



University of Tehran Press

Journal of Environmental Studies

Vol. 49, No. 1, Spring 2023

Journal Homepage: www.Jes.ut.ac.ir

Print ISSN: 1025-8620 Online ISSN 2345-6922

Assessing the Toxicity and Related Health Risks of Potentially Toxic Elements (Zn, Pb, Cd, and Cr) in the Roadside Soils of City of Hamedan

Soheil Sobhanardakani¹, Nayereh Sadat Hosseini²

1. Corresponding Author, Department of Environmental Science and Engineering, College of Basic Sciences, Hamedan Branch, Islamic Azad University, Hamedan, Iran, E-mail: s_sobhan@iauh.ac.ir
2. Department of Environmental Science and Engineering, College of Basic Sciences, Hamedan Branch, Islamic Azad University, Hamedan, Iran, E-mail: ny_hosseini@iauh.ac.ir

Article Info

Research Article:

Research Paper

Article history:

Received 30 October 2022

Received in revised form

21 January 2023

Accepted 7 February 2023

Publish online 15 February 2023

Keywords:

Carcinogenic risk

Hamedan

Road transportation

Toxic elements

Traffic

ABSTRACT

The road transportation has become one of the major metal contamination sources that could impact on roadside soils. Therefore, this study was conducted to evaluate the toxicity and related health implications of roadside contaminated soils with potentially toxic elements (Zn, Pb, Cd, and Cr) in city of Hamedan, west of Iran. In so doing, a total of 63 surface soil samples were collected along 700 m of a 9 km segment of the three major highways (i.e., Goltepeh (G), Razen (R) and Kermanshah (K)) in Hamedan Province. After acid digestion of samples in the laboratory, the Zn, Pb, Cd, and Cr contents were determined using inductively coupled plasma optical emission spectroscopy (ICP-OES). The computed values of the Nemrow integrated pollution index (NIPI) showed that the pollution of all the analyzed elements in the highways with higher traffic volume (i.e. R and K) could be classified as "severe", indicating that effect of human activities, especially with the traffic origin. Also, based on the mean values of the toxic risk index (TRI) of the elements, the soil samples could be classified as 'non-toxicity'. Besides, the non-carcinogenic risk index (HI) values of the tested elements suggested that the HI could be classified as 'low risk' for both children and adults. Moreover, the carcinogenic risk (CR) of Cr was at a tolerable level for both children and adults, while Pb and Cd have been shown no significant carcinogenic risk. In conclusion, it is suggested that contaminated soil analyses be included in future studies in order to maintain environmental and human health.

Cite this article: Sobhanardakani, S., Hosseini, N. S. (2023). Assessing the Toxicity and Related Health Risks of Potentially Toxic Elements (Zn, Pb, Cd, and Cr) in the Roadside Soils of City of Hamedan. *Journal of Environmental Studies*, 49 (1), 71- 90. DOI: <http://doi.org/10.22059/JES.2023.350468.1008366>

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.



DOI: <http://doi.org/10.22059/JES.2023.350468.1008366>

Extended Summary

Introduction

Roadside soils, as a source and sink of metal elements, are always exposed to pollutant emissions from traffic which due to the lower dynamics, durability and longer survival of elements compared to air and water, the contamination is more important.

Therefore, surface soil is one of the most important factors affecting human health as a suitable indicator of heavy metal pollution caused by airborne dust, which is directly via soil ingesting, inhalation of soil particles, and dermal contact is considered as a health threat for humans. Hence, assessment of pollution and related risks of potentially toxic elements in roadside soils has received increasing attention over the recent decade. Generally, as there are very few studies regarding the evaluation of the pollution and health risk of PTEs of surface soils along the main roads of Iran; the current study was conducted with the aim of assessing the risk of toxicity and related health implications of Zn, Pb, Cd and Cr in the roadside soils of city of Hamedan.

Materials and Methods

In this descriptive cross-sectional study, the three most important access roads between the Hamedan Province and the western and central provinces of Iran, i.e., Goltapeh (G) with about 2420 vehicle traffic per day, Razan (R), with about 7120 vehicle traffic per day, and Kermanshah (K) with about 14800 vehicle traffic per day, were selected to assess of environmental and human health risks of road-related metal pollution. In so doing, a total of 63 surface soil samples were collected along 700 m of a 9 km segment of the G, R and K highways. After acid digestion of samples in the laboratory, the contents of analyzed elements were determined using inductively coupled plasma optical emission spectroscopy (ICP-OES). The Nemrow Integrated Pollution Index (NIPI), mean effect range median quotient (TRI_i and TRI_T), hazard quotient (HQ) and carcinogenic risk (CR) indices were also calculated. The experimental data were analyzed using SPSS software.

Results and Discussion

The results showed that the maximum levels of Zn (122 mg/kg), Cd (0.320 mg/kg) and Cr (17.3 mg/kg) were found in the samples collected from the R site, and the maximum amount of Pb with 26.4 mg/kg belonged to K site, and were significantly higher than those in G site ($p < 0.050$). This result showed the effect of traffic density on soil contamination. Also, the average concentrations of the elements in soil samples decreased in the order of $Zn > Pb > Cr > Cd$.

The Nemrow Pollution Index is a useful and suitable tool for integrated assessment of soil quality. The computed values of NIPI showed that soil contamination with analyzed elements in the sampling sites with high traffic intensity (i.e., R and K) categorized was "severe", indicating the effect of anthropogenic activities.

The results obtained from the TRI_i of Zn, Pb, Cd, and Cr with 0.401, 0.361, 0.212, and 0.277, respectively, represented none of the analyzed elements have not been shown toxic risk ($TRI_i < 5$). Also, the average values of index decreased in the order $Cr > Cd > Pb > Zn$. Besides, the TRI_T values associated with all analyzed elements also confirmed that the soils of all sampling sites (0.679 for G, 1.76 for R, and 1.81 for K) had been no toxic risk ($TRI_T < 5$). However, soil specimens of the R and K sites had higher risk index values than site G. Also, Zn with 32% of the mean values of TRI_T showed significant potential to occurrence the toxic risk, therefore, source apportionment and control of emission sources of this element in the roadside ecosystem is crucial.

Based on the calculated values of HQs for all the analyzed elements, no significant and serious non-carcinogenic risk were observed via ingestion, inhalation, and dermal exposure routes for both children and adults. Also, the results showed that ingestion of soil particles was found to be the main pathway of exposure to PTEs for non-carcinogenic risk. Indeed, ingestion contributed about 99.8% of the total hazard index (the average of three highways) and inhalation only contributes about 0.18% for children; compared to ingestion and inhalation, the effect of dermal contact (about 0.02% to the total HI) is insignificant and totally unlikely to pose any significant risk. The results also demonstrated that Pb and Cr contributed 94% of the total HI values for both age groups, at the sampling sites; however, at the K site, Pb had the greatest contribution to the total HI (an average of 56%). This suggests that the probable non-carcinogenic toxicological effects were driven mainly by the mentioned elements (i.e., Pb and Cr). Chromium is the vital and essential element for biological functions, which in the case of chronic or over exposure by ingestion or inhalation can cause skin irritation, neurological, digestive, and cardiovascular disorders. On the other hand, Pb affects many human body organ functions and may cause neurologic, respiratory, cardiovascular, digestive, and urinary diseases.

The results illustrated that no carcinogenic risk was observed via the inhalation route as the CR_{inh} values were all less than the threshold standard of 1×10^{-6} ; however, carcinogenic risk through ingestion poses a serious and considerable threat, especially for Cr that had the CR_{ing} values higher than 1×10^{-6} in all three sites. Meanwhile, among the three

analyzed elements, the total carcinogenic risk of Cr with TCR values exceeding 1×10^{-6} for both children and adults, suggesting tolerable or acceptable carcinogenic risk level. The TCR values of other elements for both groups were less than 10^{-6} , indicating no considerable carcinogenic risk of Pb and Cd in the studied soil samples of all three sites. Besides, carcinogenic risk cause by Cr contributed 98.4% of the total TCR for children and adults (the mean from all sampling sites).

Conclusions

Based on the results obtained, the soils in the vicinity of highways with higher traffic density, R and K sites, clearly showed the highest contamination with metals. This suggests that the increasing traffic volume has ineluctably contributed to metal contamination in roadside soil due to exhaust and non-exhaust emissions. The computed values of the NIPI showed that pollution of Zn, Pb, Cd, and Cr in the sampling sites with high traffic (i.e., R and K) was "severe". Also, the mean values of the TRI_i of the elements indicated that soil samples were categorized as 'non-toxicity'. The Zn with 32% of the mean values of TRI_T showed significant potential to occurrence the toxic risk, therefore, regular monitoring and health risk assessment of contaminated soils with this element is recommended in order to maintain the health of the environment and humans. Moreover, although the studied groups showed a risk of lower than the U.S.EPA limits, and no adverse health effects were expected through exposure to PTEs, these kinds of studies can clarify the main ways of being exposed to PTEs as well as providing a scientific basis for attempts for mitigating the PTEs emission in roadside biotopes.



ارزیابی سمیت و خطر سلامت مرتبط با عناصر بالقوه سمی (روی، سرب، کادمیم و کروم) خاک حاشیه جاده‌های شهر همدان

سهیل سبحان اردکانی^۱✉، نیره السادات حسینی^۲

۱. نویسنده مسئول، گروه علوم و مهندسی محیط‌زیست، دانشکده علوم پایه، واحد همدان، دانشگاه آزاد اسلامی، همدان، ایران. رایانامه: s_sobhan@iauh.ac.ir
۲. گروه علوم و مهندسی محیط‌زیست، دانشکده علوم پایه، واحد همدان، دانشگاه آزاد اسلامی، همدان، ایران. رایانامه: ny_hosseini@iauh.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	حمل و نقل جاده‌ای به یکی از منابع اصلی آلودگی فلزی تبدیل شده است که می‌تواند بر خاک‌های کنار جاده‌ها تأثیر بگذارد. از این رو، در پژوهش حاضر، به منظور ارزیابی خطر سمیت و سلامت مرتبط با عناصر بالقوه سمی (روی، سرب، کادمیم و کروم) خاک حاشیه جاده‌های شهر همدان، پس از برداشت ۶۳ نمونه خاک سطحی در طول ۷۰۰ متر از یک قطعه ۹ کیلومتری از جاده‌های گلپتیه، رزن و کرمانشاه در سال ۱۳۹۸ و آماده‌سازی و هضم اسیدی نمونه‌ها در آزمایشگاه، محتوی عناصر در آن‌ها به روش طیف‌سنجی نوری پلاسما جفت شده القایی (ICP-OES) خوانده شد. نتایج محاسبه شاخص جامع آلودگی نمره (NIPI) نشان داد که آلودگی عناصر روی، سرب، کادمیم و کروم در ایستگاه‌های با حجم ترافیک زیاد (رزن و کرمانشاه) «شدید» و بیان‌گر تأثیر ورودی‌های انسانی به‌ویژه با منشأ ترافیک بوده است. همچنین، میانگین مقادیر شاخص خطر سمیت بوم‌شناختی (TRI) عناصر در نمونه‌های خاک بیان‌گر عدم سمیت بود. نتایج حاصل از ارزیابی خطر سلامتی نشان داد که در همه ایستگاه‌های نمونه‌برداری مقادیر شاخص خطر تجمعی غیرسرطان‌زایی (HI) عناصر مورد مطالعه برای هر دو گروه کودک و بزرگسال در طبقه «خطر کم» قرار داشت. از طرفی، خطر سرطان‌زایی (CR) کروم در هر دو رده سنی در سطح قابل‌تحمل بود، در حالی که، سرب و کادمیم خطر سرطان‌زایی قابل توجهی نداشتند. در مجموع، به منظور حفظ سلامت محیط و انسان نسبت به پایش منظم محتوی عناصر بالقوه سمی و ارزیابی مخاطره سلامت خاک‌های آلوده به فلزات سنگین توصیه می‌شود.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۸/۸	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۱۱/۱	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۱/۱۸	
تاریخ انتشار: ۱۴۰۱/۱۱/۲۶	
کلیدواژه‌ها: ترافیک، حمل و نقل جاده‌ای، خطر سرطان‌زایی، عناصر سمی، کلان‌شهر همدان	

استناد: سبحان اردکانی، سهیل، حسینی، نیره السادات. (۱۴۰۲). ارزیابی سمیت و خطر سلامت مرتبط با عناصر بالقوه سمی (روی، سرب، کادمیم و کروم) خاک حاشیه

جاده‌های شهر همدان. نشریه محیط‌شناسی، ۴۹(۱)، ۷۱-۹۰.

DOI: <http://doi.org/10.22059/JES.2023.350468.1008366>

Dor: 20.1001.1.10258620.1402.49.1.4.4

نویسندگان ©.

ناشر: انتشارات دانشگاه تهران



DOI: <http://doi.org/10.22059/JES.2023.350468.1008366>

۱. مقدمه

تعامل بین محیط و ارگان‌های زیستی به‌عنوان یک عامل حیاتی برای سلامت زیست‌مندان شناخته شده است. با این حال، فعالیت‌های ناپایدار انسانی با دگرگونی در بوم‌سازگان و برهم زدن تعادل بوم‌شناختی و زیستی تهدیدی جدی برای سلامت بوم‌سازگان و انسان است. در این میان، آلودگی زیست‌سپهر ناشی از فلزات سنگین به‌سبب پایداری در محیط، سمیت، نیم‌عمر زیستی طولانی و برخورداری از قابلیت تجمع و انباشت زیستی چالش و نگرانی مهم و مشترک محیط‌زیستی، اقتصادی و بهداشت عمومی در سراسر جهان است (Sobhanardakani, 2018; Davodpour et al., 2019; Hosseini et al., 2020). اگرچه محتوی این عناصر به‌عنوان اجزای تشکیل‌دهنده پوسته زمین متأثر از منابع طبیعی (هوازُدگی طبیعی سنگ‌ها، انتشارات آتشفشانی، آتش‌سوزی جنگل‌ها و غیره) است، اما افزایش انتشار آن‌ها از منابع انسان‌پدید (فعالیت‌های معدنی، صنعتی، کشاورزی و احتراق سوخت‌های فسیلی) منجر به تغییر چرخه‌های زیست-شیمیایی، زمین-شیمیایی و تعادل بعضی از آن‌ها در زیست‌سپهر و به‌تبع آن آلودگی اجزای اصلی سازنده محیط‌زیست (هواسپهر، آب و خاک) شده است (Hosseini and Sobhanardakani, 2022; Selahvarzi and Sobhanardakani, 2022).

در قرن حاضر، حمل و نقل جاده‌ای و فعالیت‌های مرتبط با آن به‌عنوان دومین منبع غیرنقطه‌ای انسان‌پدید آلودگی فلزات سنگین به‌سبب انتشارات ترافیکی، احداث، تعمیر، نگهداری و بهره‌برداری از جاده‌ها افزون بر تأثیرات بوم‌شناختی متعدد بر محیط حاشیه جاده منجر به آلودگی بوم‌سازگان کنار جاده‌ای به فلزات سنگین نیز شده است. در این خصوص، عناصر روی، سرب، کادمیم و کروم به‌سبب وجود در ساختار سوخت و کاربردهای گسترده در تجهیزات و روان‌کننده‌های خودرو (قطعات آبکاری شده بدنه خودرو، پوشش تایر، باتری، لنت ترمز و روغن موتور) و علائم راهنمایی و رانندگی (حفاظ و خطوط رنگی سطح جاده) پراکنشی وسیع در محیط کنار جاده‌ای دارند (Farzan and Sobhanardakani, 2014; Sabzevari and Sobhanardakani, 2018; Hosseini and Sobhanardakani, 2021; An et al., 2022). اگرچه عناصر ضروری روی و کروم در مقادیر اندک برای بقا و فرآیندهای زیستی زیست‌مندان لازم و بی‌خطر هستند، اما در شکل‌های خاص و یا مقادیر زیاد می‌توانند ایجاد مسمومیت کنند. حضور عناصر غیرضروری سرب و کادمیم که هیچ‌گونه نقش زیستی شناخته شده‌ای در فرآیندهای زیستی ندارند حتی در مقادیر بسیار اندک نیز برای سلامتی جانداران خطرناک و بسیار سمی است؛ به‌طوری‌که از نظر آلاینده‌های در طبقه آلاینده‌های درجه اول سمی یعنی موادی با خطرات محیط‌زیستی و زیان‌آور برای سلامت انسان قرار دارند (Cheraghi et al., 2015; Sobhanardakani, 2016; Hazratzadeh and Sobhanardakani, 2018; Sobhanardakani et al., 2018; Akar et al., 2019; Hosseini et al., 2020).

خاک حاشیه جاده به‌عنوان منبع و مخزن عناصر فلزی همواره در معرض انتشارات فلزی حاصل از ترافیک بوده و بسته به شرایط محیطی (آب و هوایی از جمله میزان بارندگی و دما)، ترافیک (حجم ترافیک و سرعت وسایل نقلیه) و جاده (طول، عمر، شیب و نوع پوشش سطحی) مقادیر متفاوتی از فلزات سنگین را دریافت کرده و به‌سبب پویایی کم‌تر، دوام و بقای طولانی‌تر عناصر در قیاس با هوا و آب، آلودگی آن از اهمیت بیش‌تری برخوردار است (Nikolaeva et al., 2017; Hosseini et al., 2022). افزایش غلظت و انباشت آلاینده‌های فلزی در خاک نه‌تنها می‌تواند کیفیت خاک را کاهش دهد، بلکه می‌تواند به آلودگی آب (از طریق باران یا رواناب سطحی به‌ویژه در فصل بارندگی) و افزایش جذب بالقوه فلزات توسط گیاهان منجر شده و به‌طور بالقوه تهدیدی مضر و غیرمستقیم برای حیوانات و انسان از طریق زنجیر غذایی محسوب شود. افزون بر این، تبادل آلاینده‌های هوا با خاک سطحی از طریق رسوب هواسپهری و تعلیق مجدد ذرات منجر به تأثیرات متقابل بین آلودگی هوا و خاک می‌شود. در این خصوص، خاک سطحی به‌عنوان شناساگر مناسبی از آلودگی فلزات سنگین ناشی از گرد و غبار هواسپهری یکی از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر سلامت انسان است که به‌طور مستقیم از طریق بلع خاک، استنشاق ذرات خاک (از طریق بینی و دهان) و تماس پوستی تهدیدی بهداشتی برای انسان به‌شمار می‌آید (Dietrich et al., 2019; Sobhanardakani, 2019; Anwar et al., 2020). بنابراین، ارزیابی آلودگی و تعیین خطرات مرتبط با عناصر فلزی در خاک حاشیه جاده برای حفظ سلامت بوم‌سازگان و انسان در سال‌های اخیر توجه زیادی را به‌خود جلب کرده است (Yan et al., 2018; Devi et al., 2019; Forghani et al., 2019; Heidari et al., 2021; Wang et al., 2021; Fan et al., 2022).

امروزه، از شاخص‌های ارزیابی و تحلیل وضعیت آلودگی به‌منظور مدیریت محیط‌زیست، شناسایی و کاهش عوامل بالقوه مخاطره‌آمیز

محیط‌زیستی، بوم‌شناختی و زیستی استفاده می‌شود (Fan et al., 2022; Habibi et al., 2022). در این خصوص، شاخص جامع آلودگی نمره (NIPI) به‌عنوان معیاری از میزان خطر آلودگی تجمعی همه عناصر مورد بررسی در محیط، یکی از ابزارهای مفید و مناسب برای درک تأثیر فعالیت‌های انسانی بر آلاینده‌های فلزی محیط است (Baruah et al., 2021; Mohebian et al., 2021). شاخص خطر سمیت (TRI) ابزار تشخیصی مفید و مناسب برای ارزیابی مخاطره سمیت بوم‌شناختی عناصر فلزی و همچنین شناسایی و اولویت‌بندی مدیریت مناطق با خطرات احتمالی و بالقوه ناشی از آلودگی خاک به‌واسطه انباشت فلزات سنگین است (Haghnazar et al., 2021). ارزیابی خطر سلامت فلزات سنگین نیز ابزاری مفید برای شناخت مسیرهای احتمالی ورود آلاینده‌های فلزی به بدن و همچنین بررسی اثرات مضر (غیر سرطان‌زا و سرطان‌زا) مرتبط با فلزات بر سلامت انسان است (Aminiyan et al., 2018; Sobhanardakani, 2018a; Ehtemae et al., 2020). اگرچه تاکنون در خصوص ارزیابی آلودگی و خطرات سلامت عناصر بالقوه سمی در خاک حاشیه جاده مطالعاتی در سرتاسر جهان انجام شده است؛ با این حال، تعداد پژوهش‌های مشابه انجام یافته در ایران اندک است. برای نمونه، Ghanavati و همکاران (۲۰۱۹) در ارزیابی خطرات بوم‌شناختی و بهداشتی برخی فلزات سنگین در خاک کنار جاده‌ای شهر اهواز گزارش کردند که خطر سرطان‌زایی (CR) عناصر آرسنیک، روی، سرب، کادمیم، کروم، مس و نیکل در خاک کنار جاده‌ای در کودکان نسبت به بزرگسالان بیش‌تر بوده است (Ghanavati et al., 2019). از طرفی، Ehtemae و همکاران (۲۰۲۰) با ارزیابی قابلیت خطر بوم‌شناختی و سلامت برخی از فلزات سنگین در گردوغبار خیابانی شهر ایلام گزارش کردند که مقادیر خطر تجمعی غیرسرطان‌زایی (HI) در هر سه مسیر جذب در گروه سنی کودکان بیش‌تر از بزرگسالان بوده است. همچنین، در هر دو گروه سنی، کروم از بیش‌ترین خطر سرطان‌زایی (RI) برخوردار بوده است (Ehtemae et al., 2018).

بنابراین، با توجه به نگرانی‌ها و مخاطرات محیط‌زیستی و بهداشتی مترتب با آلاینده‌های فلزی در خاک و اهمیت و ضرورت ارزیابی آلودگی و خطرات عناصر بالقوه سمی از یک‌سو، و از طرفی، نظر به این‌که مطالعات بسیار معدودی در خصوص ارزیابی آلودگی و مخاطره سلامت فلزات سنگین در خاک‌های سطحی حاشیه جاده‌های اصلی ایران انجام یافته است و داده‌های پایه در این خصوص در دسترس نیست؛ این پژوهش با هدف ارزیابی خطر سمیت و سلامت مرتبط با عناصر بالقوه سمی روی، سرب، کادمیم و کروم در خاک حاشیه جاده‌ای شهر همدان انجام یافت.

۲. روش شناسی پژوهش

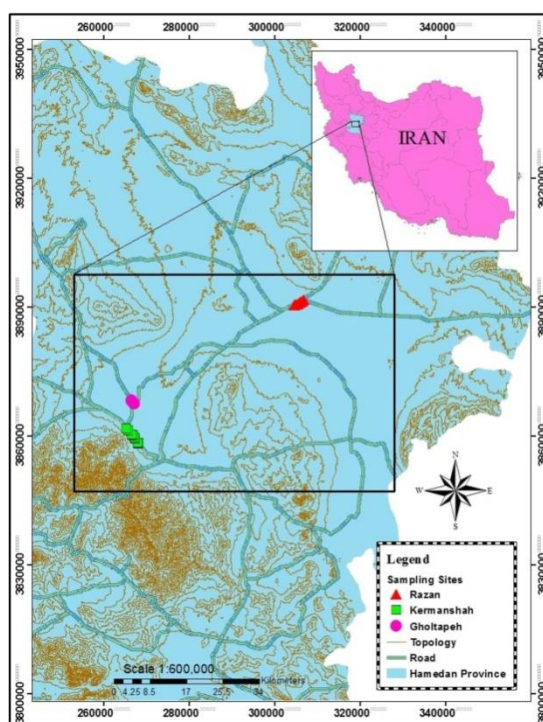
۲-۱. معرفی منطقه مورد مطالعه

کلان‌شهر همدان با ۲۸۳۱ کیلومترمربع وسعت و ۶۵۱۸۲۷ نفر جمعیت در ارتفاع حدود ۱۸۵۰ متر از سطح دریا بین مدارهای ۴۸' ۳۴° عرض جغرافیایی شمالی و ۳۱' ۴۸° طول جغرافیایی شرقی در غرب ایران واقع شده و میانگین دمای سالانه و بارندگی آن به‌ترتیب ۱۱/۳ درجه سلسیوس ۳۱۷/۷ میلی‌متر برآورد شده است. شهر همدان به‌عنوان اولین قطب جمعیتی استان با برخورداری از زیرساخت‌ها و شبکه حمل و نقل جاده‌ای و راه‌های ارتباطی مهم، به نقطه تأکیدگاهی ثقل ارتباطات جاده‌ای غرب کشور تبدیل شده است که این موضوع می‌تواند به آلودگی خاک زیست‌بوم کنار جاده‌ای به فلزات سنگین منجر شود (Sobhanardakani, 2018b; Hosseini et al., 2021).

۲-۲. نمونه‌برداری و آماده‌سازی نمونه‌ها

در این پژوهش توصیفی-مقطعی، با در نظر گرفتن محدودیت منابع مالی در اختیار، سه جاده گلپه، رزن و کرمانشاه از قدیمی‌ترین قطعات شبکه ارتباطات جاده‌ای استان همدان با میانگین حجم تردد روزانه تقریبی به‌ترتیب برابر با ۲۲۰۰، ۷۲۰۰ و ۱۵۰۰۰ وسیله نقلیه به‌عنوان ایستگاه‌های نمونه‌برداری انتخاب شدند (Hosseini et al., 2021). سپس، با استفاده از فرمول تعیین حجم نمونه کوکران در مجموع ۶۳ نمونه خاک سطحی از عمق ۱۵-۰ سانتی‌متری در طول ۷۰۰ متر از یک قطعه ۹ کیلومتری هر جاده با ویژگی‌های مشابه (مانند پوشش جاده و میانگین سرعت)، در فواصل ۱۰۰ متر از یکدیگر و از هر دو طرف حاشیه جاده (۲-۰ متر از لبه جاده) با استفاده از

بیلچه چوبی، در یک نوبت در سال ۱۳۹۸ برداشت شدند (Hosseini et al., 2022). موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های نمونه‌برداری نیز توسط دستگاه GPS گارمین مدل 32X ETRE ثبت شدند که موقعیت استقرار آن‌ها در شکل ۱ آورده شده است. نمونه‌های خاک هر ایستگاه برای تهیه یک نمونه همگن، با یکدیگر مخلوط و در کیسه‌های پلی‌اتیلنی زیپ‌دار ذخیره شده و پس از برچسب‌گذاری، برای مطالعات بعدی به آزمایشگاه منتقل شدند.



شکل ۱. نقشه موقعیت استقرار ایستگاه‌های نمونه‌برداری

۲-۳. آماده‌سازی و تعیین محتوی عناصر در نمونه‌ها

در آزمایشگاه، به‌منظور تبخیر رطوبت اضافی، نمونه‌های خاک به مدت ۷۲ ساعت هوا خشک شدند. سپس، برای حذف ذرات بزرگ و بقایای آلی، نمونه‌ها از الک دو میلی‌متری عبور داده شدند. برای عصاره‌گیری از نمونه‌ها، به یک گرم از هر نمونه خاک، پنج میلی‌لیتر اسید نیتریک غلیظ مرک افزوده و پس از آن، محلول حاصل به مدت ۱۰ دقیقه بر روی هیتر با دمای ۹۵ درجه سلسیوس حرارت داده شد. نمونه‌ها پس از تغییر رنگ از روی هیتر برداشته و سرد شدند. در مرحله بعد، طی دو مرحله متوالی، هر بار پنج میلی‌لیتر اسید نیتریک غلیظ مرک به نمونه‌ها افزوده شد و محلول حاصل به مدت ۳۰ دقیقه مجدداً رفلاکس و روی هیتر با دمای ۹۵ درجه سلسیوس حرارت داده شد. سپس، دو میلی‌لیتر آب مقطر و سه میلی‌لیتر پراکسید هیدروژن ۳۰٪ مرک به محلول افزوده و محتویات به مدت دو تا پنج دقیقه روی هیتر با دمای ۷۵ درجه سلسیوس حرارت داده شدند. پس از خنک شدن نمونه‌ها، به هر یک از آن‌ها ۱۰ میلی‌لیتر اسید کلریدریک غلیظ مرک افزوده شد و بعد از ۱۵ دقیقه رفلاکس، عصاره حاصل با کاغذ صافی واتمن شماره ۴۲ صاف و محلول‌ها با آب دوبار تقطیر به حجم ۱۰۰ میلی‌لیتر رسانده شدند (Sobhanardakani, 2019). در نهایت، پس از ساخت محلول مادر (استوک) و استاندارد نمک عناصر و کالیبره کردن دستگاه ICP-OES مدل 710-ES ساخت شرکت Varian استرالیا، محتوی عناصر روی، سرب، کادمیم و کروم کل به ترتیب در طول موج‌های ۲۰۶/۲۰۰، ۲۲۰/۳۵۳، ۲۲۶/۵۰۲ و ۲۶۷/۷۱۶ نانومتر خوانده شدند. تضمین و کنترل کیفیت (Quality Assurance/Quality Control) اندازه‌گیری‌ها نیز با استفاده از مرجع استاندارد خاک SQC-014، RTC خریداری شده از شرکت سیگما-آلد ریچ اسپانیا بررسی شد (Davodpour et al., 2019). بر این اساس، مقادیر حد تشخیص برای عناصر روی، سرب، کادمیم و کروم

به ترتیب برابر با ۰/۰۷۶، ۰/۰۱۷، ۰/۰۲۳ و ۰/۱۲۹ میلی گرم در کیلوگرم حاصل شدند. مقادیر محدودیت کمی عناصر (میلی گرم در کیلوگرم) نیز برای عناصر روی، سرب، کادمیم و کروم به ترتیب برابر با ۰/۲۲۶، ۰/۰۵۱، ۰/۰۷۳ و ۰/۳۸۵ به دست آمدند. نتایج حاصل از درصد بازیابی عناصر مورد مطالعه (بین ۱۰۱-۹۳/۴ درصد) نیز نشان داد که روش مورد استفاده برای تعیین محتوی فلزات سنگین مورد مطالعه از اطمینان کافی و دقت مناسب برخوردار بوده است.

۲-۴. ارزیابی آلودگی

در این پژوهش، به منظور سنجش میزان آلودگی خاک به فلزات مورد بررسی و از طرفی میزان تأثیر احتمالی فعالیت‌های انسان‌پدید بر محتوی فلزات سنگین خاک، شاخص جامع آلودگی نمرو (NIPI) با استفاده از روابط ۱ و ۲ محاسبه شد (Baruah et al., 2021; Mohebian et al., 2021).

$$NIPI = \sqrt{\frac{(PI_{ave})^2 + (PI_{max})^2}{2}} \quad (1)$$

$$PI = \frac{C_p}{C_b} \quad (2)$$

در روابط ۱ و ۲، PI_{ave} و PI_{max} به ترتیب بیان‌گر میانگین شاخص آلودگی برای فلزات سنگین و بیش‌ترین شاخص آلودگی از بین فلزات، PI ، C_p و C_b نیز به ترتیب نشان‌دهنده شاخص آلودگی هر عنصر، محتوی عنصر مورد نظر در نمونه خاک و غلظت عنصر در خاک غیرآلوده یا پوسته زمین (برابر با ۴۰/۲، ۳۴/۲، ۰/۲۳۰ و ۲۰/۸ به ترتیب برای عناصر روی، سرب، کادمیم و کروم) بر حسب میلی گرم در کیلوگرم هستند (Azimzadeh and Khademi, 2013; Hosseini and Sobhanardakani, 2022). جدول ۱ سطوح آلودگی و تفسیر آن‌ها را بر اساس مقادیر NIPI نشان می‌دهد (Baruah et al., 2021; Mohebian et al., 2021).

جدول ۱. طبقه‌بندی مقادیر شاخص جامع آلودگی نمرو (NIPI) و خطر سمیت بوم‌شناختی عناصر (TRI_T و TRI_i)

شاخص خطر سمیت بوم‌شناختی منفرد و تجمعی (TRI_T و TRI_i)		شاخص جامع آلودگی نمرو (NIPI)	
طبقه توصیفی (خطر مجموع عناصر)	محدوده	طبقه توصیفی (خطر هر عنصر)	محدوده
بدون خطر سمیت	$TRI_i/TRI_T \leq 5$	بدون آلودگی	$NIPI \leq 0.7$
خطر سمیت کم	$5 < TRI_i/TRI_T \leq 10$	خطر هشدار آلودگی	$0.7 < NIPI \leq 1$
خطر سمیت متوسط	$10 < TRI_i/TRI_T \leq 15$	آلودگی کم	$1 < NIPI \leq 2$
خطر سمیت قابل توجه	$15 < TRI_i/TRI_T \leq 20$	آلودگی متوسط	$2 < NIPI \leq 3$
خطر سمیت خیلی زیاد	$TRI_i/TRI_T > 20$	آلودگی شدید	$NIPI > 3$

۲-۵. ارزیابی سمیت

به منظور تعیین و برآورد سمیت بوم‌شناختی احتمالی هر عنصر و از طرفی سمیت تجمعی عناصر مورد مطالعه، شاخص‌های خطر سمیت منفرد (TRI_i) و خطر سمیت کل (TRI_T) به ترتیب با استفاده از روابط ۳ و ۴ محاسبه شدند (Haghnazar et al., 2021; Liao et al., 2021; Man et al., 2022).

$$TRI_i = \sqrt{\frac{\left(\frac{C_i}{TEL}\right)^2 + \left(\frac{C_i}{PEL}\right)^2}{2}} \quad (3)$$

$$TRI_T = \sum_{i=1}^n TRI_i \quad (4)$$

در روابط ۳ و ۴: C_i ، بیان گر غلظت هر عنصر بر حسب میلی گرم در کیلوگرم، TEL و PEL نیز به ترتیب نشان دهنده سطح آستانه (برابر با ۲۷۰، ۱۱۰، ۴/۲۰ و ۱۶۰ به ترتیب برای عناصر روی، سرب، کادمیم و کروم) و حدود احتمالی اثر غلظت عناصر (برابر با ۱۲۰، ۳۰/۰، ۰/۶۸۰ و ۵۲/۰ به ترتیب برای عناصر روی، سرب، کادمیم و کروم) هستند. طبقه بندی و تفسیر شاخص TRI_i و TRI_T در جدول ۱ آورده شده است (Haghnazar et al., 2021; Liao et al., 2021; Man et al., 2022).

۲-۶. ارزیابی خطر سلامت عناصر

در این پژوهش، برای شناخت اثرات مضر فلزات بر سلامت انسان، از ارزیابی مخاطره سلامت به عنوان یکی از ابزارهای اصلی استفاده شد. در این راستا، برای ارزیابی احتمال خطرات غیرسرطانی و سرطانزا برای عموم مردم از طریق قرار گرفتن در معرض خاک آلوده، با استناد به روش ارایه شده توسط آژانس حفاظت از محیط زیست ایالات متحده (USEPA)، سه مسیر اصلی مواجهه یعنی بلع مستقیم، استنشاق (از طریق دهان و بینی) و جذب پوستی (روابط ۵ تا ۷) مورد استفاده قرار گرفتند. همچنین، جمعیت هدف به دو گروه کودک و بزرگسال تقسیم شدند (Sobhanardakani, 2018b; Soltani-Gerdefaramarzi et al., 2021).

$$ADD_{ing} = C_{soil} \times \frac{IngR_{soil} \times EF \times ED}{BW \times AT} \times 10^{-6} \quad (5)$$

$$ADD_{inh} = C_{soil} \times \frac{InhR_{soil} \times EF \times ED}{PEF \times BW \times AT} \quad (6)$$

$$ADD_{derma} = C_{soil} \times \frac{SA \times AF \times ABS \times EF \times ED}{BW \times AT} \times 10^{-6} \quad (7)$$

در روابط ۵ تا ۷: ADD_{ing} ، ADD_{inh} و ADD_{derma} به ترتیب مقدار میانگین جذب روزانه فلزات از طریق بلع مستقیم، استنشاق و تماس پوستی (میلی گرم در کیلوگرم در روز) را نشان می دهند. C_{soil} بیان گر محتوای عناصر در نمونه خاک سطحی (میلی گرم در کیلوگرم)، $IngR$ ، $InhR$ نیز به ترتیب نشان دهنده میزان مصرف ذرات خاک (میلی گرم در روز) و نرخ استنشاق ذرات خاک (مترمکعب در روز) هستند. EF نشان دهنده فرکانس قرار گرفتن در معرض (روز در سال)، ED بیان گر زمان قرار گرفتن در معرض خاک آلوده (سال)، BW ، AT و PEF به ترتیب نشان دهنده میانگین وزن بدن (کیلوگرم)، میانگین طول عمر (روز) و ضریب انتشار ذرات (مترمکعب در کیلوگرم)، SA بیان گر سطح پوست در معرض خاک آلوده (سنتی متر مربع)، AF عامل چسبندگی پوست (میلی گرم در سانتی متر مربع) و ABS نیز عامل جذب پوستی هستند. مقادیر متناظر فاکتورهای مواجهه مورد استفاده برای محاسبه ADD فلزات از طریق مسیرهای سه گانه قرار گرفتن در معرض برای کودکان و بزرگسالان در جدول ۲ آورده شده است.

در همین حال، ضریب خطر (HQ) و شاخص خطر تجمعی (HI) به ترتیب برای ارزیابی اثرات بالقوه غیر سرطانی یک مسیر واحد و تخمین خطر تجمعی غیر سرطانزا از طریق کل مسیرهای مواجهه مورد استفاده قرار گرفتند. به علاوه، برای ارزیابی اثرات سرطانزایی خاک های آلوده به فلزات، خطر سرطانزایی و خطر سرطانزایی کل (TCR) با استفاده از روابط ۸ تا ۱۱ محاسبه شدند (Sobhanardakani, 2019a; Ehtemae et al., 2020).

$$HQ = \sum \frac{ADD}{Rfd} \quad (8)$$

$$HI = \sum HQ = HQ_{ing} + HQ_{inh} + HQ_{derma} \quad (9)$$

$$CR = ADD \times CSF \quad (10)$$

$$TCR = \sum (ADD \times CSF_{ing}) + (ADD \times CSF_{inh}) + (ADD \times CSF_{derma}) \quad (11)$$

جدول ۲. مقادیر متناظر فاکتورهای مواجهه مرجع و فاکتور شیب برای ارزیابی خطر سلامت (غیر سرطانزا و سرطانزا) (Aminiyan et al., 2018; Sobhanardakani, 2018b; Habibi et al., 2022)

گروه سنی		واحد	پارامتر			
بزرگسال	کودک					
۲۰۰	۱۰۰	میلی گرم در روز	IngR			
۳۵۰	۳۵۰	روز در سال	EF			
۲۴	۶	سال	ED			
۷۰	۱۵	کیلوگرم	BW			
ED×۳۶۵	ED×۳۶۵	روز	AT (غیرسرطانزا)			
۲۵۵۵۰(۷۰×۳۶۵)	۲۵۵۵۰(۷۰×۳۶۵)	روز	AT (سرطانزا)			
۵۷۰۰	۲۸۰۰	سانتی متر مربع در روز	SA			
۰/۰۷	۰/۲	میلی گرم در سانتی متر مربع	AF			
۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	بدون واحد	ABS (غیرسرطانزا)			
۰/۰۱	۰/۰۱	بدون واحد	ABS (سرطانزا)			
۱۲/۸	۷/۶۳	مترمکعب در روز	InhR			
۱/۳۶×۱۰ ^{-۹}	۱/۳۶×۱۰ ^{-۹}	مترمکعب در کیلوگرم	PEF			
CSF (میلی گرم در کیلوگرم در روز)			RfD _{ing} (میلی گرم در کیلوگرم در روز)			
پوست	استنشاق	بلع	پوست	استنشاق	بلع	عنصر
-	-	-	۶/۰۰×۱۰ ^{-۲}	۳/۰۰×۱۰ ^{-۱}	۳/۰۰×۱۰ ^{-۱}	روی
-	۴/۲۰×۱۰ ^{-۲}	۸/۵۰×۱۰ ^{-۲}	۵/۲۵×۱۰ ^{-۴}	۳/۵۲×۱۰ ^{-۳}	۳/۵۰×۱۰ ^{-۳}	سرب
-	۶/۳۰	-	۱/۰۰×۱۰ ^{-۵}	۱/۰۰×۱۰ ^{-۳}	۱/۰۰×۱۰ ^{-۳}	کادمیم
-	۴/۲۰×۱۰ ^{+۱}	۵/۰۰×۱۰ ^{-۱}	۶/۰۰×۱۰ ^{-۵}	۲/۸۶×۱۰ ^{-۵}	۳/۰۰×۱۰ ^{-۳}	کروم

در روابط ۸ تا ۱۱: ADD نشان دهنده میانگین مقدار جذب روزانه عناصر از طریق هر یک از مسیرهای احتمالی (میلی گرم در کیلوگرم در روز)، RfD و CSF نیز به ترتیب بیان گر تخمینی از مقدار مرجع (میلی گرم در کیلوگرم در روز) یک عنصر خاص در جمعیت انسانی (هم برای کودکان و هم برای بزرگسالان) از طریق قرار گرفتن روزانه در معرض آلاینده و فاکتور شیب سرطانزایی برای عناصر مورد مطالعه (میلی گرم در کیلوگرم در روز) هستند. مقادیر RfD و CSF در جدول ۲ آورده شده‌اند. اگرچه مقادیر $HQ/HI \leq 1$ نشان دهنده «خطر کم یا بدون خطر اثرات غیر سرطانزا» است، $HQ/HI > 1$ احتمال بروز اثرات نامطلوب و شدید غیر سرطانزا را نشان می‌دهد. در حالی که، مقدار $CR < 1 \times 10^{-6}$ نشان می‌دهد که هیچ خطر قابل توجهی برای سلامتی وجود ندارد. خطر سرطانزایی قابل تحمل یا قابل قبول برای اهداف نظارتی زمانی است که $1 \times 10^{-6} < CR \leq 1 \times 10^{-4}$ باشد. همچنین، $CR \geq 1 \times 10^{-4}$ نشان دهنده خطر سرطانزایی غیر قابل قبول یا بالقوه بزرگ است (Sobhanardakani, 2019b).

۲-۷. پردازش آماری داده‌ها

پردازش آماری داده‌ها با استفاده از نسخه ۲۰ نرم‌افزار SPSS در سطح معنی‌داری ۰/۰۵۰ انجام یافت. از آزمون‌های کلموگروف-اسمیرنوف (Kolmogorov-Smirnov) و لون (Leven) به ترتیب برای بررسی نرمال بودن توزیع داده‌ها و برابری واریانس‌ها و از آزمون تحلیل واریانس بین آزمودنی یک‌طرفه (One-Way ANOVA) و آزمون تعقیبی چند دامنه‌ای دانکن (Duncan Multiple Range Test) نیز برای مقایسه میانگین غلظت عناصر در نمونه‌های خاک بین ایستگاه‌های نمونه‌برداری استفاده شد.

۳. یافته‌های پژوهش

۳-۱. نتایج سنجش محتوی عناصر در نمونه‌های خاک

آمار توصیفی مربوط به محتوی عناصر مورد مطالعه در نمونه‌های خاک حاشیه جاده‌ها به تفکیک ایستگاه نمونه‌برداری در جدول ۳ آورده

شده است. با استناد به نتایج، بیشینه میانگین محتوی عناصر روی، کادمیم و کروم به ترتیب با ۱۲۲، ۰/۳۲۰ و ۱۷/۳ میلی گرم در کیلوگرم مربوط به ایستگاه رزن و بیشینه میانگین محتوی عنصر سرب با ۲۶/۴ میلی گرم در کیلوگرم مربوط به خاک حاشیه جاده کرمانشاه بود. از طرفی، میانگین محتوی عناصر در نمونه‌ها از روند نزولی روی < سرب < کروم < کادمیم تبعیت کردند.

جدول ۳. آمار توصیفی محتوی عناصر مورد مطالعه در نمونه‌های خاک سطحی حاشیه جاده

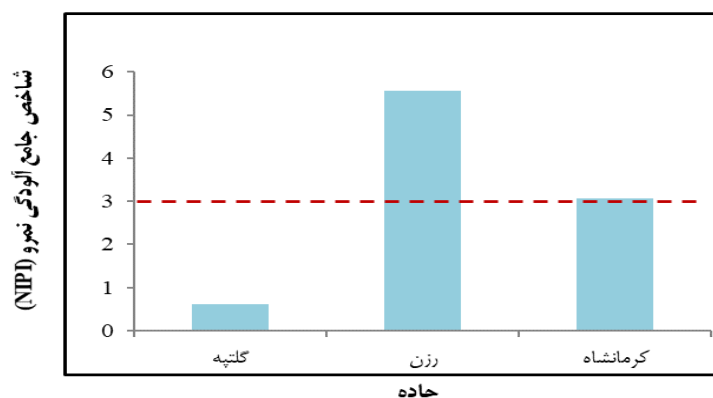
ایستگاه	عنصر (میلی گرم در کیلوگرم)			
	روی	سرب	کادمیم	کروم
گلپه	۳۷/۷c	۳/۲۲c	۰/۱۸۰c	۱۲/۰c
رزن	۱۲۲a	۱۵/۴b	۰/۳۲۰a	۱۷/۳a
کرمانشاه	۸۶/۷b	۲۶/۴a	۰/۲۹۰b	۱۵/۶b
کمپنه	۳۴/۴	۳/۰۳	۰/۱۶۰	۱۰/۰
بیشینه	۱۲۷	۲۶/۶	۰/۴۳۰	۲۰/۱
میانگین	۶۲/۳	۱۵/۰	۰/۲۶۰	۱۴/۷

حروف غیر مشترک (a, b, c و ...) در هر ستون، بیان گر وجود تفاوت معنی دار آماری ($p < 0.05$) میانگین محتوی عناصر مورد بررسی در نمونه‌های خاک بر اساس نتایج آزمون‌های تحلیل واریانس یک طرفه و چند دامنه‌ای دانکن است.

همچنین، بر اساس نتایج آزمون کلموگروف-اسمیرنوف داده‌های مربوط به محتوی همه عناصر در نمونه‌های خاک از توزیع نرمال برخوردار بودند. نتایج آزمون تحلیل واریانس یک طرفه نیز نشان داد که بین ایستگاه‌های گلپه، رزن و کرمانشاه از حیث میانگین محتوی عناصر روی، سرب، کادمیم و کروم در نمونه‌های خاک اختلاف معنی دار آماری ($p < 0.05$) وجود داشته است.

۲-۳. نتایج محاسبه شاخص جامع آلودگی نمر

با استناد به نتایج مندرج در شکل ۲، مقادیر محاسبه شده شاخص NIPI در دامنه ۷/۱۶-۰/۳۹۰ و بیان گر شرایط کیفی غیرآلوده تا آلودگی شدید بود. به طور کلی، بر اساس مقدار میانگین NIPI (۳/۰۷) به نظر می‌رسد که همه ایستگاه‌های مورد مطالعه دارای آلودگی شدید هستند؛ با این حال، نمونه‌های خاک مورد ارزیابی در ایستگاه گلپه (۳۳/۳ درصد از نمونه‌ها) با میانگین مقدار NIPI برابر با ۰/۶۲۰ نسبت به عناصر روی، سرب، کادمیم و کروم از نظر کیفی فاقد آلودگی بودند. در همین حال، نمونه‌های خاک مورد ارزیابی در ایستگاه‌های رزن و کرمانشاه (۶۶/۷ درصد از نمونه‌ها) با میانگین مقادیر شاخص به ترتیب برابر با ۵/۵۶ و ۳/۰۲ دارای آلودگی شدید ($NIPI > 3$) بودند که می‌تواند با فعالیت‌های ترافیکی به ویژه انتشارت آگزوزی و غیرآگزوزی مرتبط باشد. همچنین، با استناد به مقادیر NIPI کوچک‌تر از ۳ برای عناصر مورد ارزیابی در ایستگاه گلپه، به نظر می‌رسد که محتوی این عناصر به طور عمده تحت تاثیر فرآیندهای طبیعی (مواد پوسته‌ای) همچون فرسایش و تعلیق مجدد ذرات خاک بوده است.



شکل ۲. مقادیر شاخص NIPI عناصر روی، سرب، کادمیم و کروم در نمونه‌های خاک به تفکیک مکان نمونه‌برداری

۳-۳. نتایج محاسبه شاخص خطر سمیت

نتایج محاسبه شاخص خطر سمیت عناصر مورد مطالعه در نمونه‌های خاک در جدول ۴ آورده شده است. با استناد به نتایج، مقادیر TRI_i برای عناصر روی، سرب، کادمیم و کروم در همه ایستگاه‌های نمونه‌برداری کوچک‌تر از ۵/۰۰ و بیان‌گر عدم سمیت خاک به این عناصر بوده است. همچنین، روند کاهش میانگین مقادیر شاخص خطر سمیت نیز به‌صورت کروم < کادمیم < سرب < روی بود. از طرفی، مقادیر TRI_T مرتبط با همه فلزات ارزیابی شده نیز نشان داد که نمونه‌های خاک در سه ایستگاه مورد مطالعه با میانگین مقادیر شاخص خطر سمیت تجمعی به‌ترتیب برابر با ۰/۶۷۹، ۱/۷۶ و ۱/۸۱ و همگی کوچک‌تر از ۵/۰۰، هیچ خطر سمیتی ندارند ($TRI_T < 5$).

جدول ۴. نتایج ارزیابی خطر سمیت بوم‌شناختی عناصر در نمونه‌های خاک

ایستگاه	TRI_i				TRI_T	
	روی	سرب	کادمیم	کروم	طبقه توصیفی	مقدار
گلته	۰/۲۴۳	۰/۰۷۷	۰/۱۸۹	۰/۱۷۰	بدون خطر سمیت	۰/۶۷۹
رزن	۰/۷۸۹	۰/۳۷۴	۰/۳۳۶	۰/۲۵۷	بدون خطر سمیت	۱/۷۶
کرمانشاه	۰/۵۵۹	۰/۷۲۸	۰/۳۰۵	۰/۲۲۱	بدون خطر سمیت	۱/۸۱
میانگین	۰/۴۰۱	۰/۳۶۱	۰/۲۷۷	۰/۲۱۲	بدون خطر سمیت	۱/۲۵

۳-۴. نتایج محاسبه شاخص خطر سلامت عناصر

نتایج محاسبه شاخص غیرسرطان‌زایی (HQ و HI) ناشی از قرار گرفتن در معرض عناصر بالقوه سمی از طریق بلع مستقیم، تنفس و یا تماس پوستی با ذرات خاک آلوده در نمونه‌های خاک در جدول ۵ نشان داده شده است. بر اساس مقادیر محاسبه‌شده شاخص HQs، هیچ خطر غیر سرطانی قابل توجه و جدی در کودکان و بزرگسالان از طریق مسیرهای سه‌گانه مواجهه با ذرات خاک آلوده به روی، سرب، کادمیم و کروم مشاهده نشد. از طرفی، سطوح خطرات بهداشتی غیرسرطان‌زا برای عناصر ارزیابی شده از مسیرهای مختلف مواجهه برای کودکان و بزرگسالان به‌ترتیب کاهش بلع < استنشاق < تماس پوستی بود. به‌علاوه، روند نزولی میانگین میزان خطر غیر سرطان‌زایی فلزات برای هر دو گروه سنی به‌شرح کروم < سرب < کادمیم < روی بود.

جدول ۵. نتایج ارزیابی خطر غیرسرطان‌زایی (HQ و HI) عناصر در نمونه‌های خاک سطحی کنار جاده‌ای همدان

محل نمونه‌برداری	گروه سنی	مسیر تماس	ضریب خطر (HQ)			
			روی	سرب	کادمیم	کروم
گلته	کودک	بلع	$1/6 \times 10^{-3}$	$1/18 \times 10^{-2}$	$2/3 \times 10^{-3}$	$5/23 \times 10^{-3}$
		استنشاق	$4/5 \times 10^{-8}$	$3/3 \times 10^{-7}$	$6/46 \times 10^{-8}$	$1/51 \times 10^{-4}$
		پوست	$1/88 \times 10^{-14}$	$1/84 \times 10^{-13}$	$5/4 \times 10^{-12}$	$5/82 \times 10^{-12}$
	بزرگسال	کل	$1/6 \times 10^{-3}$	$1/18 \times 10^{-2}$	$2/3 \times 10^{-3}$	$5/25 \times 10^{-3}$
		بلع	$1/72 \times 10^{-4}$	$1/26 \times 10^{-3}$	$2/47 \times 10^{-4}$	$5/49 \times 10^{-3}$
		استنشاق	$1/63 \times 10^{-8}$	$1/9 \times 10^{-7}$	$2/34 \times 10^{-8}$	$5/42 \times 10^{-5}$
رزن	کودک	پوست	$2/52 \times 10^{-15}$	$2/46 \times 10^{-14}$	$7/23 \times 10^{-14}$	$8/06 \times 10^{-13}$
		کل	$1/72 \times 10^{-4}$	$1/26 \times 10^{-3}$	$2/47 \times 10^{-4}$	$5/54 \times 10^{-3}$
		بلع	$5/2 \times 10^{-3}$	$5/8 \times 10^{-2}$	$4/09 \times 10^{-3}$	$7/37 \times 10^{-2}$
	بزرگسال	استنشاق	$1/46 \times 10^{-7}$	$1/57 \times 10^{-6}$	$1/15 \times 10^{-7}$	$2/16 \times 10^{-4}$
		پوست	$6/12 \times 10^{-14}$	$8/8 \times 10^{-13}$	$9/6 \times 10^{-13}$	$8/63 \times 10^{-12}$
		کل	$5/2 \times 10^{-3}$	$5/8 \times 10^{-2}$	$4/09 \times 10^{-3}$	$7/39 \times 10^{-2}$

ادامه جدول ۵. نتایج ارزیابی خطر غیرسرطان‌زایی (HQ و HI) عناصر در نمونه‌های خاک سطحی کنار جاده‌ای همدان

شاخص خطر (HI)	ضریب خطر (HQ)				مسیر تماس	گروه سنی	محل نمونه‌برداری
	تجمعی	کروم	کادمیم	سرب			
۱/۴۹×۱۰ ^{-۲}	۷/۸۷×۱۰ ^{-۳}	۴/۳۸×۱۰ ^{-۴}	۶/۰۳×۱۰ ^{-۳}	۵/۶×۱۰ ^{-۴}	بلع	بزرگسال	
۷/۸۵×۱۰ ^{-۴}	۷/۷۹×۱۰ ^{-۵}	۴/۱۶×۱۰ ^{-۸}	۵/۶۳×۱۰ ^{-۷}	۵/۲۷×۱۰ ^{-۸}	استنشاق		
۱/۴۱×۱۰ ^{-۱۲}	۱/۱۶×۱۰ ^{-۱۲}	۱/۲۹×۱۰ ^{-۱۳}	۱/۱۸×۱۰ ^{-۱۳}	۸/۱۵×۱۰ ^{-۱۵}	پوست		
۱/۴۹×۱۰ ^{-۲}	۷/۹۵×۱۰ ^{-۳}	۴/۳۸×۱۰ ^{-۴}	۶/۰۳×۱۰ ^{-۳}	۵/۶×۱۰ ^{-۴}	کل	کودک	
۱/۷۱×۱۰ ^{-۱}	۶/۶۳×۱۰ ^{-۲}	۳/۷۱×۱۰ ^{-۳}	۹/۶۳×۱۰ ^{-۲}	۳/۷×۱۰ ^{-۳}	بلع		
۱/۹۸×۱۰ ^{-۴}	۱/۹۵×۱۰ ^{-۴}	۱/۰۴×۱۰ ^{-۷}	۲/۷×۱۰ ^{-۶}	۱/۰۴×۱۰ ^{-۷}	استنشاق		
۱/۰۲×۱۰ ^{-۱۱}	۷/۷۹×۱۰ ^{-۱۲}	۸/۷×۱۰ ^{-۱۳}	۱/۵۱×۱۰ ^{-۱۲}	۳/۳۳×۱۰ ^{-۱۴}	پوست	کرمانشاه	
۱/۷۱×۱۰ ^{-۱}	۶/۶۵×۱۰ ^{-۲}	۳/۷۱×۱۰ ^{-۳}	۹/۶۳×۱۰ ^{-۲}	۳/۷×۱۰ ^{-۳}	کل		
۱/۸۲×۱۰ ^{-۲}	۷/۱×۱۰ ^{-۲}	۳/۹۷×۱۰ ^{-۴}	۱/۰۳×۱۰ ^{-۲}	۳/۹۷×۱۰ ^{-۴}	بلع		
۷/۱۳×۱۰ ^{-۵}	۷/۰۳×۱۰ ^{-۵}	۳/۷۴×۱۰ ^{-۸}	۹/۷۴×۱۰ ^{-۷}	۳/۷۳×۱۰ ^{-۸}	استنشاق	بزرگسال	
۱/۳۳×۱۰ ^{-۱۲}	۱/۰۴×۱۰ ^{-۱۲}	۱/۱۷×۱۰ ^{-۱۳}	۲/۰۲×۱۰ ^{-۱۳}	۵/۸×۱۰ ^{-۱۵}	پوست		
۱/۸۲×۱۰ ^{-۲}	۷/۱×۱۰ ^{-۲}	۳/۹۷×۱۰ ^{-۴}	۱/۰۳×۱۰ ^{-۲}	۳/۹۷×۱۰ ^{-۴}	کل		

از آنجایی که روی عنصر سرطان‌زا محسوب نمی‌شوند (Aminiyan et al., 2018)؛ از این رو، تخمین خطر سرطان‌زایی از مسیرهای مختلف مواجهه با عناصر سرب، کادمیم و کروم برای هر گروه سنی انجام شد (جدول ۶). نتایج نشان داد که مقادیر CR_{inh} همگی کمتر از استاندارد آستانه 1×10^{-6} بوده و هیچ خطر سرطان‌زایی از طریق مسیر استنشاقی حادث نخواهد شد. با این حال، خطر سرطان‌زایی از طریق بلع، یک تهدید جدی و قابل توجه است، به‌ویژه برای کروم که دارای مقادیر CR_{ing} بزرگ‌تر از 1×10^{-6} در هر سه سایت بود. از طرفی، مقادیر TCR عناصر روی، سرب و کادمیم برای هر دو گروه سنی کوچک‌تر از 1×10^{-6} و نشان‌دهنده عدم خطر سرطان‌زایی قابل توجه برای این فلزات در خاک‌های مورد مطالعه هر سه ایستگاه بود. در همین حال، عنصر کروم دارای مقادیر TCR بزرگ‌تر از 1×10^{-6} برای کودکان و بزرگسالان بود که نشان‌دهنده سطح خطرات سرطان‌زایی قابل تحمل یا قابل قبول است.

جدول ۶. نتایج ارزیابی خطر سرطان‌زایی (CR و TCR) عناصر در نمونه‌های خاک سطحی کنار جاده‌ای همدان

ایستگاه	عنصر	کودک				بزرگسال			
		TCR	CR_{derm}	CR_{inh}	CR_{ing}	TCR	CR_{derm}	CR_{inh}	CR_{ing}
گلپتیه	سرب	۳/۰۱×۱۰ ^{-۸}	-	۴/۰۶×۱۰ ^{-۱۲}	۳/۰۱×۱۰ ^{-۸}	-	۵/۴۲×۱۰ ^{-۱۲}	۱/۲۸×۱۰ ^{-۸}	
	کادمیم	-	-	۳/۴۸×۱۰ ^{-۱۱}	-	-	۵/۰۱×۱۰ ^{-۱۱}	-	
	کروم	۶/۶۰×۱۰ ^{-۶}	-	۱/۵۵×۱۰ ^{-۸}	۶/۶۲×۱۰ ^{-۶}	-	۲/۰۲×۱۰ ^{-۸}	۲/۸۳×۱۰ ^{-۶}	
رزن	کل	۶/۶۳×۱۰ ^{-۶}	-	۱/۵۵×۱۰ ^{-۸}	۶/۶۲×۱۰ ^{-۶}	-	۲/۰۲×۱۰ ^{-۸}	۲/۸۳×۱۰ ^{-۶}	
	سرب	۱/۴۴×۱۰ ^{-۷}	-	۱/۹۹×۱۰ ^{-۱۱}	۱/۴۴×۱۰ ^{-۷}	-	۲/۵۹×۱۰ ^{-۱۱}	۶/۱۵×۱۰ ^{-۸}	
	کادمیم	-	-	۶/۲۰×۱۰ ^{-۱۱}	۶/۲۰×۱۰ ^{-۱۱}	-	۸/۸۸×۱۰ ^{-۱۱}	-	
کرمانشاه	کروم	۹/۴۵×۱۰ ^{-۶}	-	۲/۱۸×۱۰ ^{-۸}	۹/۴۷×۱۰ ^{-۶}	-	۳/۲۰×۱۰ ^{-۸}	۴/۰۶×۱۰ ^{-۶}	
	کل	۹/۵۹×۱۰ ^{-۶}	-	۲/۱۸×۱۰ ^{-۸}	۹/۶۱×۱۰ ^{-۶}	-	۳/۲۰×۱۰ ^{-۸}	۴/۱۲×۱۰ ^{-۶}	
	سرب	۲/۴۶×۱۰ ^{-۷}	-	۳/۴۰×۱۰ ^{-۱۱}	۲/۴۶×۱۰ ^{-۷}	-	۴/۴۱×۱۰ ^{-۱۱}	۱/۰۵×۱۰ ^{-۷}	
کادمیم	-	-	-	۵/۶۱×۱۰ ^{-۱۱}	-	-	۸/۰۶×۱۰ ^{-۱۱}	-	
	کروم	۸/۵۵×۱۰ ^{-۶}	-	۱/۹۶×۱۰ ^{-۸}	۸/۵۷×۱۰ ^{-۶}	-	۲/۶۶×۱۰ ^{-۸}	۳/۶۶×۱۰ ^{-۶}	
	کل	۸/۸۰×۱۰ ^{-۶}	-	۱/۹۶×۱۰ ^{-۸}	۸/۸۲×۱۰ ^{-۶}	-	۲/۶۶×۱۰ ^{-۸}	۳/۷۷×۱۰ ^{-۶}	

۴. بحث و نتیجه‌گیری

خاک به‌عنوان شاخص مناسب و مفیدی برای سنجش آلودگی آلاینده‌های فلزی در بوم‌سازگان به‌شمار می‌آید. بررسی نتایج مربوط به

محتوی عناصر مورد ارزیابی در نمونه‌های خاک نشان داد که بیشینه میانگین محتوی عناصر روی، کادمیم و کروم به ترتیب با ۱۲۲، ۰/۳۲۰ و ۱۷/۳ میلی‌گرم در کیلوگرم مربوط به نمونه خاک‌های جمع‌آوری شده از ایستگاه رزن و بیشینه میانگین محتوی عنصر سرب با ۲۶/۴ میلی‌گرم در کیلوگرم مربوط به خاک حاشیه جاده کرمانشاه و برای همه عناصر مورد ارزیابی به‌طور معنی‌داری بیش‌تر از ایستگاه گلپه بود. در این خصوص می‌توان اذعان داشت که حجم ترافیک عامل اصلی و عمده احتمالی این آلاینده‌های فلزی بوده است. علاوه بر این، اگرچه در زمان نمونه‌برداری (سال ۱۳۹۸)، حجم تردد روزانه در جاده رزن با ۷۲۰۰ وسیله نقلیه کم‌تر از جاده کرمانشاه با تردد ۱۵۰۰۰ وسیله نقلیه در روز بود، اما لازم به‌ذکر است که جاده رزن تا قبل از بهره‌برداری از آزادراه همدان-ساوه، به‌عنوان مهم‌ترین و اصلی‌ترین راه ارتباطی شهرستان‌های استان همدان به استان‌های زنجان، قزوین و به‌ویژه البرز و تهران از بار ترافیکی قابل‌توجهی برخوردار بوده است. از این‌رو، بیش‌تر بودن نرخ آلودگی عناصر روی، کادمیم و کروم در خاک سطحی ایستگاه رزن در مقایسه با ایستگاه کرمانشاه را می‌توان با انباشت انتشارات فلزی در سال‌های قبل از اجرای این پژوهش مرتبط دانست.

روی فراوان‌ترین و مهم‌ترین فلز در تایر (با میانگین غلظت ۱۷۷۲۰ میلی‌گرم در کیلوگرم) و روان‌کننده‌ها (با میانگین غلظت ۱۵۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم) است (Yan et al., 2018; Jin et al., 2019). سرب به‌طور گسترده به‌عنوان یک افزودنی اصطکاکی در مواد ترمز استفاده می‌شود (Roy et al., 2019). کروم افزون بر این‌که در آسفالت و سوخت یافت می‌شود، برای پوشش برخی قطعات مکانیکی خودرو (نظیر لنت ترمز و لاستیک) نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد (Devi et al., 2019). کادمیم نیز عنصر مهمی است که در ساخت روان‌کننده‌ها، لاستیک‌ها و لنت‌های ترمز مورد استفاده قرار می‌گیرد (Habibi et al., 2021; Mohammadi et al., 2021). بنابراین، افزایش محتوی این عناصر در ایستگاه‌های با حجم ترافیک زیاد (رزن و کرمانشاه) را می‌توان با انتشارات ناشی از احتراق سوخت، خوردگی و فرسایش تایر و ترمز خودرو، پوشش سطح جاده و نشت روان‌کننده‌ها مرتبط دانست. در مطالعات مشابه و در تأیید نتایج حاصل، Bonanno (۲۰۱۳)، Galal and Shehata (۲۰۱۵)، Khalid و همکاران (۲۰۱۹) و Liu و همکاران (۲۰۲۱) نیز با ارزیابی آلودگی فلزات سنگین در خاک حاشیه جاده، بیش‌ترین غلظت عناصر را در نمونه‌های خاک برداشت شده از امتداد بزرگراه‌هایی با حجم بالای ترافیک گزارش کردند. از طرفی، Liu و همکاران (۲۰۰۹) و Tian و همکاران (۲۰۱۹) انتشارات ناشی از سایش و خوردگی قطعات وسایل نقلیه موتوری نظیر تایرها و لنت ترمز، روان‌کننده‌ها و همچنین ساییدگی پوشش (آسفالت) و رنگ جاده را به‌عنوان منابع عمده افزایش محتوی عناصر روی، سرب، کادمیم و کروم در خاک حاشیه جاده‌ها معرفی کردند (Liu et al., 2009; Tian et al., 2019).

شاخص آلودگی نمره ابزار مفید و مناسبی برای ارزیابی یکپارچه کیفیت خاک است. مقادیر محاسبه شده شاخص NIPI (شکل ۲) نشان داد که نمونه‌های خاک مورد ارزیابی در ایستگاه گلپه (۰/۶۲۰) نسبت به عناصر مورد ارزیابی از نظر کیفی غیرآلوده بود؛ در حالی‌که، نمونه‌های خاک مورد ارزیابی در ایستگاه‌های با تراکم ترافیک زیاد (رزن و کرمانشاه) نسبت به عناصر روی، سرب، کادمیم و کروم با مقادیر NIPI در دامنه ۳/۰۲-۵/۵۶ دارای آلودگی شدید و بیان‌گر تأثیر ورودی‌های انسانی به‌ویژه با منشأ ترافیک بوده است. همچنین، با استناد به مقادیر NIPI کوچک‌تر از ۳/۰۰ برای عناصر مورد ارزیابی در ایستگاه گلپه، به‌نظر می‌رسد که محتوی این عناصر به‌طور عمده تحت تأثیر فرآیندهای طبیعی (مواد پوسته‌ای) همچون فرسایش و تعلیق مجدد ذرات خاک بوده است. در تأیید نتایج حاصل، Nazarpour و همکاران (۲۰۱۷) با ارزیابی سطح آلودگی و قابلیت خطر بوم‌شناختی برخی فلزات سنگین در خاک‌های سطحی میدان نفتی اهواز اذعان داشتند که مقادیر شاخص آلودگی نمره برای عناصر روی، سرب، کادمیم و کروم بیان‌گر سطح آلودگی شدید و سهم قابل‌توجه فعالیت‌های انسانی در منطقه مورد مطالعه بوده است. در پژوهشی دیگر، AliYari و همکاران (۲۰۲۱) با ارزیابی وضعیت آلودگی فلزات با استفاده از شاخص آلودگی نمره نتیجه گرفتند که محتوی فلزات روی و کروم در خاک باغ‌های انگور شهرستان ملایر با مقادیر میانگین NIPI کوچک‌تر از ۳/۰۰ به‌طور عمده توسط فرآیندهای زمین‌شناسی کنترل می‌شوند. همچنین، Mohebian و همکاران (۲۰۲۱) با تجزیه و تحلیل و ارزیابی خطر بوم‌شناختی بالقوه فلزات سنگین در خاک‌های سطحی جمع‌آوری شده از کاربری‌های مختلف اطراف مجتمع پالایش نفت شازند در ایران اذعان داشتند که مقادیر شاخص آلودگی نمره برای عناصر سرب و کادمیم به ترتیب با ۲/۰۱ و ۱/۶۵ بیان‌گر سطح آلودگی متوسط بوده است.

شاخص‌های TRI_i و TRI_T ابزارهایی مناسب برای تعیین سطح و برآورد سمیت بوم‌شناختی فلزات سنگین در خاک هستند. نتایج حاصل از بررسی خطر سمیت منفرد فلزات سنگین در خاک‌های کنار جاده‌ای همدان بیان‌گر آن بود که نمونه‌های خاک مورد ارزیابی در همه ایستگاه‌ها (گلته، رزن و کرمانشاه) با مقادیر شاخص TRI_i در دامنه $0/08-0/79$ فاقد سمیت بود. از طرفی، میانگین مقادیر شاخص TRI_T برابر با $1/25$ و بیان‌گر عدم سمیت تجمعی بوم‌شناختی عناصر در نمونه‌ها بود. با استناد به مقادیر شاخص TRI_T ، همه نمونه‌ها (۱۰۰ درصد) دارای شاخص کوچک‌تر از $5/00$ بوده و عناصر کروم و روی با $16/8$ درصد و 32 درصد به ترتیب از کم‌ترین و بیش‌ترین سهم در ایجاد خطر بوم‌شناختی برخوردار بودند. از این‌رو، می‌توان نتیجه گرفت که عنصر روی نگران‌کننده‌ترین آلاینده فلزی در خاک‌های کنار جاده‌ای کلان‌شهر همدان است که باید نسبت به کنترل منابع احتمالی انتشار آن در محیط‌های جاده‌ای از جمله احتراق و نشت سوخت، روان‌کننده‌ها، سایش لنت‌های ترمز و پوشش‌های لاستیکی به‌منظور تدوین راهبردهای مدیریتی مؤثرتر، اقدام شود. Haghazari و همکاران (۲۰۲۱) نیز پس از ارزیابی آلودگی عناصر کادمیم، کروم، سرب و روی در رسوبات سطحی رودخانه بهمنشیر با استناد به مقادیر شاخص TRI گزارش کردند که همه ایستگاه‌های نمونه‌برداری فاقد خطر سمیت بوم‌شناختی بوده‌اند. همچنین، Man و همکاران (۲۰۲۲) گزارش کردند که مقادیر شاخص TRI عناصر سرب، کروم و روی در نمونه‌های خاک دشت لیتان‌چانگ در شمال شرقی چین نشان‌دهنده سمی بودن کم تا زیاد خاک بوده است.

به‌طور کلی، مقادیر شاخص‌های مورد ارزیابی عناصر در نمونه‌های خاک سطحی ایستگاه‌های رزن و کرمانشاه به نسبت بزرگ‌تر از ایستگاه گلته بودند که این موضوع را می‌توان با فعالیت‌های ترافیکی شدید در ایستگاه‌های رزن و کرمانشاه مرتبط دانست. در واقع، ترافیک سنگین از طریق انتقال مواد معدنی، سبب انتشار فلزات در محیط و به‌تبع آن تجمع بیش‌تر عناصر در خاک کنار جاده‌ای ایستگاه‌های رزن و کرمانشاه شده است. Jankowski و همکاران (۲۰۱۹) و Tian و همکاران (۲۰۱۹) نیز بیش‌ترین نرخ آلودگی را در خاک سطحی جاده‌هایی با تراکم ترافیکی زیاد گزارش کردند.

ارزیابی خطر سلامت انسان اطلاعاتی را در مورد مسیرهای احتمالی ورود آلاینده‌های فلزی به بدن و خطرات مرتبط با آن‌ها ارائه می‌دهد. به‌طور کلی، بلع حدود $99/8$ درصد از کل شاخص خطر تجمعی و استنشاق (از طریق دهان و بینی) تنها حدود $0/18$ درصد از خطر تجمعی غیر سرطان‌زایی برای کودکان و بزرگسالان را شامل شد. در حالی که، در مقایسه با بلع و استنشاق، اثر تماس پوستی اندک (حدود $0/02$ درصد نسبت به کل HI) و فاقد خطر قابل توجه بود که با یافته‌های مطالعه Dietrich و همکاران (۲۰۱۹) همخوانی داشت. در این رابطه می‌توان اذعان داشت که بلع مسیر اصلی و مهم قرار گرفتن انسان (کودک و بزرگسال) در معرض فلزات بود که توسط سایر محققان نیز گزارش شده است (Soltani-Gerdefaramarzi et al., 2021). همچنین، نتایج نشان داد که سرب و کروم به‌طور متوسط 94 درصد در کل مقادیر HI برای هر دو گروه سنی را به‌خود اختصاص داده‌اند. با این حال، در ایستگاه کرمانشاه، سرب بیش‌ترین سهم از کل HI (به‌طور متوسط 56 درصد) را به‌خود اختصاص داده بود. این نشان می‌دهد که اثرات سم‌شناسی غیرسرطان‌زای احتمالی به‌طور عمده توسط عناصر سرب و کروم هدایت می‌شود. البته باید توجه داشت که هرچند کروم سه ظرفیتی یک عنصر حیاتی و ضروری برای عملکردهای زیستی است، ولی قرار گرفتن در معرض مقادیر بیش‌تر از حد آن می‌تواند به تحریک پوست، اختلالات عصبی، گوارشی و قلبی عروقی منجر شود (Sabet Aghlidi et al., 2020; Sun et al., 2020; Gujre et al., 2021; Renu et al., 2021; Zhang et al., 2021). سرب نیز به‌عنوان عنصری غیرضروری بر بسیاری از عملکردهای بدن انسان تأثیر می‌گذارد و ممکن است باعث بیماری‌های عصبی، تنفسی، قلبی عروقی، گوارشی و ادراری شود (Sobhanardakani, 2018c).

نتایج حاصل از محاسبه خطر سرطان‌زایی از مسیرهای مختلف مواجهه با عناصر سرب، کادمیم و کروم برای هر گروه سنی نشان داد از آن‌جا که مقادیر CR_{inh} همگی کوچک‌تر از استاندارد آستانه 1×10^{-6} بود، لذا، هیچ خطر سرطانی از طریق مسیر استنشاقی حادث نشده است. با این حال، خطر سرطان‌زایی از طریق بلع، یک تهدید جدی و قابل توجه و به‌ویژه برای کروم با مقادیر CR_{ing} بزرگ‌تر از حد آستانه در هر سه ایستگاه بود. بسیاری از تحقیقات مشابه نیز گزارش کردند که خطر سرطان‌زایی به‌طور عمده از طریق مسیر بلع (CR_{ing}) رخ می‌دهد. در همین حال، در بین عناصر مورد ارزیابی، مقادیر TCR کروم از حد آستانه برای کودکان و بزرگسالان بیش‌تر بود که

نشان‌دهنده سطح خطرات سرطان‌زایی قابل توجه بود. مقادیر TCR برای عناصر سرب و کادمیم نیز در هر دو رده سنی کوچک‌تر از 10×1 بود، که نشان‌دهنده عدم خطر سرطان‌زایی قابل توجه برای این فلزات در خاک‌های مورد مطالعه هر سه ایستگاه بود. افزون بر این، خطرات سرطان ناشی از کروم ۹۸/۴ درصد از کل TCR برای کودکان و بزرگسالان (میانگین سه ایستگاه) را به خود اختصاص داد. سایر مطالعات نیز کروم را به‌عنوان عامل اصلی خطرات غیرسرطان‌زا و سرطان‌زا در مکان‌های آلوده به فلزات سنگین معرفی کرده‌اند (Huang et al., 2019).

در جمع‌بندی کلی، در این پژوهش اثر حجم ترافیک بر آلودگی خاک سطحی حاشیه سه جاده مواصلاتی برون شهری گلپه، رزن و کرمانشاه در شهرستان همدان به عناصر روی، سرب، کادمیم و کروم ارزیابی شد. بدین صورت که ایستگاه گلپه با حجم ترافیک کم به‌عنوان ایستگاه شاهد در نظر گرفته شد. از آنجا که توزیع و تجمع عناصر بالقوه سمی در خاک افزون بر فرآیندهای طبیعی، با نوع و میزان فعالیت‌های انسانی (کاربری اراضی) نیز مرتبط است، از این‌رو، آلودگی‌های با منبع طبیعی عمدتاً ناشی از رخصاره‌های سنگی مختلف و آلودگی‌های با منبع انسانی نیز عمدتاً ناشی از فعالیت‌های مرتبط با معدن، صنعت و ترافیک هستند. بنابراین، اگرچه افزایش محتوی عناصر در ایستگاه‌های با حجم ترافیک زیاد (رزن و کرمانشاه) در مقایسه با ایستگاه با حجم ترافیک کم (گلپه) می‌تواند تحت تأثیر عوامل طبیعی باشد، ولی افزایش انتشارات فلزی را می‌توان با انتشارات ترافیکی به‌عنوان یک عامل انسان‌پدید اثرگذار بر افزایش غلظت عناصر نیز مرتبط دانست. در این خصوص، نتایج حاصل از محاسبه شاخص آلودگی نمره نیز مؤید این مطلب بود؛ به‌طوری‌که مقادیر $NIPI < 3$ برای عناصر مورد ارزیابی در ایستگاه گلپه نشان‌دهنده تأثیر فرآیندهای طبیعی (مواد پوسته‌ای) همچون فرسایش و تعلیق مجدد ذرات خاک بر محتوی عناصر مورد ارزیابی بود. به‌علاوه، مقادیر $NIPI > 3$ برای عناصر مورد ارزیابی در ایستگاه‌های رزن و کرمانشاه را می‌توان با تأثیر ورودی‌های انسانی به‌ویژه با منشأ ترافیک مرتبط دانست.

در این پژوهش، محتوای فلزات سنگین در خاک سطحی حاشیه سه جاده منتخب شهر همدان (گلپه، رزن و کرمانشاه) مورد بررسی قرار گرفت. با استناد به نتایج حاصل، با افزایش حجم ترافیک، محتوی عناصر روی، سرب، کادمیم و کروم در نمونه‌های خاک سطحی به‌طور معنی‌داری روند افزایشی داشته است که نشان‌دهنده اثر افزایش حجم ترافیک بر آلودگی فلزی در خاک کنار جاده است. از طرفی، نتایج محاسبه شاخص NIPI نشان داد که آلودگی عناصر روی، سرب، کادمیم و کروم در ایستگاه‌های مورد مطالعه در محدوده «غیرآلوده» تا «شدید» بوده است. همچنین، میانگین مقادیر شاخص سمیت بوم‌شناختی عناصر در نمونه‌های خاک نشان‌دهنده عدم سمیت خاک بود. نظر به این که روی با ۳۲ درصد از بیش‌ترین سهم در ایجاد سمیت بوم‌شناختی برخوردار بود؛ از این‌رو، نسبت به کنترل منابع انتشار روی از جمله احتراق و نشت سوخت و روان‌کننده‌ها، سایش تایر و ترمز توصیه می‌شود. از سوی دیگر، مقادیر محاسبه شده شاخص خطر غیر سرطان‌زایی برای همه عناصر در هر دو گروه سنی کودک و بزرگسال بیان‌گر خطر کم یا فقدان خطر مواجهه با خاک آلوده بود و نشان داد که اثرات غیر سرطان‌زا از روند کاهشی کروم < سرب < کادمیم < روی تبعیت کرده است. به‌علاوه، بلع اصلی‌ترین مسیر قرار گرفتن کودکان و بزرگسالان در معرض خاک آلوده به فلزات سنگین شناسایی شد. از سوی دیگر، عناصر سرب و کادمیم در خاک سطحی فاقد خطر سرطان‌زایی قابل توجه برای هر دو گروه سنی بودند؛ با این حال، مقادیر TCR کروم از حد آستانه برای کودکان و بزرگسالان فراتر رفت که نشان‌دهنده سطح خطرات سرطان‌زایی قابل توجه و تهدیدی بالقوه برای سلامت انسان بود. نظر به این که سرب و کروم با میانگین ۹۴ درصد از بیش‌ترین سهم در خطر تجمعی غیر سرطان‌زایی برای هر دو گروه کودک و بزرگسال برخوردار بودند؛ لذا، نسبت به شناسایی و کنترل منابع انتشار سرب و کروم از جمله احتراق و نشت سوخت‌های فسیلی و پایش منظم و دوره‌ای نمونه‌های خاک که از قابلیت تجمع انواع آلاینده‌های آلی و معدنی و به‌تبع آن ایجاد خطر برای سلامت انسان برخوردارند، توصیه می‌شود. نتایج به‌دست آمده به‌عنوان داده‌های پایه می‌تواند مبنای برنامه‌های مدیریت محیط‌زیست از طریق اقدامات پیشگیرانه و اصلاحی از جمله نوسازی ناوگان خودروهای فرسوده، استفاده از فن‌آوری‌های نوین در ساخت و بهسازی قطعات خودرو و بهبود وضعیت مصرف سوخت باشد. در خاتمه، از آنجا که در اجرای این پژوهش با محدودیت‌های مالی و زمانی مواجه بودیم، ارزیابی آلودگی خاک به سایر عناصر بالقوه سمی و برداشت نمونه از طول بیش‌تری از جاده‌های پر رفت و آمد می‌تواند محور اجرای پژوهش‌های آتی باشد.

۵. منابع

- Akar, Sh., Lorestani, B., Sobhanardakani, S., Cheraghi, M., & Moradi, O. (2019). Surveying the efficiency of *Plantanus orientalis* bark as biosorbent for Ni and Cr(VI) removal from plating wastewater as a real sample. *Environmental Monitoring and Assessment*, 191(6), 373.
- Ali Yari, A., Varvani, J., Toranj Zar, H., Zare, R., & Baghaei, A. H. (2021). The assessment of metal contamination status using the Nemro integrated pollution index. *Journal of Natural Environment*, 74(2), 345-357 (In Persian).
- Aminiyan, M. M., Baalousha, M., & Aminiyan, F. M. (2018). Evolution of human health risk based on EPA modeling for adults and children and pollution level of potentially toxic metals in Rafsanjan road dust: a case study in a semi-arid region, Iran. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(20), 19767-19778.
- An, S., Liu, N., Li, X., Zeng, S., Wang, X., & Wang, D. (2022). Understanding heavy metal accumulation in roadside soils along major roads in the Tibet Plateau. *Science of the Total Environment*, 802, 149865.
- Anwar, S., Naz, A., Ashraf, M. Y., & Malik, A. (2020). Evaluation of inorganic contaminants emitted from automobiles and dynamics in soil, dust, and vegetations from major highways in Pakistan. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(26), 32494-32508.
- Azimzadeh, B., & Khademi, H. (2013). Estimation of background concentration of selected heavy metals for pollution assessment of surface soils of Mazandaran province, Iran. *Journal of Water and Soil*, 27, 548-559 (In Persian).
- Baruah, S. G., Ahmed, I., Das, B., Ingtipi, B., Boruah, H., Gupta, S. K., Nema, A. K., & Chabukdhara, M. (2021). Heavy metal (loid) s contamination and health risk assessment of soil-rice system in rural and peri-urban areas of lower brahmaputra valley, northeast India. *Chemosphere*, 266, 129150.
- Bonanno, G. (2013). Comparative performance of trace element bioaccumulation and biomonitoring in the plant species *Typha domingensis*, *Phragmites australis* and *Arundo donax*. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 97, 124-130.
- Cheraghi, M., Sobhanardakani, S., Zandipak, R., Lorestani, B., & Merrikhpour, H. (2015). Removal of Pb(II) from aqueous solutions using waste tea leaves. *Iranian Journal of Toxicology*, 9(28), 1247-1253.
- Davodpour, R., Sobhanardakani, S., Cheraghi, M., Abdi, N., & Lorestani, B. (2019). Honeybees (*Apis mellifera* L.) as a potential bioindicator for detection of toxic and essential elements in the environment (case study: Markazi Province, Iran). *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 77(3), 344-358.
- Devi, U., Taki, K., Shukla, T., Sarma, K. P., Hoque, R. R., & Kumar, M. (2019). Microzonation, ecological risk and attributes of metals in highway road dust traversing through the Kaziranga National Park, Northeast India: implication for confining metal pollution in the national forest. *Environmental Geochemistry and Health*, 41(3), 1387-1403.
- Dietrich, M., Wolfe, A., Burke, M., & Krekeler, M. P. (2019). The first pollution investigation of road sediment in Gary, Indiana: anthropogenic metals and possible health implications for a socioeconomically disadvantaged area. *Environment International*, 128, 175-192.
- Ehtemae, N., Ghanavati, N., Nazarpour, A., Babaenejad, T., & James Watts, M. (2020). Assessment of potential ecological and human health risk of some selected heavy metals in street dusts in Ilam. *JWSS-Isfahan University of Technology*, 23(4), 183-197 (In Persian).
- Fan, P., Lu, X., Yu, B., Fan, X., Wang, L., Lei K., Yang Y., Zuo L., & Rinklebe J. (2022). Spatial distribution, risk estimation and source apportionment of potentially toxic metal (loid) s in resuspended megacity street dust. *Environment International*, 160, 107073.
- Farzan, M., & Sobhan Ardakani, S. (2016). Analysis of Fe, Pb, and Cd content of surface runoff in regions with high traffic intensity in Hamedan, Iran, in 2014. *Health System Research*, 12(2), 208-213 (In Persian).
- Forghani, G., Kelm, U., & Mazinani, V. (2019). Spatial distribution and chemical partitioning of potentially toxic elements in soils around Khatoon-Abad Cu Smelter, SE Iran. *Journal of Geochemical Exploration*, 196, 66-80.
- Galal, T. M., & Shehata, H. S. (2015). Bioaccumulation and translocation of heavy metals by *Plantago major* L. grown in contaminated soils under the effect of traffic pollution. *Ecological Indicators*, 48, 244-251.
- Ghanavati, N., Nazarpour, A., & Babaenejad, T. (2019). Assessment of the ecological and health risks of some heavy metals in roadside soils of Ahvaz, Iran. *Journal of School of Public Health and Institute of Public Health Research*, 16(4), 373-390 (In Persian).
- Gujre, N., Mitra, S., Soni, A., Agnihotri, R., Rangan, L., Rene, E. R., & Sharma, M. P. (2021). Speciation, contamination, ecological and human health risks assessment of heavy metals in soils dumped with municipal solid wastes. *Chemosphere*, 262, 128013.
- Habibi, H., Sobhanardakani, S., Cheraghi, M., Lorestani, B., & Kiani Sadr, M. (2022). Analysis, sources and health risk assessment of trace elements in street dust collected from the city of Hamedan, west of Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 15(2), 1-17.

- Habibi, H., Sobhanardakani, S., Cheraghi, M., Lorestani, B., & Kiani Sadr, M. (2021). Potential ecological risk assessment of arsenic and some heavy metals in street dusts collected from industrial, commercial and residential areas of city of Hamedan in 2019 using the ecotoxicological criteria. *Journal of Environmental Health Engineering*, 8(2), 1-13 (In Persian).
- Haghnazar, H., Hudson-Edwards, K. A., Kumar, V., Pourakbar, M., Mahdavianpour, M., & Aghayani, E. (2021). Potentially toxic elements contamination in surface sediment and indigenous aquatic macrophytes of the Bahmanshir River, Iran: Appraisal of phytoremediation capability. *Chemosphere*, 285, 131446.
- Hazratzadeh, S.h., & Sobhanardakani, S. (2018). Assessment of Zn, Pb, Cd, and Cu contamination in surface soils of urban parks in city of Hamedan. *Iranian Journal of Soil Research*, 32(3), 399-413 (In Persian).
- Heidari, M., Darijani, T., & Alipour, V. (2021). Heavy metal pollution of road dust in a city and its highly polluted suburb; quantitative source apportionment and source-specific ecological and health risk assessment. *Chemosphere*, 273, 129656.
- Hosseini, N. S., & Sobhanardakani, S. (2022). Pollution and potential ecological risk assessment of Pb, Cd, Cr and Ni in surface soils along some roads of city of Hamedan. *Journal of Environmental Health Engineering*, 9(3), 349-364 (In Persian).
- Hosseini, N. S., Sobhanardakani, S., Cheraghi, M., Lorestani, B., & Merrikhpour, H. (2020). Heavy metal concentrations in roadside plants (*Achillea wilhelmsii* and *Cardaria draba*) and soils along some highways in Hamedan, west of Iran. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(12), 13301-13314.
- Hosseini, N. S., & Sobhan Ardakani, S. (2021). Evaluation of the Impact of Traffic Volume on Pollution and Potential Ecological Risk of Zn, Pb, and Ni in Suburban Roadside Soils in Hamedan, Iran. *Iranian Journal of Soil Research*, 35(2), 119-134 (In Persian).
- Hosseini, N. S., Sobhanardakani, S., Cheraghi, M., Lorestani, B., & Merrikhpour, H. (2021). Feasibility of using *Achillea wilhelmsii* and *Cardaria draba* for biomonitoring and bioremediation of heavy metals (Zn, Pb and Ni) in the roadside environments. *Iranian Journal of Health and Environment*, 13(4), 607-620 (In Persian).
- Hosseini, N. S., Sobhanardakani, S., Cheraghi, M., Lorestani, B., & Merrikhpour, H. (2022). Expansive herbaceous species as bio-tools for elements detection in the vicinity of major roads of Hamedan, Iran. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 19(3), 1611-1624.
- Huang, H., Lin, C., Yu, R., Yan, Y., Hu, G., & Li, H. (2019). Contamination assessment, source apportionment and health risk assessment of heavy metals in paddy soils of Jiulong River Basin, Southeast China. *RSC advances*, 9(26), 14736-14744.
- Jankowski, K., Malinowska, E., Ciepiela, G. A., Jankowska, J., Wiśniewska-Kadzajan, B., & Sosnowski, J. (2019). Lead and cadmium content in grass growing near an expressway. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 76(1), 66-75.
- Jin, Y., O'Connor, D., Ok, Y. S., Tsang, D. C., Liu, A., & Hou, D. (2019). Assessment of sources of heavy metals in soil and dust at children's playgrounds in Beijing using GIS and multivariate statistical analysis. *Environment International*, 124, 320-328.
- Khalid, N., Noman, A., Aqeel, M., Masood, A., & Tufail, A. (2019). Phytoremediation potential of *Xanthium strumarium* for heavy metals contaminated soils at roadsides. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 16(4), 2091-2100.
- Liao, J., Cui, X., Feng, H., & Yan, S. (2021). Environmental background values and ecological risk assessment of heavy metals in watershed sediments: A comparison of assessment methods. *Water*, 14(1), 51.
- Liu, H., Zhang, Y., Yang, J., Wang, H., Li, Y., Shi, Y., ... & Hu, W. (2021). Quantitative source apportionment, risk assessment and distribution of heavy metals in agricultural soils from southern Shandong Peninsula of China. *Science of the Total Environment*, 767, 144879.
- Liu, H., Chen, L. P., Ai, Y. W., Yang, X., Yu, Y. H., Zuo, Y. B., & Fu, G. Y. (2009). Heavy metal contamination in soil alongside mountain railway in Sichuan, China. *Environmental Monitoring and Assessment*, 152(1), 25-33.
- Man, Q., Xu, L., & Li, M. (2022). Source identification and health risk assessment of heavy metals in soil: A case study of Lintancang Plain, Northeast China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(16), 10259.
- Mohammadi, S. M., Lorestani, B., Sobhan Ardakani, S., Cheraghi, M., & Tayebi, L. (2021). Source identification and ecological risk assessment of some heavy metals in surface soils collected from the vicinity of Arad-Kouh processing and disposal complex, Tehran, Iran. *Environmental Sciences*, 19(3), 1-22 (In Persian).
- Mohebian, M., Sobhanardakani, S., Taghavi, L., & Ghoddousi, J. (2021). Analysis and potential ecological risk assessment of heavy metals in the surface soils collected from various land uses around Shazand Oil Refinery Complex, Arak, Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 14(19), 1-16.

- Nazarpour, A., Ghanavati, N., & Babaenejad, T. (2017). Evaluation of the level of pollution and potential ecological risk of some heavy metals in surface soils in the Ahvaz oil-field. *Iranian Journal of Health and Environment*, 10(3), 391-400 (In Persian).
- Nikolaeva, O., Rozanova, M., & Karpukhin, M. (2017). Distribution of traffic-related contaminants in urban topsoils across a highway in Moscow. *Journal of Soils and Sediments*, 17(4), 1045-1053.
- Renu, K., Chakraborty, R., Myakala, H., Koti, R., Famurewa, A. C., Madhyastha, H., ... & Gopalakrishnan, A. V. (2021). Molecular mechanism of heavy metals (Lead, Chromium, Arsenic, Mercury, Nickel and Cadmium)-induced hepatotoxicity—A review. *Chemosphere*, 271, 129735.
- Roy, S., Gupta, S. K., Prakash, J., Habib, G., Baudh, K., & Nasr, M. (2019). Ecological and human health risk assessment of heavy metal contamination in road dust in the National Capital Territory (NCT) of Delhi. *India. Environmental Science and Pollution Research*, 26(29), 30413-30425.
- Sabet Aghlidi, P., Cheraghi, M., Lorestani, B., Sobhanardakani, S., & Merrikhpour, H. (2020). Analysis, spatial distribution and ecological risk assessment of arsenic and some heavy metals of agricultural soils, case study: South of Iran. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 18(2), 665-676.
- Sabzevari, E., & Sobhanardakani, S. (2018). Analysis of selected heavy metals in indoor dust collected from city of Khorramabad, Iran: A case study. *Jundishapur Journal of Health Sciences*, 10(3), e67382.
- Selahvarzi, S., & Sobhan Ardakani, S. (2022). Analysis and health risk assessment of toxic (Cd and Pb) and essential (Cu and Zn) elements through consumption of potato (*Solanum tuberosum*) cultivated in Iran. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 102(18): 6310-6320.
- Sobhanardakani, S. (2016). Evaluation of the water quality pollution indices for groundwater resources of Ghahavand plain, Hamadan province, western Iran. *Iranian Journal of Toxicology*, 10(3), 35-40.
- Sobhanardakani, S. (2018a). Non-carcinogenic risk assessment of heavy metals through exposure to the household dust (Case study: City of Khorramabad, Iran). *Annals of Military and Health Sciences Research*, 16(4), e86594.
- Sobhanardakani, S. (2018b). Human health risk assessment of potentially toxic heavy metals in the atmospheric dust of city of Hamedan, west of Iran. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(28), 28086-28093.
- Sobhanardakani, S. (2018c). Human health risk assessment of Cd, Cu, Pb and Zn through consumption of raw and pasteurized cow's milk. *Iranian Journal of Public Health*, 47(8), 1172.
- Sobhanardakani, S. (2019a). Ecological and human health risk assessment of heavy metal content of atmospheric dry deposition, a case study: Kermanshah, Iran. *Biological Trace Element Research*, 187(2), 602-610.
- Sobhanardakani, S. (2019b). Heavy metals health risk assessment through consumption of some foodstuffs marketed in city of Hamedan, Iran. *Caspian Journal of Environmental Sciences*, 17(2), 175-183.
- Sobhanardakani, S., Tayebi, L., & Hosseini, S. V. (2018). Health risk assessment of arsenic and heavy metals (Cd, Cu, Co, Pb, and Sn) through consumption of caviar of *Acipenser persicus* from Southern Caspian Sea. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(3), 2664-2671.
- Soltani-Gerdefaramarzi, S., Ghasemi, M., & Gheysouri, M. (2021). Pollution, human health risk assessment and spatial distribution of toxic metals in urban soil of Yazd City, Iran. *Environmental Geochemistry and Health*, 43(9), 3469-3484.
- Sun, R., Yang, J., Xia, P., Wu, S., Lin, T. & Yi, Y. (2020). Contamination features and ecological risks of heavy metals in the farmland along shoreline of Caohai plateau wetland, China. *Chemosphere*, 254, 126828.
- Tian, X., Zhang, H., Zhao, Y., Mehmood, K., Wu, X., Chang, Z., Luo, M., Liu, X., Ijaz, M., Javed, M.T., & Zhou, D. (2018). Transcriptome analysis reveals the molecular mechanism of hepatic metabolism disorder caused by chromium poisoning in chickens. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(16), 15411-15421.
- Wang, H.Z., Cai, L.M., Wang, Q.S., Hu, G.C., & Chen, L.G. (2021). A comprehensive exploration of risk assessment and source quantification of potentially toxic elements in road dust: A case study from a large Cu smelter in central China. *Catena*, 196,104930.
- Zhang, Y., Guo, Z., Peng, C., Deng, H. & Xiao, X. (2021). A questionnaire based probabilistic risk assessment (PRA) of heavy metals in urban and suburban soils under different land uses and receptor populations. *Science of the Total Environment*, 793, 148525.
- Yan, G., Mao, L., Liu, S., Mao, Y., Ye, H., Huang, T., Li, F., & Chen, L. (2018). Enrichment and sources of trace metals in roadside soils in Shanghai, China: a case study of two urban/rural roads. *Science of the Total Environment*, 631, 942-950.