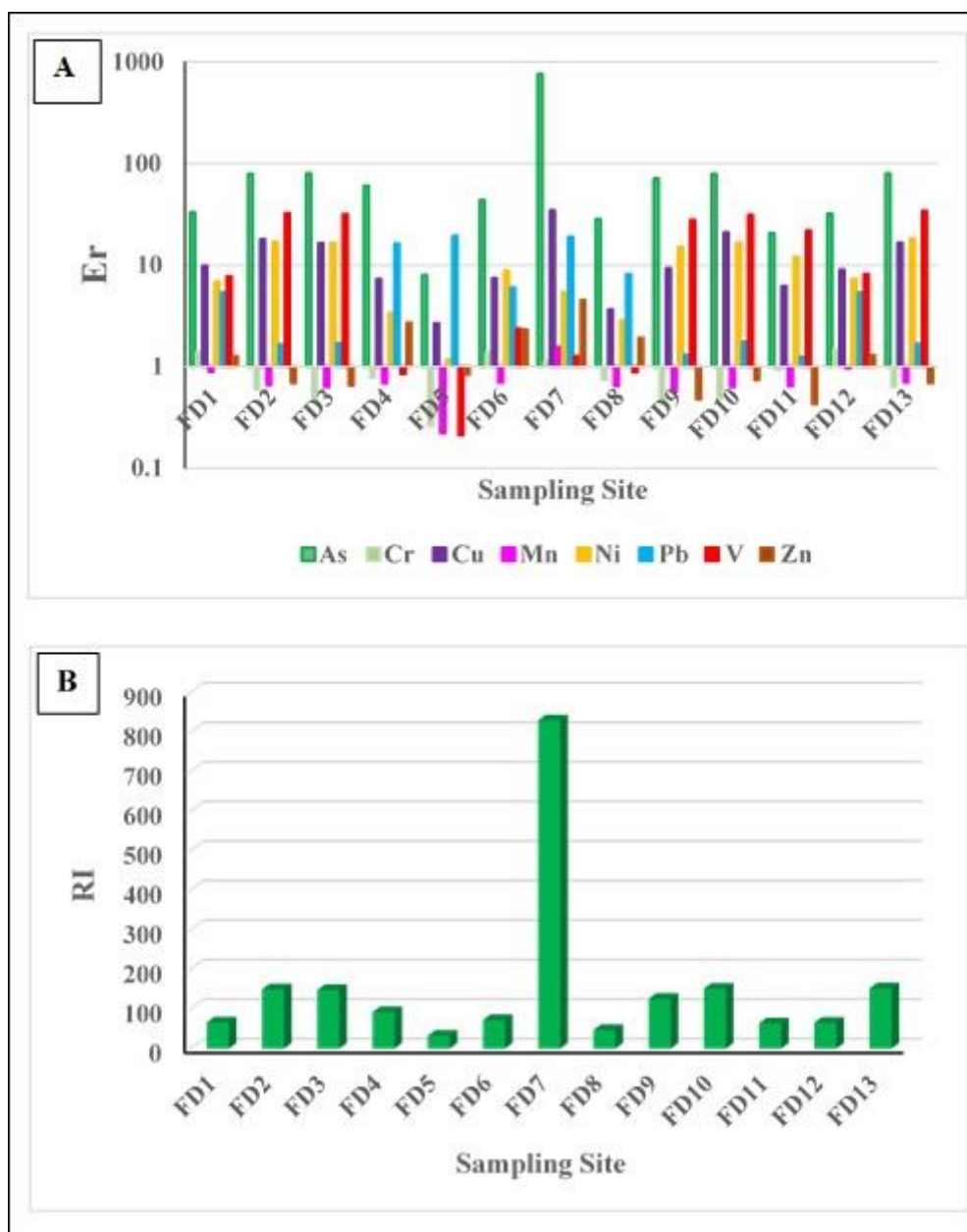
بر اساس این رده‌بندی، نمونه‌های غبار معدن چادرمالو نسبت به عناصر کروم، منگنز و روی بدون آلودگی، نسبت به عناصر کبالت، نیکل، مس و سرب در رده آلودگی کم تا متوسط و نسبت به عناصر آرسنیک، مولیبدن، وانادیوم و قلع در رده آلودگی شدید تا بسیار شدید قرار می‌گیرند (**شکل ۴**).

برای ارزیابی سطح آلودگی عناصر بالقوه سمی از شاخص آلودگی تک عاملی استفاده می‌شود. این شاخص با استفاده از رابطه ۴ محاسبه می‌شود (Baishan et al., 2023):

رابطه ۴:

$P_i = C_i/S_i$

در این رابطه C_i و S_i به ترتیب غلظت عنصر در نمونه غبار و غلظت زمینه (غلظت عناصر در پوسته بالایی (Rudnick and Gao, 2003) است. **جدول ۵** رده‌بندی شاخص آلودگی تک



شکل ۳. A: مقادیر شاخص خطر اکولوژیکی (Er) عناصر و B: شاخص خطر اکولوژیکی بالقوه مجموع عناصر (RI) در نمونه‌های غبار برجا معدن چادرملو

Fig. 3. (A): The values of Ecological Risk Index (Er) of the elements, and B The Potential Ecological Risk Index of the total elements (RI) in the mineral dust samples of the Chadormalu Mine

شاخص آلودگی یکپارچه نمره ابزار مفیدی برای ارزیابی خطر رابطه ۵:

$$NIPi = \sqrt{(P_{imax}^2 + P_{iave}^2/2)}$$

زیست محیطی آلاینده‌هاست. این شاخص با استفاده از رابطه ۵

محاسبه می‌شود (Sawut et al., 2018):

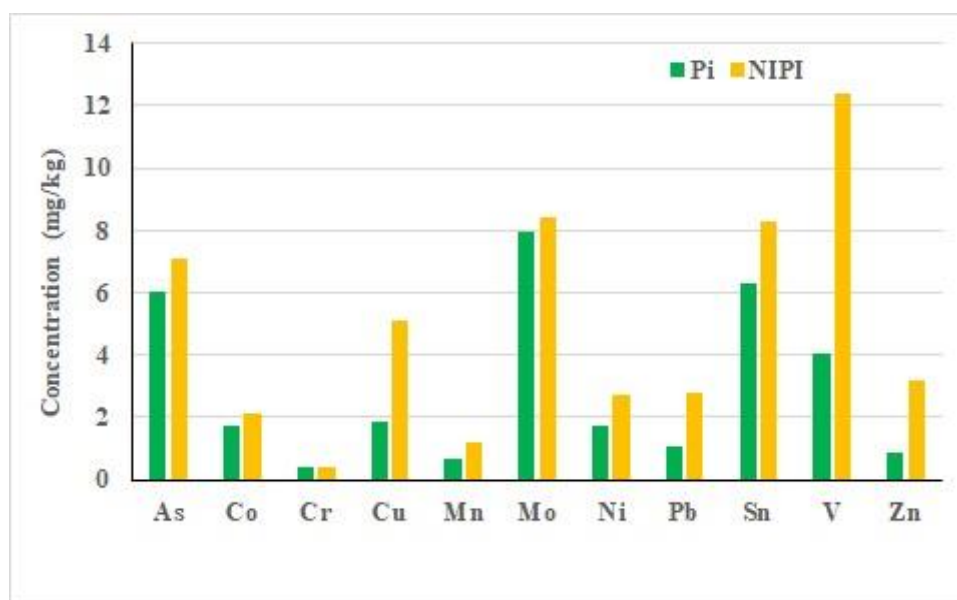
عنصر کروم در رده بدون آلودگی، عنصر منگنز در رده آلودگی کم، عناصر کبالت، نیکل و سرب در رده آلودگی متوسط و عناصر مس، روی، آرسنیک، مولیبدن، قلع و وانادیوم در رده آلودگی شدید قرار می گیرند.

در این رابطه، NIPI شاخص آلودگی یکپارچه نمر و Pi شاخص آلودگی تک عاملی هر عنصر است. رده بندی مقادیر شاخص آلودگی یکپارچه نمر و موقعیت عناصر در **جدول ۵** ارائه شده است (Sawut et al., 2018). بر اساس این شاخص (شکل ۴)،

جدول ۵. رده بندی شاخص آلودگی تک عاملی (Zhang et al., 2018) و شاخص آلودگی یکپارچه نمر (Sawut et al., 2018) در نمونه های غبار برجا معدن چادرملو

Table 5. The classification of the Pollution Index (Zhang et al., 2018) and the Nemerow Integrated Pollution Index (Sawut et al., 2018) for the mineral dust samples of the Chadormalu Mine

Pi	Pollution level	Elements	NIPI	Pollution level	Elements
$Pi \leq 1$	Uncontaminated	Cr, Mn, Zn	$NIPI \leq 0.7$	Clean (safe level)	Cr
$1 < Pi \leq 2$	Low to moderately contaminated	Co, Ni, Cu, Pb	$0.7 < NIPI \leq 1$	Warning limit	-
$2 < Pi \leq 3$	Moderate to heavily contaminated	-	$1 < NIPI \leq 2$	Slight pollution	Mn
$Pi > 3$	Heavy to extremely contaminated	As, Mo, V, Sn	$2 < NIPI \leq 3$	Moderate pollution	Co, Ni, Pb
			$NIPI > 3$	Heavy pollution	Cu, Zn, As, Mo, Sn, V



شکل ۴. مقادیر شاخص آلودگی تک عاملی (Pi) و یکپارچه نمر (NIPI) عناصر در نمونه های غبار برجا معدن چادرملو

Fig. 4. The values of single Factor Pollution Index (Pi) and the Nemerow Integrated Pollution Index (NIPI) of the elements in the mineral dust samples of the Chadormalu Mine

ارزیابی خطر سلامتی

روش ارزیابی خطر سلامت، هم برای بزرگسالان و هم برای کودکان، با استفاده از مدل ارائه شده توسط سازمان حفاظت محیط زیست ایالت متحده که معمولاً برای ارزیابی خطر سرطان‌زایی و غیرسرطان‌زایی استفاده می‌شود، به کار گرفته شد (USEPA, 2001). بر اساس عوامل در معرض قرار گیری، میانگین دوز دریافتی روزانه (ADD) ($\text{mg.kg}^{-1}.\text{day}^{-1}$) یک عنصر از طریق بلع غبار (ADD_{ing})، استنشاق (ADD_{inh}) و تماس پوستی ($\text{ADD}_{\text{dermal}}$) را می‌توان به ترتیب با استفاده از رابطه‌های ۶، ۷ و ۸ محاسبه کرد (USEPA, 1997):

رابطه ۶:

$$\text{ADD}_{\text{ing}} = \frac{C_n \times \text{IngR} \times EF \times ED}{BW \times AT} \times CF$$

رابطه ۷:

$$\text{ADD}_{\text{inh}} = \frac{C_n \times \text{InhR} \times EF \times ED}{PEF \times BW \times AT}$$

رابطه ۸:

$$\text{ADD}_{\text{dermal}} = \frac{C_n \times SA \times AF \times ABS \times EF \times ED}{BW \times AT} \times CF$$

در جدول ۶ مقادیر مرتبط با هر مؤلفه ارائه شده است. خطر غیرسرطان‌زایی عناصر و شاخص خطر از طریق رابطه‌های ۹ و ۱۰ محاسبه می‌شود (Hossen et al., 2021):

رابطه ۹:

$$HQ = \frac{ADD}{RfD}$$

رابطه ۱۰:

$$HI = \sum HQ = HQ_{\text{ing}} + HQ_{\text{inh}} + HQ_{\text{derm}}$$

که در آن، HQ ضریب خطر غیرسرطان‌زایی برای خردسالان و بزرگسالان و RfD بیشترین دوز قابل قبول در معرض قرار گیری روزانه است. مقادیر این مؤلفه برای عناصر مختلف در جدول ۷ ارائه شده است. شاخص خطر (HI) شامل مجموع مقادیر HQ شاخص مناسبی برای ارزیابی خطر کلی غیرسرطان‌زایی برای بیش از یک ماده سمی استفاده می‌شود. اگر $HI < 1$ ، HQ باشد، نشان‌دهنده عدم بروز اثرات سلامتی غیرسرطانی و $HI > 1$ ، HQ نشان‌دهنده بروز اثرات غیرسرطانی است (Ying et al., 2016).

جدول ۶. مؤلفه‌های مورد استفاده در تخمین میانگین دوز دریافتی روزانه برای خطر سرطان‌زایی و غیرسرطان‌زایی در نمونه‌های غباربرجا معدن چادرملو

(USEPA, 2002; Huang et al., 2019)

Table 6. The parameters used in estimating average daily dose for carcinogenic and non-carcinogenic risk in mineral dust samples of the Chadormalu Mine (USEPA, 2002; Huang et al., 2019)

Factor	Description	Unit	Value	
			Adult	Children
C_n	Concentration of Heavy Metals	mg/kg	-	-
IngR	Ingestion Rate	mg/day	100	200
InhR	Inhalation Rate	m^3/day	16.2	7.5
EF	Exposure Frequency	days/year	350	350
ED	Exposure Duration	years	30	6
BW	Body Weight	kg	62.4	21.2
PEF	Particle Emission Factor	m^3/kg	1.36×10^9	1.36×10^9
AT	Average Time	day	$365 \times ED$	$365 \times ED$
SA	Exposed Skin area	cm^2	1600	899
AF	Adherence Factor	$(\text{mg}/(\text{cm}^2/\text{d}))$	0.07	0.20
CF	Conversion Factor	kg.mg^{-1}	1×10^{-6}	1×10^{-6}
ABS	Dermal Absorption Factor	non-dimensional	Pb = Ni = Cu = 0.01; As = 0.03; Cr = Zn = 0.001	

نتایج به دست آمده از ارزیابی خطر سلامت و مقادیر HQ نشان می‌دهد، خطر غیرسرطان‌زایی عناصر بالقوه سمی نیکل، مس، روی و سرب برای بزرگسالان و خردسالان کمتر از ۱ است؛ بنابراین هیچ خطر غیرسرطان‌زایی عناصر بالقوه سمی در نمونه‌های غبار برای بزرگسالان و خردسالان در منطقه مورد بررسی وجود ندارد.

جدول ۷. دوزهای مرجع (RfD) و عامل شیب (SF) مورد استفاده برای خطر سرطان‌زایی و غیرسرطان‌زایی عناصر در نمونه‌های غباربرجها معدن چادرمالو (Zheng et al., 2010; Yang et al., 2021; Hini et al., 2020)

Table 7. The reference dose (RfD) and Slope Factor (SF) for the calculation of carcinogenic and non- carcinogenic risks of the elements in mineral dust samples of the Chadormalu Mine (Zheng et al., 2010; Yang et al., 2021; Hini et al., 2020)

Route	As	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
R _f /D _{ing}	3.00×10^{-4}	3.00×10^{-3}	4.00×10^{-2}	2.00×10^{-2}	3.50×10^{-3}	3.00×10^{-1}
R _f /D _{inh}	1.23×10^{-4}	2.86×10^{-5}	4.00×10^{-2}	2.00×10^{-2}	3.52×10^{-3}	3.00×10^{-1}
R _f /D _{dermal}	3.00×10^{-4}	6.00×10^{-5}	1.20×10^{-2}	5.40×10^{-3}	5.25×10^{-4}	6.00×10^{-2}
SF _{ing}	1.50	0.50	-	-	-	-
SF _{inh}	4.3×10^{-3}	42.0	-	8.40×10^{-1}	-	-
SF _{dermal}	1.50	2.0	-	-	-	-

بر اساس مقادیر HI، خطر سلامتی غیرسرطان‌زایی برای بزرگسالان و خردسالان از طریق مسیر بلعیدن وجود دارد. مقدار HQ و HI تمام عناصر مورد بررسی، برای هر دو گروه بزرگسالان و خردسالان، از طریق مسیر تنفسی و تماس پوستی کمتر از ۱ است (جدول ۸ و شکل ۵) و بنابراین هیچ‌گونه خطر غیرسرطان‌زایی برای عناصر مورد بررسی از مسیرهای تنفس و تماس پوستی، برای هر دو گروه بزرگسالان و خردسالان وجود ندارد. بنابراین، خطر غیرسرطان‌زایی آلودگی عناصر بالقوه سمی برای خردسالان در ناحیه مورد بررسی بیشتر از بزرگسالان است و بیشتر As عامل خطر اصلی برای بزرگسالان و خردسالان است.

جدول ۸. نتایج ارزیابی خطر سلامتی عناصر بالقوه سمی در نمونه‌های غبار برجها معدن چادرمالو

Table 8. The estimated results of health risk assessment for the potentially toxic elements in the mineral dust samples of the Chadormalu Mine

Element	Adults					Children				
	HQ _{ing}	HQ _{inh}	HQ _{derm}	HI	TCR	HQ _{ing}	HQ _{inh}	HQ _{derm}	HI	TCR
As	3.3857	0.0009	0.1137	3.5005	0.0015	19.9313	0.0013	0.5375	20.4702	0.0092
Cr	0.2508	0.0031	0.0140	0.2680	0.0003	1.4766	0.0042	0.0663	1.5472	0.0022
Cu	0.0348	4.15E-06	0.0013	0.0361	-	0.2052	5.65E-06	0.0061	0.2113	-
Ni	0.0949	1.09E-05	0.0039	0.0988	1.89E-07	0.5587	1.49E-05	0.0186	0.5774	2.58E-07
Pb	0.1323	1.56E-05	0.0009	0.1333	-	0.7791	2.13E-05	0.0046	0.7838	-
Zn	0.0063	7.53E-07	3.54E-05	0.0063	-	0.0372	1.02E-06	0.0001	0.0373	-

قبول 1×10^{-6} تا 1×10^{-4} است. چنانچه $CR, TCR < 1 \times 10^{-6}$ باشد، خطر سرطان را می‌توان نادیده گرفت؛ اما زمانی که $1 \times 10^{-4} < CR, TCR >$ باشد، نشان می‌دهد که خطر سرطان‌زایی بالقوه زیادی وجود دارد و باید اقدام‌های لازم برای کاهش خطر انجام شود (Ying et al., 2016). بر اساس نتایج به دست آمده (جدول ۷)، برای عنصر آرسنیک، خطر سرطان‌زایی در بزرگسالان و خردسالان از طریق مسیر بلعیدن وجود دارد. عنصر کروم، از طریق مسیر بلع برای خردسالان دارای خطر سرطان‌زایی است.

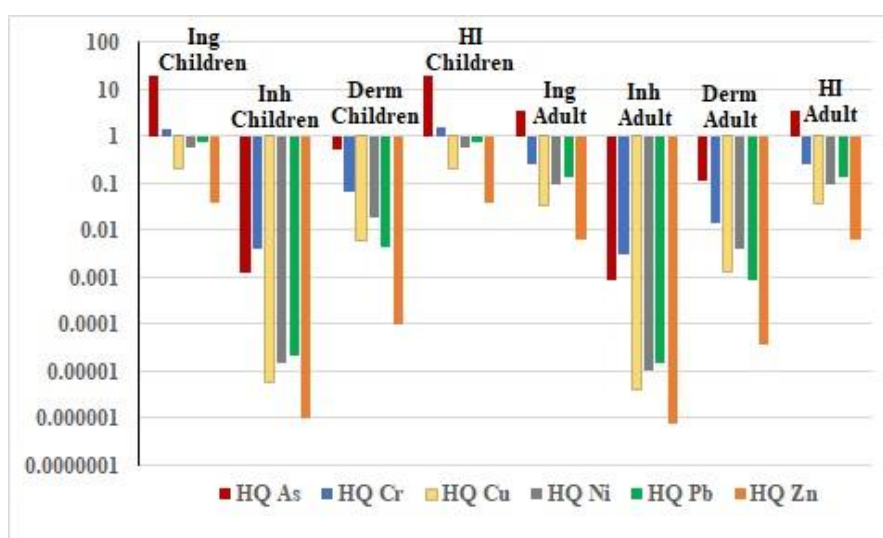
خطر سرطان‌زایی برای هر فرد را می‌توان با رابطه ۱۱ ارزیابی نمود (Hossen et al., 2021):

رابطه ۱۱:

$$CR = ADD \times SF$$

$$TCR = \sum CR = CR_{ing} + CR_{inh} + CR_{derm}$$

که در آن، CR نشان‌دهنده خطر سرطان‌زایی و SF عامل شیب سرطان‌زایی (mg.kg.day) است. بیشینه خطر سرطان‌زایی قابل



شکل ۵. مقادیر ضریب خطر و شاخص خطر عناصر در نمونه‌های غبار برجا معدن چادرمالو

Fig. 5. The values of Hazard Quotient (HQ) and Hazard Index (HI) for the elements in the mineral dust samples of the Chadormalu Mine

برده می‌شود (Reimann et al., 2002). در این بررسی از چرخش واریماکس برای به حداقل رساندن تعداد متغیرها با بارگذاری بالا در هر مؤلفه و تسهیل تفسیر نتایج استفاده شد. عوامل استخراج‌شده بر اساس مقادیر ویژه بزرگ‌تر از ۱ بوده و با چرخش واریماکس با نرمالیزاسیون Kaiser ساده‌تر شده است. نمودار خوشه‌ای نیز روشی مناسب برای طبقه‌بندی تعدادی از متغیرهای اندازه‌گیری شده یا نمونه‌ها به گروه‌هایی است که دارای ویژگی‌ها و رفتار مشابه هستند (Kaufman and Rousseeuw, 2001).

تعیین منشأ عناصر با استفاده از تحلیل‌های آماری

در بررسی‌های زیست‌محیطی ارتباط آماری بین متغیرها می‌تواند اطلاعاتی مناسب در مورد مسیر آلاینده‌ها در محیط ارائه دهد. روابط بین‌عنصری می‌تواند اطلاعاتی در مورد منابع عناصر و رخداد فرایندهای مشابه که ممکن است بر رفتار عناصر حاکم باشد، ارائه دهد (Wang and Qin, 2006). تحلیل مؤلفه اصلی برای تعیین ارتباط بین متغیرها با هدف کاهش ابعاد و توضیح تغییرات در داده‌های چند متغیره با کمترین عوامل ممکن به کار

(Kaufman and Rousseeuw, 2005; 1990). در این پژوهش از تحلیل خوشه‌ای برای گروه‌بندی عناصر بالقوه سمی استفاده شد. برای محاسبه تجزیه خوشه‌ای و تحلیل مؤلفه اصلی بین متغیرهای مورد استفاده در این بررسی از نرم‌افزار IBM SPSS نسخه ۲۶ استفاده شد.

جدول ۹ و شکل ۶ نتایج تحلیل مؤلفه اصلی برای نمونه‌های غبار منطقه مورد بررسی با مقدار بارهای عاملی بزرگ‌تر از ۰/۵۱ را نشان می‌دهد (Garcia et al., 2004). عناصر بالقوه سمی در سه مؤلفه با واریانس کل بیش از ۹۳ درصد قرار گرفتند. مؤلفه اول با مقدار واریانس ۴۵/۵۷ درصد شامل کبالت، نیکل، مولیبدن، وانادیوم و قلع است که نشان‌دهنده منشأ یکسان آزادسازی این عناصر است و می‌تواند به تفاوت در غلظت و همچنین رفتار زمین‌شیمیایی آنها و منشأ سنگ‌شناسی نسبت داده شود.

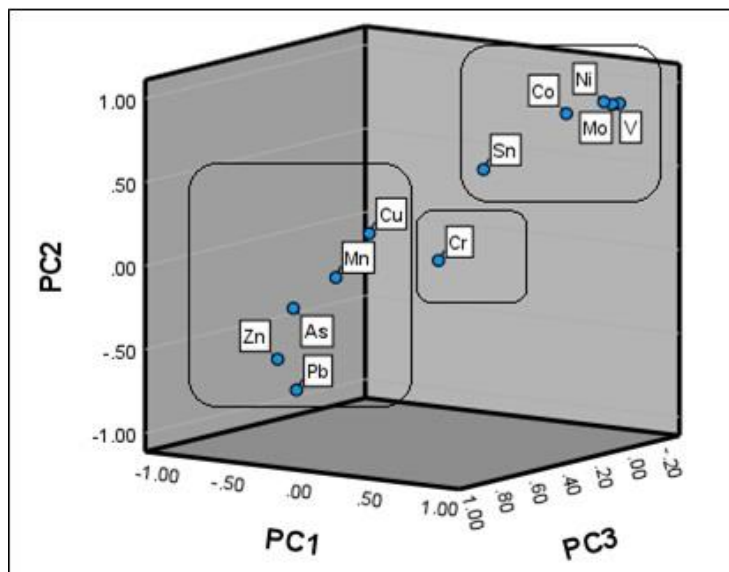
کانی‌های آهن‌دار را می‌توان به عنوان منبع اصلی کبالت به دلیل جایگزینی آمورف آهن با کبالت در نظر گرفت. عناصر کبالت و

نیکل بیشتر در کانی‌های سولفیدی مانند پیریت و پیروتیت به مقدار کم دیده می‌شوند (Rusk et al., 2010). عنصر وانادیوم بیشتر در مگنتیت و به مقدار کمتر در کانی‌های هماتیت و اپیدوت وجود دارد. برخی از فازهای آهن‌دار مانند مگنتیت، هماتیت و اپیدوت معمولاً حاوی مقادیر جزئی آرسنیک، کبالت، نیکل و وانادیوم هستند (Barton, 2014). نتایج حاصل از تحلیل مؤلفه اصلی تا حدودی با شاخص زمین انباشت مطابقت دارد؛ زیرا عناصر کبالت، نیکل، مولیبدن و وانادیوم از کانی‌سازی طبیعی سنگ آهن در منطقه و همچنین منابع انسان‌زاد مانند فعالیت‌های معدنی و فراوری و دفع نامناسب باطله منشأ گرفته‌اند. عناصر مؤلفه دوم ۳۱/۴۵ درصد از واریانس کل شامل مس، منگنز، آرسنیک و روی را توضیح می‌دهد. مس می‌تواند مربوط به کانی‌های سولفیدی مانند پیریت باشد که با ذخایر سنگ آهن همراه است (Dabiri et al., 2017). در مؤلفه سوم عنصر کروم با مقدار واریانس ۱۶/۲۳ درصد قرار می‌گیرد.

جدول ۹. نتایج تحلیل مؤلفه اصلی عناصر در نمونه‌های غبار معدن چادرمالو

Table 9. Results of principal component analysis on elements in the mineral dust samples of the Chadormalu Mine

Rotated component matrix			
Parameters	PC1	PC2	PC3
As	-0.185	0.962	0.006
Co	0.920	0.254	0.004
Cr	-0.078	0.174	0.970
Cu	0.302	0.919	-0.121
Mn	-0.009	0.855	0.486
Mo	0.897	-0.087	-0.005
Ni	0.942	0.046	-0.251
Pb	-0.897	0.333	-0.133
Sn	0.612	0.492	-0.316
V	0.903	-0.039	-0.402
Zn	-0.592	0.708	0.293
% Variance	45.57	31.45	16.23
Cumulative %	45.57	77.03	93.26

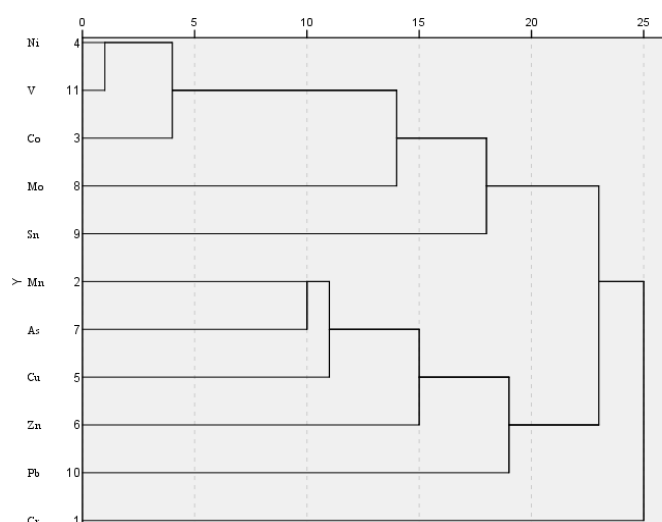


شکل ۶. نمودار سه بعدی مولفه‌های استخراج شده نمونه‌های غبار برجا معدن چادرمالو

Fig. 6. 3d plot of the extracted principal components of the Chadormalu Mine mineral dust

دوم شامل عناصر مس، آرسنیک، منگنز، روی و سرب است که عنصر سرب در این خوشه نسبت به سایر عناصر در فاصله دورتری قرار گرفته است. خوشه دوم نیز تنها شامل فلز کروم است که نتایج حاصل از تحلیل مؤلفه اصلی را تأیید می‌کند.

نمودار تحلیل خوشه‌ای عناصر بالقوه سمی در شکل ۷ نشان داده شده است. بر این اساس، نمودار شامل دو خوشه اصلی است. زیر خوشه اول شامل دو زیرگروه اصلی است: زیرگروه اول شامل عناصر نیکل، وانادیوم، کبالت، مولیبدن و قلع است و می‌توان نتیجه‌گیری کرد که این عناصر دارای منشأ یکسان هستند. زیرگروه



شکل ۷. نمودار خوشه‌ای عناصر بالقوه سمی در نمونه‌های غبار برجا منطقه مورد بررسی

Fig. 7. The cluster analysis of potentially toxic elements in the mineral dust samples of studied area

نتیجه گیری

در این پژوهش، ارزیابی شدت آلودگی ذرات غبار برجها به عناصر بالقوه سمی (کروم، منگنز، کبالت، نیکل، مس، روی، آرسنیک، مولیبدن، سرب، قلع و وانادیوم)، تعیین منشأ این عناصر و خطر سلامت ناشی از قرارگیری در معرض غبار آلوده در معدن آهن چادرملو، شمال شرق یزد مورد بررسی قرار گرفت. بررسی غلظت کل عناصر سمی در نمونه های غبار برجها معدن آهن چادرملو نشان می دهد، میانگین غلظت عناصر کبالت، نیکل، مس، روی، آرسنیک، مولیبدن، قلع، سرب و وانادیوم نسبت به میانگین غلظت عناصر در پوسته بالایی غنی شدگی دارند؛ در حالی که عناصر کروم و منگنز غنی شدگی نشان نمی دهند؛ زیرا کانسارهای غنی از مگنتیت به طور کلی از کروم و منگنز تهی و از عناصری مانند کبالت و نیکل غنی هستند. محاسبه ارزیابی خطر بالقوه زیست محیطی در نمونه های غبار برجها نشان می دهد ذرات غبار مورد بررسی نسبت به آرسنیک دارای خطر اکولوژیکی بسیار زیاد هستند. نتایج حاصل از ارزیابی خطر سلامتی، بیانگر خطر سرطانزایی عنصر آرسنیک برای بزرگسالان و خردسالان و عنصر کروم برای خردسالان از طریق مسیر بلعیدن است. خطر غیرسرطانزایی عناصر برای خردسالان بیشتر از بزرگسالان است و

عنصر آرسنیک عامل خطر اصلی است. بنابراین با ورود این عناصر سمی به بدن از راه تنفس، بلعیدن و تماس پوستی می توانند به جریان خون و اندام های هدف رفته و باعث سمناکی این اندام ها شوند. نتایج به دست آمده از شاخص های آلودگی در منطقه مورد بررسی نشان می دهد، آلودگی عناصر بالقوه سمی بیشتر ناشی از کانی سازی سنگ آهن طبیعی و انتشار ناشی از فعالیت های فراوری سنگ آهن و باطله است که به افزایش خطرات بالقوه برای سلامت انسان و محیط زیست منجر می شود.

قدردانی

از همکاری شرکت صنعتی و معدنی چادرملو به ویژه جناب آقای مهندس محمودی کمال تشکر را داریم. نویسندگان مقاله از پروفیسور ماینهولد از دانشگاه فرایبورگ آلمان برای انجام تجزیه های زمین شیمیایی تقدیر و تشکر می نمایند. همچنین از هیئت تحریریه محترم نشریه زمین شناسی اقتصادی و داوران گرامی قدردانی می شود.

تعارض منافع

هیچ گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

1. Cambrian Volcanosedimentary unit, CVSU
2. Certified Reference Materials, CRMs

References

- Adamu, C.I., Nganje, T.N. and Edet, A.E., 2015. Major and trace elements pollution of sediments associated with abandoned barite mines in parts of Oban massif and Mamfe embayment, SE Nigeria. *Journal of Geochemical Exploration*, 151: 17–33. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2014.12.010>
- Baishan, K., Wang, X., Huang, X. and Eziz, M., 2023. Health Risk Assessment and Source Analysis of Toxic Element Pollution In Cultivated Soils of the Weigan and Kuqa Rivers Oasis in Xinjiang, China. *Polish. Journal of Environmental studies*, 32(4): 3501–3514. <https://doi.org/10.15244/pjoes/166167>
- Banza, C.L.N., Nawrot, T.S., Haufried, V., Decrée, S., De Putter, T., Smolders, E., Kabyla, B.I., Luboya, O.N., Ilunga, A.N., Mtombo, A.M. and Nemery, B., 2009. High human exposure to cobalt and other metals in Katanga, a mining area of the Democratic Republic of Congo. *Environmental Research*, 109(6): 745–752. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2009.04.012>
- Barton, M.D., 2014. Iron oxide (Cu-Au-REE-P-Ag-U-Co) systems. *Treatise on Geochemistry* (Second Edition), V. 13, pp. 515–541. <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-08-095975-7.01123-2>
- Boumaza, B., Kechiched, R. and Chekushina, T.V., 2021. Trace metal elements in phosphate rock wastes from the Djebel Onk mining area (Tébessa, eastern Algeria): A geochemical study and environmental implications. *Applied Geochemistry*, 127: 104910. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2021.104910>
- Chau, N., Benamghar, L., Pham, Q.T., Teculescu, D., Rebstock, E. and Mur, J.M., 1993. Mortality of iron miners in Lorraine (France): Relations between lung function and respiratory symptoms and subsequent mortality. *British Journal of Industrial Medicine*, 50(11): 1017–1031. <https://doi.org/10.1136/oem.50.11.1017>
- Chen, S.Y., Hayes, R.B., Liang, S.R., Li, Q.G., Stewart, P.A. and Blair, A., 1990. Mortality experience of haematite mine workers in China. *British Journal of Industrial Medicine*, 47(3): 175–181. <https://doi.org/10.1136/oem.47.3.175>
- Dabiri, R., Bakhshi Mazdeh, M. and Mollai, H., 2017. Heavy metal pollution and identification of their sources in soil over Sangan iron-mining region, NE Iran. *Journal of Mining and Environment*, 8(2): 277–289. <https://doi.org/10.22044/jme.2016.820>
- Daliran, F., 2002. Kiruna-type iron oxide-apatite ores and apatites of the Bafq district, Iran, with an emphasis on the REE geochemistry of their apatites. In: T.M. Porter, (Editor), *Hydrothermal Iron Oxide Copper-Gold and Related Deposits: A Global Perspective*, vol. 2. PGC Publishing, Adelaide, pp. 303–320. Retrieved June 23, 2025 from <https://www.geokniga.org/bookfiles/geokniga-19bafq-district-irandaliran.pdf>
- Daliran, F., Stosch, H.-G., Williams, P.J., Jamali, H. and Dorri, M.B., 2010. Early Cambrian iron oxide-apatite-REE (U) deposits of the Bafq district, East-Central Iran. In: Co. Louise and M. Hamid (Editors), *Exploring for Iron Oxide Copper-Gold (Ag-Bi-Co-U) Deposits: Examples from Canada and Global Analogues*, pp. 147–160. Retrieved June 23, 2025 from <https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=1942458>
- Dou, Y., Li, J., Zhao, J., Hu, B. and Yang, S., 2013. Distribution, enrichment and source of heavy metals in surface sediments of the eastern Beibu Bay, South China Sea. *Marine Pollution Bulletin*, 67(1–2): 137–145. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2012.11.022>
- Eby, G.N., 2004. *Principles of environmental geochemistry*. Brooks/Cole, Australia, 514 pp.
- Ettler, V., Cihlová, M., Jarošíková, A., Mihaljevič, M., Drahot, P., Kříbek, B., Vaněk, A., Penížek, V., Sracek, O. and Klementová, M., Engel, Z., Kamona, F. and Mapani, B., 2019. Oral bioaccessibility of metal (loid) s in dust materials from mining areas of northern Namibia. *Environment International*, 124: 205–215. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.12.027>
- Garcia, J.H., Li, W.W., Arimoto, R., Qkarasinski, R., Greenlee, J. and Walton, J., 2004. Characterization and implication of potential fugitive dust sources in the Paso del Norte region. *Science of the Total Environment*, 325(1–3): 95–112. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2003.11.011>
- Haghipour, A., 1977. Geological map of Posht-eBadam, Scale 1:250,000. Geological Survey of Iran.
- Hakanson, L., 1980. An ecological risk index for aquatic pollution control: a sedimentological

- approach. *Water Research*, 14(8): 975–1001.
[https://doi.org/10.1016/0043-1354\(80\)90143-8](https://doi.org/10.1016/0043-1354(80)90143-8)
- Heidarian, H., Alirezaei, S. and Lentz, D.R., 2017. Chadormalu Kiruna-type magnetite-apatite deposit, Bafq district, Iran: Insights into hydrothermal alteration and petrogenesis from geochemical, fluid inclusion, and sulfur isotope data. *Ore Geology Reviews*. 83: 43–62.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.11.031>
- Hernandez, L., Probst, A., Probst, J. L. and Ulrich, E., 2003. Heavy metal distribution in some French forest soils: evidence for atmospheric contamination. *Science of the Total Environment*, 312(1–3): 195–219.
[https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(03\)00223-7](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(03)00223-7)
- Hini, G., Eziz, M., Wang, W., Ili, A. and Li, X., 2020. Spatial distribution, contamination levels, sources, and potential health risk assessment of trace elements in street dusts of Urumqi city, NW China. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 26(8): 2112–2128.
<https://doi.org/10.1080/10807039.2019.1651629>
- 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>
- Huang, B., Long, J., Liao, H., Liu, L., Li, J., Zhang, J., Li, Y., Wang, X. and Yang, R., 2019. Characteristics of Bacterial Community and Function in Paddy Soil Profile around Antimony Mine and Its Response to Antimony and Arsenic Contamination. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(24): 4883.
<https://doi.org/10.3390/ijerph16244883>
- Kani Kavan Shargh Consulting Engineers Company, 2021. Engineering services on mining observation and operation of Chadormalu Iron Ore Mine. Chadormalu Mining and Industrial Company. Project No, 1482.
- Kaufman, L. and Rousseeuw, P.J., 1990. Finding Groups in Data. An Introduction to Cluster Analysis. John Wiley and Sons, Inc., New York. 342 pp. <https://doi.org/10.1002/9780470316801>
- Kaufman, L. and Rousseeuw, P.J., 2005. Finding Groups in Data: An Introduction to Cluster Analysis. John Wiley and Sons, Inc., New York. 368 pp.
<http://dx.doi.org/10.1002/9780470316801.ch1>
- Khelifi, F. Caporale, A.G., Hamed, Y. and Adamo, P., 2021. Bioaccessibility of potentially toxic metals in soil, sediments and tailings from a North Africa phosphate-mining area: Insight into human health risk assessment. *Journal of Environmental Management*, 279: 111634.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111634>
- Křibek, B., Majer, V., Pašava, J., Kamona, F., Mapani, B., Keder, J. and Ettler, V., 2014. Contamination of soils with dust fallout from the tailings dam at the Rosh Pinah Area, Namibia: Regional assessment, dust dispersion modeling and environmental consequences. *Journal of Geochemical Exploration*, 144(Part C): 391–408.
<https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2014.01.010>
- Liu, E., Yan, T., Birch, G. and Zhu, Y., 2014. Pollution and health risk of potentially toxic metals in urban road dust in Nanjing, a mega-city of China. *Science of the Total Environment*, 476–477: 522–531.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.01.055>
- Loska, K. and Wiechuya, D., 2003. Application of principle component analysis for the estimation of source of heavy metal contamination in surface sediments from the Rybnik Reservoir. *Chemosphere*, 51(8): 723–33.
[http://dx.doi.org/10.1016/S0045-6535\(03\)00187-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0045-6535(03)00187-5)
- Moghtaderi, A., 2006. Geology and geochemistry of Chadormalu iron mine, southeast of Yazd, northeast of Bafq. Ph.D. Thesis, Shiraz University, Shiraz, Iran, 346 pp.
- Müller, G., 1969. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River. *GeoJournal* 2(3): 108–118. Retrieved June 23, 2025 from https://www.researchgate.net/publication/303060644_Index_of_geoaccumulation_in_sediments_of_the_Rhine_River
- Müller, G., 1979. Schwermetalle in den Sedimenten des Rheins-Veränderungen seit 1971. *Umschau*, 79: 778–783. Retrieved June 23, 2025 from <https://www.scirp.org/reference/ReferencesPapers?ReferenceID=792349>
- Niencheski, L.F., Windom, H.L. and Smith, R., 1994. Distribution of particulate trace metal in Patos Lagoon Estuary (Brazil). *Marine Pollution Bulletin*, 28(2): 96–102.
[http://dx.doi.org/10.1016/0025-326X\(94\)90545-2](http://dx.doi.org/10.1016/0025-326X(94)90545-2)

- NISCO., 1980. Result of search and valuation works at magnetic anomalies of the Bafq iron ore region during 1976-1979. National Iranian Steel Corporation, Iran, Unpublished Report, 260 pp.
- Plumlee, G.S., Morman, S. A. and Ziegler, T.L., 2006. The toxicological geochemistry of earth materials: An Environ Geochem Health 123 overview of processes and the interdisciplinary methods used to understand them. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 64(1): 5–57. <https://doi.org/10.2138/rmg.2006.64.2>
- Ramezani, J., 1997. Regional geology, geochronology and geochemistry of the igneous and metamorphic rock suites of the Saghand Area, central Iran: Unpublished Ph.D. Thesis, St. Louis, Missouri, Washington University, 416 pp.
- Ramezani, J. and Tucker, R.D., 2003. The Saghand region, Central Iran: U-Pb geochronology, petrogenesis and implications for Gondwana tectonics. *American Journal of Science*, 303(3): 622–665. <http://dx.doi.org/10.2475/ajs.303.7.622>
- Reimann, C. and DeCaritat, P., 2000. Intrinsic flaws of element enrichment factor (EFs) in environmental geochemistry. *Environmental Science and Technology*, 34(24): 5084–5091. <https://doi.org/10.1021/es001339o>
- Reimann, C., Filzmoser, P. and Garrett, R.G., 2002. Factor analysis applied to regional geochemical data: problems and possibilities. *Applied Geochemistry*, 17(3): 185–206. [https://doi.org/10.1016/S0883-2927\(01\)00066-X](https://doi.org/10.1016/S0883-2927(01)00066-X)
- Rudnick, R.L. and Gao, S., 2003. Composition of the continental crust. *Treatise on Geochemistry*, 3: 1–64. <http://doi.org/10.1016/B0-08-043751-6/03016-4>
- Rusk, B., Oliver, N., Cleverley J., Blenkinsop, T., Zhang, D., Williams, P. and Habermann, P., 2010. Physical and chemical characteristics of the Ernest Henry iron oxide copper gold deposit, Australia; implications for IOGC genesis. *Global Perspective Series*, 3. PGC Publishing, Linden Park, SA, Australia, pp. 201–218. Retrieved June 23, 2025 from <https://researchonline.jcu.edu.au/18884>
- Sawut, R., Kasim, N., Maihemuti, B., Hu, L., Abliz, A., Abdujappar, A. and Kurban, M., 2018. Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in the Vegetable Bases of Northwest China. *Science of the Total Environment*, 642: 864–878. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.034>
- Singh, G., Pal, A. and Khoiyanbam, R.S., 2009. Impact of mining on human health in and around Jhansi, Bundelkhand region of Uttar Pradesh, India. *Journal of Ecophysiology and Occupational Health*, 9(1): 47–54. Retrieved June 23, 2025 from <https://www.researchgate.net/publication/364958597>
- Smolders, E., Roels, L., Kuhangana, T.C., Coorevits, K., Vassilieva, E., Nemery, B. and Lubaba Nkulu, C.B., 2019. Unprecedentedly high dust ingestion estimates for the general population in a mining district of DR Congo. *Environmental Science and Technology*, 53(13): 7851–7858. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b01973>
- Soltani, N., 2017. Medical Geology and Environmental Impact Associated with Mining and Mineral Processing in Gol-E-Gohar Iron Mine, Sirjan. Ph.D. Thesis, Shiraz University, Shiraz, Iran, 246 pp.
- Stöcklin, J., 1971. Stratigraphic Lexicon of Iran; Part 1. Central, North and East Iran. *Geologic Survey of Iran*, Tehran, 338 pp.
- Sucharovà, J., Suchara, I., Hola, M., Marikova, S., Reimann, C., Boyd, R., Filzmoser, P. and Englmaier, P., 2012. Top-/bottomsoil ratios and enrichment factors: What do they really show? *Applied Geochemistry*, 27(1): 138–145. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2011.09.025>
- Torab, F.M., 2008. Geochemistry and metallogeny of magnetite-apatite deposits of the Bafq mining district, central Iran. Unpublished Ph.D. Thesis, Clausthal University of Technology, Germany.
- Torab, F.M. and Lehmann, B., 2006. Iron oxide-apatite deposits of the Bafq district, Central Iran: an overview from geology to mining. *World of Mining- Surface and Underground*, 58(6): 355–362. Retrieved June 23, 2025 from <https://sciexplore.ir/Documents/Details/816-174-421-583>
- Torab, F. M. and Lehmann, B., 2007. Magnetite-apatite deposits of the Bafq district, Central Iran: apatite geochemistry and monazite geochronology. *Mineralogical Magazine*, 71(3): 347–363. <https://doi.org/10.1180/minmag.2007.071.3.347>
- USEPA, 1997. Exposure Factors Handbook; Office of Research and Development, National Center

- for Environmental Assessment, U.S. Environmental Protection Agency. Washington, D.C, USA. Retrieved June 23, 2025 from <https://cfpub.epa.gov/ncea/efp/recordisplay.cfm?deid=236252>
- USEPA, 2001. Supplemental Guidance for Developing Soil Screening Levels for Superfund Sites. OSWER 9355, US Environmental Protection Agency, Washington DC, 4–24. Retrieved June 23, 2025 from <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyNET.exe/91003IJK>
- USEPA, 2002. Supplemental Guidance for Developing Soil Screening Levels for Superfund Sites. Office of Solid Waste and Emergency Response: Washington, DC 20460. Retrieved June 23, 2025 from <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyNET.exe/91003IJK>
- Wang, F., Guan, Q., Tian, J., Lin, J., Yang, Y., Yang, L. and Pan, N., 2020. Soil enzyme kinetics indicate ecotoxicity of long-term arsenic pollution in the soil at field scale. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 191: 110215. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.110215>
- Wang, X.S. and Qin, Y., 2006. Spatial distribution of metals in urban topsoils of Xuzhou (China): controlling factors and environmental implications. *Environmental Geology*, 49(6): 905–914. <https://doi.org/10.1007/s00254-005-0122-z>
- Wild, P., Bourgkard, E. and Paris, C., 2009. Lung cancer and exposure to metals: The epidemiological evidence. *Cancer Epidemiology: Modifiable Factors*, 472: 139–167. https://doi.org/10.1007/978-1-60327-492-0_6
- Xu, Z., Ni, S., Tuo, X. and Zhang, C., 2008. Calculation of heavy metals' toxicity coefficient in the evaluation of potential ecological risk index. *Environmental Science & Technology*, 2(8): 31. <http://doi.org/10.19672/j.cnki.1003-6504.2008.02.030>
- Yang, X.Y., Ezizi, M., Ismayil, A. and Hayrat, A., 2021. Assessment of Pollution and Health Risks of Heavy Metals in Surface Dust in Changji City, Xinjiang. *Environmental Science & Technology*, 44(5): 211. Retrieved June 23, 2025 from <https://www.sciengine.com/AJE/doi/10.7524/AJE.1673-5897.20200203001>
- Ying, L., Shaogang, L. and Xiaoyang., 2016. Assessment of heavy metal pollution and human health risk in urban soils of a coal mining city in East China. *HUMAN AND ECOLOGICAL RISK ASSESSMENT*, 22(6): 1359–1374. <https://doi.org/10.1080/10807039.2016.1174924>
- Yuan, G.L., Sun, T.H., Han, P., Li, J. and Lang, X.X., 2014. Source identification and ecological risk assessment of heavy metals in topsoil using environmental geochemical mapping: typical urban renewal area in Beijing, China. *Journal of Geochemical Exploration*, 136: 40–47. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2013.10.002>
- Zhang, Y., Li, S., Wang, F., Chen, Z., Chen, J. and Wang, L., 2018. An Innovative Expression Model of Human Health Risk Based on the Quantitative Analysis of Soil Metals Sources Contribution in Different Spatial Scales. *Chemosphere*, 207: 60–69. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.04.157>
- Zheng, N., Liu, J.S., Wang, Q.C. and Liang, Z.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 (4): 726–33. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2009.10.075>