



Assessment of environmental indices for soil lead contamination in a part of Shahr-e-Ray, Tehran Province

Shahla Rahmani Siyalarz¹ | Ali Keshavarzi² | Fereydoon Sarmadian³ | Mohsen Farahbakhsh

1. Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran: shahla.rahmani@ut.ac.ir
2. Corresponding Author, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran: alikesavarzi@ut.ac.ir
3. Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran: fsarmad@ut.ac.ir
3. Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran: mfbakhsh@ut.ac.ir

Article Info

Article type: Research Article

Article history:

Received: June. 19, 2024

Revised: Aug. 20, 2024

Accepted: Aug. 27, 2024

Published online: Nov. 2024

Keywords:

Lead,
Shahr-e-Ray,
Geoaccumulation Index,
Contamination Factor,
Enrichment Factor.

ABSTRACT

The rapid development of industry and economy has led to the entry of environmental pollutants, particularly heavy metals, into the soil, raising concerns among the global community regarding public health and food security. Consequently, the awareness and assessment of these elements have become significant in predicting hazards and related diseases, as well as establishing soil quality standards. This study aimed to quantify lead (Pb) contamination using various environmental indices in a part of Shahr-e-Ray, Tehran Province. To achieve this, 44 composite soil samples were collected from the 0-20 cm soil depth. After sample preparation, some physical and chemical properties were measured using standard methods, and the total concentration of lead in the soil was determined using the Aqua Regia method. Three environmental indices, including the Enrichment Factor, Geoaccumulation Index, and Contamination Factor, were employed to assess the potential risk of lead contamination. The results indicated that all examined samples exceeded the standard and recommended limit for lead concentration in Iran, with an average of 135.99 mg/kg. In term of the Geoaccumulation Index, the samples exhibited a range of (2.46-2.90), categorizing them in the moderately to heavily polluted class. For the Enrichment Factor, all samples fell into the high enrichment class, with a range of (6.48-9.31). The Contamination Factor also classified the samples as highly contaminated, with a range of (8.25-11.24) which is mainly influenced by human activities. Continuous monitoring and surveillance of lead concentration variations in the studied soils are essential for preserving production resources and achieving food security.

Cite this article: Rahmani Siyalarz, Sh., Keshavarzi, A., Sarmadian, F., & Farahbakhsh, M. (2024) Assessment of Environmental Indices for Soil Lead Contamination in a Part of Shahr-e-Ray, Tehran Province., *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 55 (9), 1485-1503. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.378270.669735>

© The Author(s).

Publisher: The University of Tehran Press.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.378270.669735>



EXTENDED ABSTRACT

Introduction

With the rapid development of industry and economy, the entry of environmental pollutants, especially heavy metals, into the soil has led to increasing concerns in the global community regarding public health and food security. The pollution of heavy metals in agricultural soils is rapidly increasing, which are among the most dangerous types of pollution due to the lack of specific symptoms, low transfer rate, and irreversibility, threatening the health of animals and humans along the entire food chain. Therefore, awareness and assessment of these elements have become an important indicator in predicting the risks and diseases caused by them, as well as determining soil quality standards. The present study aimed to quantify lead (Pb) pollution using various environmental indices in a part of the urban land of Shahr-e-Ray, Tehran province.

Methods

After conducting field visits and studying the base maps, in order to consider potential human factors controlling the changes in total lead concentration, 44 composite soil samples were collected from the depth of 0 to 20 centimeters. After sample preparation, the physical and chemical properties of the soil, such as soil texture, organic carbon (OC), soil acidity (pH), electrical conductivity (EC), available phosphorus, and soil lime content, were measured using standard soil analysis methods. Then, the total lead concentration in the soil was measured using an inductively coupled plasma atomic emission spectrometry (ICP) device. In this research, three environmental indices, namely the enrichment factor (EF), the geoaccumulation index (I_{geo}), and the contamination factor (C_f), were used to evaluate and determine the levels of lead contamination in the soil. Then, in order to conduct a more detailed examination and gain better awareness of the presence of lead pollution and its distribution in the study area, a spatial distribution map of the total lead concentration in the study area was prepared using the ordinary kriging interpolation method.

Results and Discussion

The results showed that all the investigated samples had total lead concentrations (with an average of 135.99 mg/kg) higher than the standard and recommended limit for lead in Iran, clearly revealing the impact of the establishment and positioning of potential pollutant sources in the region and the role of human activities. The soil pollution assessments for lead in the region were calculated and presented using the contamination factor, enrichment factor, and geoaccumulation index for 44 study points. According to the results, in terms of the geoaccumulation index with a range of variation (2.46-2.90), the samples were classified as moderately to severely polluted, and for the enrichment factor with a minimum and maximum (6.48-9.31), all the samples were in the highly enriched class. The contamination factor also ranked the samples in the very high pollution class for this element with a range of variation (8.25-11.24). The interpretation of the environmental indices indicates high lead pollution levels, which are mainly influenced by human activities. Based on the spatial distribution map, the highest lead values were observed in the northern and northwestern parts of the study area. The location of the South Tehran wastewater treatment plant in the northern part of the region, the Iranol motor oil refinery in the northwestern part, and the proximity of this area to the main highway connecting Tehran to the south of the country, as well as the high traffic volume in the main and secondary routes of this city, can be considered as reasons for the higher lead concentrations in these sections. Given the severe and excessive pollution in the region, continuous monitoring and tracking of changes in the concentration of this element in the studied soils are essential for the preservation of production resources and the achievement of food security.

Author Contributions

Conceptualization, Sh.R.S., A.K., F.S. and M.F.; methodology, Sh.R.S. and A.K.; software, Sh.R.S. and A.K.; validation, Sh.R.S. and A.K.; formal analysis, Sh.R.S. and A.K.; investigation, Sh.R.S. and A.K.; resources, A.K.; data curation, Sh.R.S. and A.K.; writing—original draft preparation, Sh.R.S. and A.K.; writing—review and editing, Sh.R.S., A.K. and F.S.; visualization, Sh.R.S. and A.K.; supervision, A.K.; project administration, A.K.; funding acquisition, A.K. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Data Availability Statement

Data is available on reasonable request from the authors.

Acknowledgements

The authors would like to thank the reviewers and editor for their critical comments that helped to improve the paper. The authors gratefully acknowledge the support and facilities provided by the Department of Soil

Science, University of Tehran, Iran.

Ethical considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

ارزیابی شاخص‌های زیست‌محیطی آلودگی خاک به عنصر سرب در بخشی از اراضی شهری استان تهران

شهلا رحمانی سیالرز^۱ | علی کشاورزی^۲ | فریدون سرمدیان^۳ | محسن فرحبخش^۴

۱. گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران. رایانامه: shahla.rahmani@ut.ac.ir

۲. نویسنده مسئول، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران. رایانامه: alikesavarzi@ut.ac.ir

۳. گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران. رایانامه: fsarmad@ut.ac.ir

۴. گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران. رایانامه: mfbakshsh@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	با توسعه سریع صنعت و اقتصاد، ورود آلاینده‌های زیست‌محیطی و در صدر آن‌ها فلزات سنگین به خاک، موجب افزایش نگرانی جامعه جهانی در رابطه با سلامت جامعه و امنیت غذایی شده است. از این رو آگاهی و ارزیابی در مورد این عناصر، به شاخصی مهم در پیش‌بینی خطرات و بیماری‌های ناشی از آن‌ها و تعیین استانداردهای کیفیت خاک تبدیل شده است. مطالعه حاضر باهدف کمی‌سازی آلودگی فلز سرب با استفاده از شاخص‌های زیست‌محیطی مختلف در بخشی از اراضی شهری استان تهران انجام پذیرفت. بدین منظور ۴۴ نمونه مرکب خاک از عمق ۰ تا ۲۰ سانتی‌متری تهیه و پس از آماده‌سازی نمونه‌ها، اندازه‌گیری برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی به روش‌های استاندارد انجام و سپس میزان غلظت کل سرب خاک به روش استاندارد تعیین شد. در این تحقیق از سه شاخص زیست‌محیطی شامل فاکتور غنی‌شدگی (EF)، شاخص زمین‌انباشتگی (Igeo) و فاکتور آلودگی (Cf) جهت ارزیابی پتانسیل خطرپذیری فلز سرب استفاده شد. نتایج نشان داد همه نمونه‌های بررسی‌شده از نظر سرب کل (با میانگین ۱۳۵/۹۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم) دارای غلظتی بالاتر از حد استاندارد و قابل توصیه سرب برای ایران بودند که تأثیرات استقرار و جانمایی منابع احتمالی آلاینده در منطقه و نقش فعالیت‌های انسانی را به وضوح نمایان می‌ساخت. از نظر شاخص زمین‌انباشتگی با دامنه تغییرات (۲/۹۰-۲/۴۶) نمونه‌ها در کلاس آلودگی متوسط تا شدید و برای فاکتور غنی‌شدگی با کمینه و بیشینه (۶/۴۸-۹/۳۱) همه نمونه‌ها در کلاس غنی‌شدگی زیاد قرار می‌گیرند. فاکتور آلودگی نیز با دامنه تغییرات (۸/۲۵-۱۱/۲۴) نمونه‌ها را در کلاس آلودگی خیلی زیاد به این عنصر قرار داد. تفسیر نتایج شاخص‌های زیست‌محیطی نشان دهنده‌ی بالا بودن مقادیر آلودگی سرب بوده که عمدتاً تحت تأثیر فعالیت‌های انسانی است و نظارت مستمر و پایش تغییرات غلظت این عنصر در خاک‌های مورد مطالعه، برای حفظ منابع تولید و دستیابی به امنیت غذایی ضروری است.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۳/۳۰	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۵/۳	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۶/۶	
تاریخ انتشار: آذر ۱۴۰۳	
واژه‌های کلیدی:	
سرب،	
شهری،	
شاخص زمین‌انباشتگی،	
فاکتور آلودگی،	
فاکتور غنی‌شدگی.	

استناد: رحمانی سیالرز، شهلا؛ کشاورزی، علی؛ سرمدیان، فریدون و فرحبخش، محسن (۱۴۰۳). ارزیابی شاخص‌های زیست‌محیطی آلودگی خاک به عنصر سرب در بخشی

از اراضی شهری استان تهران، *مجله تحقیقات آب و خاک ایران*، ۵۵ (۹)، ۱۵۰۳-۱۴۸۵. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.378270.669735>



© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.378270.669735>

مقدمه

خاک به‌عنوان یک منبع تجدیدناپذیر با تأمین حدود ۹۵ درصد از تولید جهانی غذا و همچنین ارائه خدمات دیگری مانند تولید زیست‌توده، تأمین منابع طبیعی و حفظ تنوع زیستی، از حیات روی زمین پشتیبانی می‌کند (Ferreira et al., 2022). آلودگی فلزات سنگین در خاک یکی از مهم‌ترین مسائل جهانی است (Tajudin et al., 2022; Hammam et al., 2022). این فلزات را می‌توان به‌عنوان عناصر طبیعی که دارای وزن اتمی بیش از ۲۰ و چگالی پنج برابر بیشتر از آب هستند تعریف کرد (Ali et al., 2019).

فلزات سنگین به‌عنوان آلاینده‌های پایدار، نداشتن علائم خاص، سرعت انتقال پایین و همچنین برگشت‌ناپذیر بودن از خطرناک‌ترین آلودگی‌های مرتبط با سلامت انسان و حیوانات طبقه‌بندی می‌شوند (Jiang et al., 2019; Chen et al., 2021). میزان بالای عناصر کمیاب در خاک‌ها، به‌ویژه در خاک‌های کشاورزی، نه تنها بر کیفیت و عملکرد آن‌ها تأثیر می‌گذارد، بلکه بر کیفیت غذا و سلامت انسان نیز تأثیر می‌گذارد (Wieczorek and Baran., 2022; Lu et al., 2021). سرب (Pb) یک عنصر بسیار سمی و غیرقابل تجزیه زیستی است که در موجودات زنده عملکرد متابولیکی ندارد. این عنصر می‌تواند به‌سرعت جذب شده و به داخل بافت‌های گیاهی منتقل شود. سپس وارد زنجیره غذایی شده و باعث سمیت گیاهی گردد. تجمع بیش از حد این عنصر در بافت‌های گیاهی، سلامت عمومی را با چالش‌های قابل توجهی مواجه می‌کند. افزایش فشارخون، درد عضلات و مفاصل، مشکلات حافظه و تمرکز از اثرات سمی سرب بر سلامت انسان است. (Mousavi et al., 2022).

استفاده از کودهای آلی و معدنی مختلف بدون توجه به اثرات مخرب آن‌ها روی فعالیت‌های انسانی، مانند انتشارات صنعتی و ترافیکی و شیوه‌های مختلف استفاده از اراضی ممکن است باعث افزایش تجمع این عنصر در اکوسیستم‌های مختلف شود. به‌طور کلی از طریق اعمال نهاده‌های مختلف و آبیاری با پساب‌ها نه تنها خاک و آب را آلوده می‌کند، بلکه کیفیت و ایمنی غذا نیز تحت تأثیر قرار می‌گیرد. مصرف غذاهای آلوده می‌تواند منجر به بیماری‌های مختلفی مانند سرطان دستگاه گوارش شود (Mousavi et al., 2024). برای کاهش خطر قرارگرفتن سلامتی انسان در معرض مواد شیمیایی سمی مرتبط با آلودگی خاک، نظارت و ارزیابی دقیق جهت توسعه یک استراتژی اصلاحی مناسب و کاهش اثرات منفی این عناصر در مکان‌هایی که غلظت آن‌ها بیش از حد مجاز است بسیار مهم است (Linnik et al., 2021; yang et al., 2022). به‌منظور تعدیل و کاهش اثرات منفی فلزات سنگین در خاک، دو استراتژی مؤثر وجود دارد: (۱) روش‌های تصفیه، اصلاح، پالایش و بهسازی خاک که از طریق روش‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی می‌توانند به کاهش غلظت این فلزات منجر شوند. روش‌های فیزیکی شامل جداسازی و استخراج فلزات از خاک است، در حالی که روش‌های شیمیایی می‌توانند شامل استفاده از مواد شیمیایی برای تثبیت یا حذف فلزات باشند. همچنین، روش‌های بیولوژیکی مانند استفاده از گیاهان برای جذب فلزات می‌توانند به‌عنوان یک راهکار سبز و پایدار در نظر گرفته شوند. (۲) روش‌های مبتنی بر مدیریت و کنترل منابع آلودگی، شامل شناسایی و مدیریت منابع اصلی آلودگی، مانند فعالیت‌های صنعتی و کشاورزی، می‌توانند به کاهش ورود فلزات سنگین به خاک کمک کنند. این روش‌ها، شامل اجرای مقررات سخت‌گیرانه‌تر برای صنایع، استفاده از تکنولوژی‌های پاک و پایدار و آموزش ترویجی کشاورزان در مورد استفاده بهینه از کودها و سموم است. همچنین، ایجاد مناطق حفاظتی و استفاده از پوشش‌های گیاهی می‌تواند به کاهش فرسایش خاک و جلوگیری از ورود آلودگی به خاک‌های سالم و غیر آلوده کمک کنند (Mousavi et al., 2024). در حال حاضر از رویکردها و روش‌های مختلفی برای ارزیابی میزان آلودگی خاک به عناصر سنگین استفاده می‌شود. متداول‌ترین موارد مورد استفاده، استانداردهای کیفیت خاک (مقادیر حدی مربوط به محتوای یک عنصر معین) و شاخص‌های ژئوشیمیایی هستند؛ زیرا تعیین غلظت این عناصر در خاک به‌تنهایی نشان‌دهنده میزان آلودگی و اثرات مخرب آن‌ها در محیط نخواهد بود (Kumar et al., 2018; Wieczorek and Baran., 2022; Nomas and Al-Shamma., 2023). شاخص‌های آلودگی برای تعیین میزان آلودگی خاک با فلزات سنگین و خطرات محیطی احتمالی حیاتی هستند (Xiao et al., 2020). به دلیل سمیت بالای فلزات سنگینی مانند سرب و کادمیوم (Cd) شناسایی منابع و درک تغییرپذیری مکانی آن‌ها از محاسبه شاخص‌های آلودگی استفاده می‌شود (Adnan et al., 2022). تاکنون شاخص‌های آلودگی مختلفی از جمله شاخص زمین‌انباشتی^۱، فاکتور غنی‌شدگی^۲ و فاکتور آلودگی^۳ برای ارزیابی کیفیت محیط‌زیست بر اساس محتوای فلزات سنگین در خاک ارائه شده است (Santos et al., 2023; Sahraei et al., 2023; Shokr et al., 2021; Khan et al., 2021; Frances et al., 2017). از آنجایی که این شاخص‌ها بیانگر

1_ Geo-accumulation Index (Igeo)

2_ Enrichment Factor (EF)

3_ Contamination Factor (Cf)



مفاهیم مختلفی در مورد فلزات سنگین هستند، استفاده از شاخص‌های مختلف در مطالعات آلودگی خاک‌ها ضروری است (Amiri et al., 2022). در برخی از مطالعات استفاده از شاخص‌های فاکتور غنی‌شدگی، شاخص زمین‌انباشتگی و فاکتور آلودگی مهم‌ترین شاخص‌ها جهت ارزیابی عناصر سنگین در خاک‌های معرفی شده‌اند (Kumar et al., 2018; Nomas and Al-Shamma., 2023). فاکتور غنی‌شدگی، غنی‌سازی نسبی را در هر آلاینده در مقایسه با خاک‌های ماقبل صنعتی شدن از همان محیط نشان می‌دهد (Sayadi and Sayyed., 2011). علاوه بر این، شاخص زمین‌انباشتگی اثر تجمع فلزات سنگین را باتوجه به سطوح طبیعی پس‌زمینه عناصر نشان می‌دهد (Amiri et al., 2022). فاکتور آلودگی نیز برای ارزیابی سطح آلودگی فلزات در نمونه‌های خاک از طریق تقسیم غلظت آن در خاک بر مقدار پس‌زمینه آن استفاده می‌شود (Nomas and Al-Shamma., 2023).

Mousavi et al (2022) در پژوهش خود، به بررسی وضعیت غلظت سرب در برخی اراضی کشاورزی، خاک‌های نزدیک به معادن و همچنین در وزن خشک اندام هوایی برخی گیاهان و سبزیجات در ایران پرداختند. بنا به گزارش ایشان، تغییرات مقادیر غلظت سرب در اراضی کشاورزی تا صنعتی منطقه نائین، از ۵۱/۳۶ تا ۶۴۲/۵۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم و در مناطق شهری و مسکونی شهر بابل از ۱۰/۵ تا ۶۲/۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم در نوسان است. بر اساس یافته‌های این محققین، تغییرات مقادیر غلظت سرب در وزن خشک اندام هوایی برخی گیاهان مانند اسفناج، کاهو، کلم، گشنیز و شوید در شهر اصفهان، به ترتیب از ۱/۱۵ تا ۲/۹۳، ۱/۳۶ تا ۳/۲۳، ۰/۰۴ تا ۱۵/۲۵، ۰/۶۴ تا ۱/۸۹ و ۰/۴۲ تا ۲/۲۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خشک گیاهی در نوسان است (Adnan et al (2022). در مطالعه خود بر روی آلودگی خاک‌ها مهم‌ترین شاخص‌های مورد استفاده برای شناسایی غلظت فلزات در محیط‌های آلوده را شاخص زمین‌انباشتگی، فاکتور آلودگی و فاکتور غنی‌شدگی معرفی کردند.

Rezaei et al (2019) مطالعه‌ای به منظور ارزیابی آلودگی فلزات سنگین در جنوب شرق ایران انجام دادند. در این تحقیق از شاخص‌های آلودگی شامل فاکتور آلودگی، فاکتور غنی‌شدگی و شاخص انباشتگی زمین برای ارزیابی آلودگی فلزات ناشی از سرب، نیکل، سلیسیم، مولیبدن و روی در خاک‌ها استفاده شد. نتایج نشان داد میانگین فلزات سرب، نیکل، مس، مولیبدن و روی نسبت به میانگین جهانی کمیت بالاتری دارند. (Huang et al (2020) به ارزیابی منابع انسانی عناصر سنگین در خاک اراضی زراعی با استفاده از تحلیل آماری پرداخته و نشان دادند که میانگین غلظت کل سرب در خاک بیشتر از مقادیر زمینه بود. نتیجه‌گیری شد که فعالیت‌های انسانی بیش از ۶۰ درصد از غلظت‌های سرب و کادمیوم را در خاک‌های شیانگژو را تشکیل می‌دهد. (Mohammadi et al (2018) نیز در اطراف دریاچه ارومیه با بررسی شاخص‌های فاکتور آلودگی، فاکتور غنی‌شدگی و شاخص زمین‌انباشتگی، آلودگی جزئی خاک به سرب، منابع آلوده‌کننده انسانی مانند صنایع و ترافیک جاده‌ای را برای آن گزارش کردند.

فصیحی و حمیدی (۱۳۹۹) در مطالعه خود به منظور بررسی آلودگی خاک‌های دهستان‌های قلعه‌نو و کهریزک شهرستان ری به این نتیجه رسیدند که سرب با دامنه غلظت کل ۶ تا ۱۶۸ بر حسب میلی‌گرم در کیلوگرم در نمونه خاک‌های منطقه مورد مطالعه از حدود مجاز بالاتر بود و در مجموع شدت آلودگی در قسمت‌هایی که استفاده از فاضلاب‌های تصفیه نشده در آبیاری انجام می‌گرفت بالاتر گزارش شد. باقری و همکاران (۱۴۰۰) با بررسی وضعیت آلودگی خاک به سرب در اراضی زراعی جنوب تهران به این نتیجه رسیدند که استفاده از فاضلاب‌های نهر فیروزآباد جهت آبیاری اراضی این منطقه، وجود کارخانه‌ها و وسایل نقلیه سبب غلظت‌های بالای فلزات سنگین مشاهده شده در منطقه است. آن‌ها بیان کردند که غلظت فلزات سنگین در اراضی و همچنین محصولات زراعی منطقه جنوب تهران روند افزایشی دارد.

قرارگیری تصفیه‌خانه فاضلاب جنوب تهران و سرازیری حجم سنگینی از فاضلاب شهر تهران به این محدوده و از طرفی مشکلات کمبود آب و عدم آگاهی کشاورزان منجر به استفاده وسیعی از فاضلاب شهری در اراضی کشاورزی شده است. از دیگر منابع آلاینده در این شهرستان، قرارگیری آن در مجاور شاهراه حمل‌ونقلی تهران به جنوب کشور است. حجم سنگین خودروهای عبوری از شهرستان و مجاورت با آن، مقادیر زیادی از آلودگی عناصر سنگین را به شهرستان وارد کرده است. از این‌رو نیاز مبرمی در بررسی وجود مقادیر و خطرات عناصر سنگین در خاک‌های زراعی این مناطق وجود دارد. با مطالعه منابع علمی و توجه به گپ تحقیقاتی در موضوعات مشابه، نوآوری پژوهش حاضر از لحاظ "روش‌شناختی" در دو بخش قابل‌بیان است: (۱) استفاده از سه شاخص زیست‌محیطی برای ارزیابی آلودگی خاک: ارائه این روش ترکیبی، امکان ارزیابی جامع‌تر پتانسیل خطرپذیری فلز سرب را ایجاد نموده و درک جامع‌تری از وضعیت آلودگی زیست‌محیطی فراهم می‌سازد، (۲) بررسی توزیع مکانی و تغییرات نقطه‌ای و تغییرات پیوسته آلودگی به عنصر سرب در منطقه مورد مطالعه که به تحلیل ارزیابی پتانسیل خطرپذیری فلز سرب در اراضی مورد مطالعه کمک شایان توجهی می‌نماید. بدین منظور، هدف اصلی از انجام و طراحی این

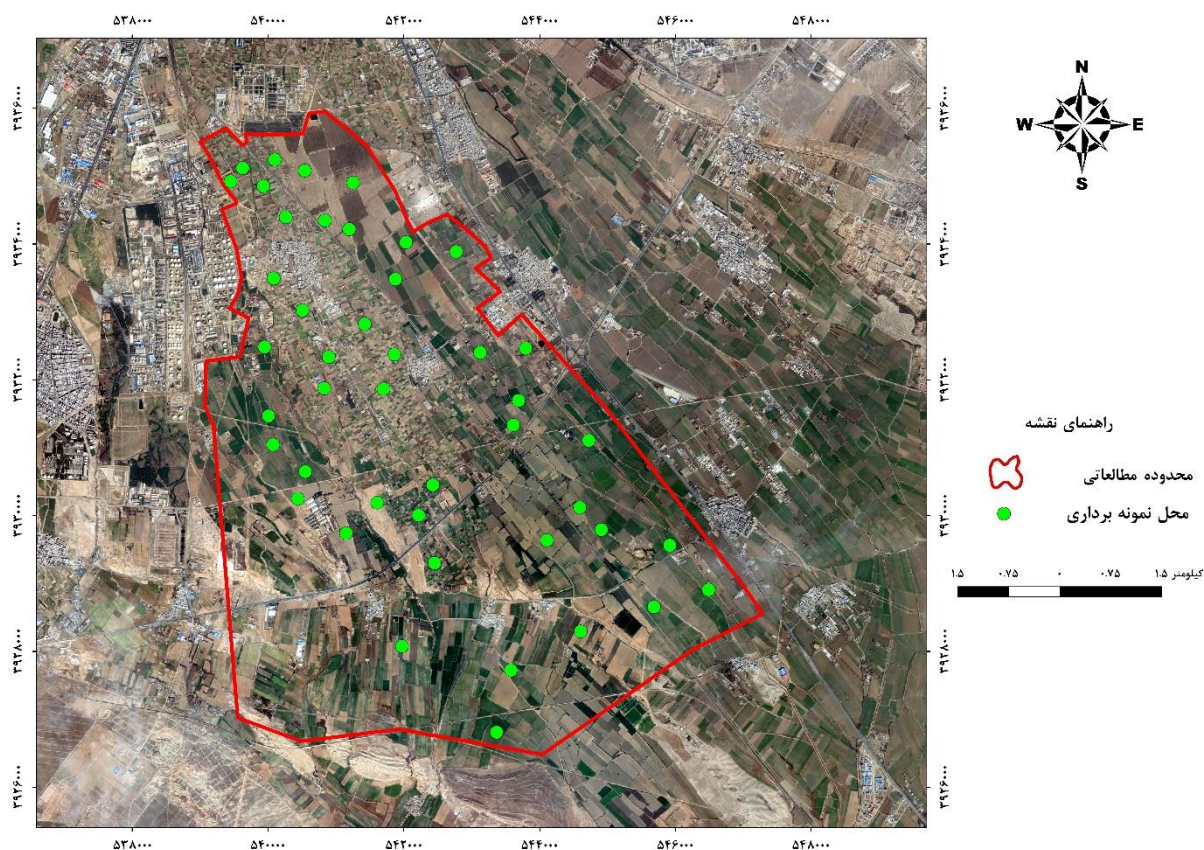
تحقیق، تعیین غلظت کل عنصر سرب و ارزیابی میزان خطر زیست‌محیطی آن با استفاده از شاخص فاکتور غنی‌شدگی، شاخص زمین‌انباشتگی و فاکتور آلودگی می‌باشد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

شکل ۱، موقعیت محدوده مورد مطالعه را نشان می‌دهد. منطقه مطالعاتی بخشی از اراضی شهرستان ری در استان تهران، دارای شیب ملایمی با امتداد شمالی-جنوبی و به وسعت تقریبی ۵۵۰۰ هکتار است که بین طول جغرافیایی ۵۳۹۵۴۰ تا ۵۴۷۳۱۸ شرقی و عرض جغرافیایی ۳۹۲۶۴۶۹ تا ۳۹۳۵۹۶۴ شمالی در سیستم utm زون ۳۹S واقع شده است. عمده تولیدات کشاورزی در این شهرستان شامل سبزی، صیفی‌جات، گندم و کلزا است. این شهرستان از شمال به تهران، از جنوب به شهرستان قم، از شرق به شهرستان ورامین و شهرستان پاکدشت و از غرب به شهرستان‌های اسلام‌شهر، زرنديه و رباط کریم محدود می‌شود. رژیم‌های رطوبتی و حرارتی خاک‌های این منطقه به ترتیب اریدیک و ترمیک می‌باشند. خاک‌های غالب منطقه در رده‌های اریدی سول و انتی سول قرار دارند. بر اساس اطلاعات آماری بلندمدت ۲۰ ساله ایستگاه نزدیک و تأثیرگذار در منطقه (ایستگاه سینوپتیک امام خمینی (ره)) در استخراج آماره‌های اقلیمی، میانگین بارندگی سالیانه شهرری ۲۰۹ میلی‌متر و میانگین درجه حرارت سالانه آن ۱۹ درجه سانتی‌گراد است. ارتفاع این شهرستان از سطح دریا ۱۰۶۰ متر است.

این محدوده به‌واسطه نزدیکی به کلان‌شهر تهران، متأثر از آلودگی فاضلاب‌ها و پساب‌های شهری و صنعتی تهران بوده و از سوی دیگر، در مجاورت مجموعه بزرگ فعالیت‌های پالایش نفت و ذخیره و پخش فرآورده‌های نفتی قرار داشته که مکان‌گزینی و استقرار آن‌ها در این منطقه به دلیل نزدیکی به شهر تهران بوده و آلاینده‌گی، خصلت ذاتی تمامی این فعالیت‌هاست. از آنجایی که خاک‌های این منطقه، تحت تأثیر عوامل آلوده‌کننده گوناگون اشاره‌شده، قرار گرفته‌اند، سلامت محیط‌زیست پیرامون آن به خطر افتاده است.



شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه در شهرستان ری و جانمایی نقاط نمونه‌برداری از خاک

نمونه‌برداری و آزمایشات فیزیکی و شیمیایی خاک

پس از انجام بازدیدهای میدانی و مطالعه نقشه‌های پایه، به منظور در نظر گرفتن عوامل انسانی احتمالی کنترل‌کننده تغییرات غلظت کل سرب در خاک‌های منطقه مورد مطالعه مانند شبکه حمل و نقل جاده‌ای، وضعیت کاربری‌های اراضی، موقعیت قرارگیری تصفیه‌خانه فاضلاب جنوب تهران و پالایشگاه، از روش طبقه‌بندی ایزو کلاستر^۱ با تأکید بر عوامل اشاره شده و نظر کارشناسی، بهره گرفته شد (شکل ۱) و ۴۴ نمونه مرکب خاک از عمق صفر تا ۲۰ سانتی‌متری به کمک دستگاه GPS برداشت زمینی گردید. نمونه‌ها پس از انتقال به آزمایشگاه، هواخشک شده و از الک ۲ mm عبور داده شدند. برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی مانند بافت خاک، کربن آلی (OC)، اسیدیته خاک (pH)، قابلیت هدایت الکتریکی (EC)، فسفر قابل جذب و مقادیر آهک خاک با استفاده از روش‌های استاندارد آنالیزهای خاک اندازه‌گیری شدند (Sparks et al., 1996; Carter and Gregorich., 2007). برای اندازه‌گیری غلظت کل عنصر سرب ابتدا ۱ گرم خاک را وزن کرده و نسبت (۱ به ۳)، ۲/۵ میلی‌لیتر اسید نیتریک HNO₃ و ۷/۵ میلی‌لیتر HClO₄ به خاک اضافه شد. نمونه‌ها بعد از گذشت ۱۶ ساعت روی یک اجاقک با دمای ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد در زیر هود به مدت ۲ ساعت حرارت داده شده و پس از آن از کاغذ صافی واتمن ۴۲ عبور داده شده و در ادامه عصاره به دست آمده درون یک بالن ۵۰ میلی‌لیتری با آب مقطر به حجم رسانده شدند. غلظت کل عنصر سرب با استفاده از دستگاه طیف‌سنجی نشری اتمی پلاسما جفت‌شده القایی (ICP-OES) مدل (GBC Scientific Equipment) GBC Integra XL (Ltd) مورد اندازه‌گیری قرار گرفت.

محاسبه شاخص‌های زیست‌محیطی خاک

به منظور ارزیابی و تعیین سطوح آلودگی خاک به فلزات سنگین از شاخص‌های مختلف زیست‌محیطی استفاده می‌شود (حمزه نژاد و خداوردیلو، ۱۳۹۹). یکی از روش‌های کمی‌سازی آلودگی خاک استفاده از شاخص‌های آلودگی برای ارزیابی درجه/سطح آلودگی خاک و خطرات زیست‌محیطی است که پژوهشگران متعددی تاکنون از آن استفاده کرده‌اند (Qingjie et al., 2008; Rinklebe et al., 2019; Xiao et al., 2020; Bali and Sidhu, 2021). استفاده از این شاخص‌های آلودگی ممکن است به شناسایی منبع آلودگی در خاک کمک کند (Rinklebe et al., 2019; Bali and Sidhu., 2021; Paz-Ferreiro et al., 2016). در این تحقیق سه شاخص، فاکتور غنی‌شدگی، شاخص زمین‌انباشتگی و فاکتور آلودگی محاسبه شدند.

فاکتور غنی‌شدگی (EF)

این فاکتور جهت ارزیابی تأثیر احتمالی فعالیت انسانی بر غلظت فلزات سنگین در خاک است و روش مناسبی برای تفکیک منشأ طبیعی و انسانی است (Wang et al., 2018). در محاسبه این شاخص از عناصر مرجع که معمولاً Fe, Al, Ca, Ti, Sc یا Mn هستند استفاده می‌شود (Adnan et al., 2022). فاکتور غنی‌شدگی را می‌توان برای تعیین منابع سنگین در خاک سطحی با استفاده از یک عنصر مرجع با استفاده از فرمول زیر محاسبه کرد (Sutherland 2000; Peng et al., 2016):

$$EF = \frac{\left(\frac{C_x}{C_{ref}}\right)_{sample}}{\left(\frac{B_x}{B_{ref}}\right)_{background}} \quad \text{رابطه ۱}$$

در این رابطه C_x غلظت عنصر در نمونه مورد مطالعه، C_{ref} غلظت عنصر مرجع در نمونه مورد مطالعه، B_x غلظت عنصر مورد نظر در زمینه (خاک یا پوسته زمین) و B_{ref} غلظت عنصر مرجع در زمینه است (Peng et al., 2016). هر چه مقدار این شاخص بیشتر باشد نشان می‌دهد که سهم عوامل انسانی در افزایش آلودگی فلز مورد نظر در خاک منطقه مورد مطالعه بیش‌تر است (حمزه نژاد و خداوردیلو، ۱۳۹۹).

شاخص زمین‌انباشتگی (Igeo)

شاخص زمین‌انباشتگی (Igeo) اولین بار توسط Muller (۱۹۶۹) معرفی شد و سپس به شاخص مناسبی برای ارزیابی سطح آلودگی در نمونه‌های خاک و رسوب تبدیل شد. اساس شاخص زمین‌انباشتگی، مقایسه غلظت اندازه‌گیری شده فلز مورد نظر با غلظت پس‌زمینه ژئوشیمیایی آن در خاک است (Alam et al., 2020). به کمک این شاخص درجه آلودگی خاک‌های مختلف تعیین می‌شود. برای محاسبه شاخص زمین‌انباشتگی، از معادله زیر استفاده شد:

$$I_{geo} = \log_2 \left(\frac{C_{sample}}{1.5 \times C_{background}} \right) \quad \text{رابطه ۲}$$

در این رابطه، C_{sample} غلظت عنصر مورد نظر در نمونه رسوب یا خاک و $C_{background}$ غلظت زمینه فلز است (Mazidah et al., 2022). عدد ۱/۵ در این معادله ثابت است که امکان تجزیه و تحلیل تغییرپذیری فلزات سنگین را در نتیجه فرایندهای طبیعی فراهم می‌کند (Guan et al., 2014; Nowrouzi and Pourkhabbaz., 2014). این روش امکان ارزیابی میزان آلودگی فلزات در هفت طبقه بر اساس افزایش مقدار عددی شاخص را فراهم می‌سازد.

فاکتور آلودگی (C_f)

با تقسیم غلظت کل هر فلز سنگین اندازه‌گیری شده بر مقدار پس‌زمینه، فاکتور آلودگی هر فلز در مطالعه محاسبه شد. از معادله زیر برای محاسبه C_f استفاده شد (El Behairy et al., 2022; Nomas and Al-Shamma., 2023) که در آن:

$$C_f = \frac{C_m}{C_p} \quad \text{رابطه ۳}$$

که در این معادله C_m غلظت کل فلزات سنگین اندازه‌گیری شده و C_p مقدار غلظت زمینه هر فلز است. در منطقه مورد مطالعه در این پژوهش، برای سرب غلظت ۱۴ میلی‌گرم در کیلوگرم (میانگین غلظت این فلز در پوسته زمین) به عنوان غلظت زمینه در نظر گرفته شد که مورد تأیید برخی پژوهش‌های علمی دیگر است (باقری و همکاران، ۱۳۹۶؛ سیاحتی اردکانی و همکاران، ۱۳۹۷؛ صحرایی و همکاران، ۱۴۰۲). تجزیه و تحلیل سطح آلودگی خاک و خطر بالقوه سرب در خاک با استفاده از شاخص‌های ژئوشیمیایی انجام شد (جدول ۱).

جدول ۱. کلاس شاخص‌های آلودگی مورد مطالعه

منابع	شرایط خاک	محدوده شاخص‌ها	شاخص
Wang et al., 2018	حداقل غنی‌شدگی	$EF < 2$	EF (شاخص غنی‌شدگی)
	غنی‌شدگی متوسط	$EF = 2 - 5$	
	غنی‌شدگی زیاد	$EF = 5 - 20$	
	غنی‌شدگی خیلی زیاد	$EF = 20 - 40$	
Cai et al., 2019	غنی‌شدگی فوق‌العاده زیاد	$EF > 40$	I_{geo} (شاخص زمین‌انباشتگی)
	بدون آلودگی	$I_{geo} \leq 0$	
	بدون آلودگی تا نسبتاً آلوده	$0 \leq I_{geo} < 1$	
	نسبتاً آلوده	$1 \leq I_{geo} < 2$	
	آلودگی متوسط تا شدید	$2 \leq I_{geo} < 3$	
	به شدت آلوده	$3 \leq I_{geo} < 4$	
Kabata-Pendias, 2011	به شدت تا بسیار آلوده	$4 \leq I_{geo} < 5$	C_f (فاکتور آلودگی)
	آلودگی فوق‌العاده بالا	$I_{geo} > 5$	
	آلودگی کم	$C_f < 1$	
	آلودگی متوسط	$1 < C_f \leq 3$	
	آلودگی زیاد	$3 \leq C_f \leq 6$	
	آلودگی خیلی زیاد	$6 \leq C_f$	

نقشه تغییرپذیری مکانی سرب خاک

به منظور بررسی دقیق‌تر و آگاهی بهتر از وضعیت وجود آلاینده‌ی فلز سرب و پراکندگی و توزیع آن در منطقه مورد مطالعه، نقشه توزیع مکانی با استفاده از روش درون‌یابی کریجینگ معمولی^۱ تهیه شد. استفاده از کریجینگ معمولی جهت درون‌یابی و پهنه‌بندی خصوصیات خاک روشی مناسب است (سرمدیان و تیموری بردیانی، ۱۴۰۱).

در این مطالعه نقشه‌های توزیع مکانی در نرم‌افزار ArcGIS 10.4 و تجزیه و تحلیل‌های آمار توصیفی برای شناسایی توزیع داده‌ها،

مقادیر حداقل و حداکثر آن‌ها با استفاده از نرم‌افزار IBM SPSS Statistics 27 انجام پذیرفت. از پارامترهای اثر قطعه‌ای، حد آستانه، دامنه تأثیر، R^2 و RSS برای آزمایش قدرت برازش و شایستگی مدل‌سازی مکانی استفاده شد. معادله ۴ مربوط به روش درون‌یابی کریجینگ معمولی است.

$$Z(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i \times Z(x_i) \quad \text{رابطه ۴}$$

که در آن، $Z(x_0)$ مقدار پیش‌بینی شده، n تعداد نقاط همسایه جستجو شده در طول درون‌یابی، λ_i ضریب وزنی است که به نقاط اندازه‌گیری شده اختصاص داده شده است، و $Z(x_i)$ مقدار اندازه‌گیری شده است (Wang et al., 2020; Abuzaid et al., 2023).

بحث

تجزیه و تحلیل آزمایشگاهی

در جدول (۲) آمار توصیفی خصوصیات اندازه‌گیری شده خاک سطحی منطقه مورد مطالعه آورده شده است. pH خاک یکی از کلیدی‌ترین عوامل کنترل‌کننده پراکنش فلزات سنگین است (Sherene, 2010). با توجه به نتایج به دست آمده خاک‌های مورد مطالعه با دامنه تغییرات pH (۷/۸-۷۳/۶۰) و میانگین ۸/۳۰ در محدوده خاک‌های کمی قلیایی تا قلیایی قرار دارند. انحراف معیار داده‌ها کم است که نشان می‌دهد مقادیر pH در نمونه‌های مختلف از میانگین کمی پراکنده هستند.

مقدار EC در این خاک‌ها در دامنه (۰/۹۷-۷/۶۱) دسی‌زیمنس بر متر قرار دارد که نشان‌دهنده خاک‌های غیر شور تا شور در این منطقه است. با توجه به داده‌ها، انحراف معیار نسبتاً پایین است و نشان می‌دهد که داده‌ها در حول میانگین آن به صورت یکنواخت پخش شده‌اند.

مقدار کربن آلی نمونه‌ها در دامنه (۰/۱۰-۲/۰۹) و میانگین آن ۱/۳۲ است. میزان ماده آلی در نمونه‌های خاک مورد مطالعه در حد متوسط تا خوب قرار دارد. با توجه به مقدار انحراف معیار ۰/۸۶ مشخص است که داده‌ها از میانگین به صورت یکنواخت پخش شده‌اند. چولگی ۰/۱۰ برای کربن آلی می‌توان بیان کرد که توزیع داده‌ها در محدوده توزیع نرمال قرار دارد.

به‌طور کلی میزان ماده آلی تأثیرپذیری زیادی از مدیریت اراضی دارد. در این مطالعه بیش از ۵۴ درصد نمونه‌ها دارای کربن آلی بیشتر از ۱/۲ درصد بودند که اغلب این نقاط با کربن آلی بالا در اراضی کشت متنوع انواع محصولات سبزی، صیفی و گندم قرار داشتند. با توجه به مسئله افزودن فاضلاب‌های شهری در اراضی کشاورزی منطقه مورد مطالعه، این اراضی از نظر کربن آلی در وضعیت مناسبی قرار دارند. مواد آلی خاک یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های خاک است که به طور قابل توجهی می‌تواند جذب و یا حلالیت فلزات سنگین را بسته به اسیدیته خاک و نوع ماده آلی تغییر دهد (Mousavi et al., 2022).

جدول ۲. آمار توصیفی ویژگی‌های خاک اندازه‌گیری شده (عمق ۰ تا ۲۰ سانتی‌متر)

خصوصیات خاک	واحد	حداقل	حداکثر	میانگین	چولگی	کشییدگی	انحراف معیار
رس	%	۱۳/۶۰	۵۷/۸۷	۳۲/۵۳	۰/۲۸	۲/۳۵	۷/۵۵
شن	%	۰/۷۴	۳۸/۷۳	۱۷/۹۳	۰/۴۶	۰/۲۲	۸/۳۵
سیلت	%	۴۱/۳۹	۵۹/۶۶	۴۹/۵۳	۰/۳۲	-۰/۰۲	۴/۱۱
کربن آلی	%	۰/۱۰	۲/۰۹	۱/۳۲	۰/۱۰	۰/۹۰	۰/۸۶
آهک	%	۱۴/۸۷	۲۲/۳۴	۱۷/۸۶	۰/۲۸	-۰/۴۵	۱/۷۶
فسفر قابل جذب	mg/kg	۶/۵۰	۱۲۶/۲۱	۵۱/۰۶	۰/۴۲	-۰/۴۱	۳۰/۹۹
pH	-	۷/۷۳	۸/۶۰	۸/۳۰	-۰/۷۰	-۰/۱۳	۰/۲۲
EC	dS/m	۰/۹۷	۷/۶۱	۲/۷۲	۰/۳۵	۰/۸۱	۱/۷۲

در منطقه مورد مطالعه، مقدار آهک با پراکندگی نسبتاً بالا همراه است. آهک موجود در این خاک‌ها در دامنه (۲۲/۳۴-۱۴/۸۷) و با میانگین ۱۷/۸۶ درصد در دسته خاک‌های با آهک زیاد قرار گرفته‌اند. خاک‌های رسی آهکی و شنی آهکی به دلیل قلیایی نسبت به خاک اسیدی ظرفیت بیشتری برای غیر متحرک‌سازی و تثبیت فلزات سنگین در شکل‌های غیرقابل دسترس دارند. به‌طور کلی میزان فلز

قابل جذب در خاک رسی آهکی کمتر از خاک‌های شنی آهکی بوده و در خاک‌های شنی آهکی کمتر از خاک‌های اسیدی است (Emadi and Bahmanyar, 2017).

داده‌های فسفر قابل جذب خاک با انحراف معیار ۳۰/۹۹ نشان‌دهنده پراکندگی بالای این داده‌هاست و این بدان معناست که مقادیر فسفر در نمونه‌های مختلف، اختلافات زیادی دارند. بیشترین مقدار داده‌ها ۱۲۶/۲۱ و کمترین مقدار آن‌ها ۶/۵۰ است. میانگین داده‌ها با مقدار ۵۱/۰۶ واحد نشان‌دهنده مقدار بالای فسفر در منطقه است. در این مطالعه بیش از ۸۱ درصد نمونه‌های خاک، فسفر قابل جذب بالاتر از ۱۵ ppm داشته که از نظر فسفر قابل جذب در محدوده خاک‌های غنی از فسفر قرار گرفته‌اند. میزان فسفر بالا در خاک‌ها به علت تداخل با فلزات سنگین تماس گیاهان با فلزات سنگین را کاهش می‌دهد (قاسمی، ۱۳۹۱).

بافت خاک بر مهاجرت و انتقال فلزات سنگین تأثیر می‌گذارد (Wen et al., 2023). در این تحقیق جهت طبقه‌بندی نمونه‌های خاک از مثلث بافت خاک طبق استاندارد USDA استفاده شد. عمده نمونه خاک‌های مورد مطالعه در کلاس بافتی متوسط تا سنگین قرار گرفته‌اند. زمانی که مقدار ذرات رس بالاست، به عبارتی وقتی خاک بافت سنگین‌تری دارد فلزات سنگین راحت‌تر جذب ذرات خاک می‌شوند (Liu et al., 2012; Chen et al., 2019). با توجه به این مسئله خاک‌های این منطقه نیاز به مدیریت در آبیاری و کوددهی به طور مناسب جهت جلوگیری از مسئله انباشتگی عناصر سنگین هستند.

تجزیه و تحلیل آمار توصیفی عنصر سرب و شاخص‌های زیست‌محیطی خاک

در این مطالعه شاخص‌های آلودگی خاک به فلز سرب شامل فاکتور آلودگی، فاکتور غنی‌شدگی و شاخص زمین انباشتگی جهت ارزیابی آلودگی اراضی زراعی جنوب استان تهران محاسبه شد. در جدول ۳ آمار توصیفی سرب به همراه شاخص‌های زیست‌محیطی محاسبه شده آورده شد. در این پژوهش دامنه تغییرات برای غلظت سرب کل (۱۵۷/۴۰ - ۱۱۵/۶۱) و میانگین غلظت سرب کل در نمونه‌های خاک ۱۳۵/۹۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم است. با توجه به انحراف معیار نسبتاً بالا، می‌توان نتیجه گرفت که میزان عنصر سرب در نمونه‌های خاک مورد بررسی پراکندگی بالایی دارد که متاثر از تغییرپذیری خصوصیات خاک و فعالیت‌های انسانی مختلف و حضور منابع آلاینده متفاوت در منطقه مورد مطالعه است. در مجموع، این داده‌ها نشان می‌دهند که میزان آلودگی به عنصر سرب در نمونه‌ها بالاست و نیاز به اقدامات مناسب جهت کاهش آلودگی وجود دارد. شاخص زمین انباشتگی از مقدار حداقل ۲/۴۶ تا مقدار حداکثر ۲/۹۰ و با میانگین ۲/۶۹ بود. دامنه تغییرات فاکتور غنی‌شدگی ۶/۴۸ تا ۹/۳۱ و میانگین این شاخص ۷/۷۱ به دست آمد. بیشینه، کمینه و میانگین فاکتور آلودگی در این مطالعه به ترتیب ۱۱/۲۴، ۸/۲۵ و ۹/۷۱ بود.

جدول ۳. آمار توصیفی عنصر سرب و شاخص‌های زیست‌محیطی خاک

متغیر	حداقل	حداکثر	میانگین	چولگی	کشییدگی	انحراف معیار
pb	۱۱۵/۶۱	۱۵۷/۴۰	۱۳۵/۹۹	-۰/۱۰	-۰/۱۹	۱۰/۳۹
I _{geo}	۲/۴۶	۲/۹۰	۲/۶۹	-۰/۳۰	-۰/۱۵	۰/۱۱
EF	۶/۴۸	۹/۳۱	۷/۷۱	۰/۴۸	۰/۳۵	۰/۶۰
C _f	۸/۲۵	۱۱/۲۴	۹/۷۱	-۰/۱۰	-۰/۱۹	۰/۷۴

از بین شاخص‌های زیست‌محیطی موجود برای ارزیابی میزان آلودگی به فلزات سنگین در خاک، سه مورد از رایج‌ترین آن‌ها در این مطالعه استفاده شد. ارزیابی‌های آلودگی خاک‌های منطقه به سرب با محاسبه شاخص‌های زیست‌محیطی برای ۴۴ نقطه مورد مطالعه محاسبه و ارائه شد. بر اساس نتایج از نظر فاکتور آلودگی میانگین ۹/۷۱، کمینه ۸/۲۵ و بیشینه ۱۱/۲۴ است که ۱۰۰ درصد از نمونه‌ها در کلاس آلودگی خیلی زیاد به عنصر سرب قرار دارد. با توجه به طبقه‌بندی شاخص زمین انباشتگی که دارای میانگین ۲/۶۹، کمینه ۲/۴۶ و بیشینه ۲/۹۰ است، همه نمونه‌ها در کلاس آلودگی متوسط تا شدید قرار گرفتند.

از نظر کلاس‌بندی فاکتور غنی‌شدگی که دارای میانگین ۷/۷۱، کمینه ۶/۴۸ و بیشینه ۹/۳۱ است که در ۴۴ نمونه مورد بررسی همه نمونه‌ها در کلاس غنی‌شدگی زیاد قرار گرفتند. استفاده از این شاخص‌های زیست‌محیطی شدت آلوده‌شدن در منطقه را به خوبی نشان داد. به‌طور کلی از نظر فاکتور غنی‌شدگی هر چه مقدار این فاکتور بالاتر باشد نشان‌دهنده سهم بالای عوامل انسانی در افزایش آلودگی فلز موردنظر در منطقه مورد مطالعه است (حمزه نژاد و خداوردیلو، ۱۳۹۹).

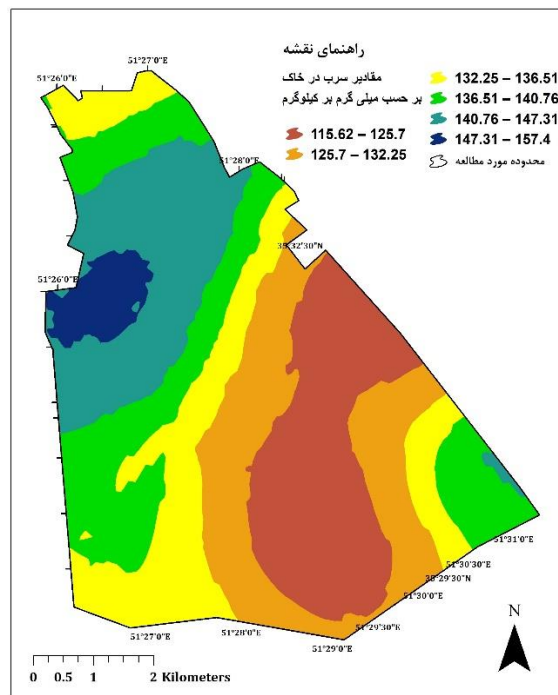
هر سه شاخص فاکتور غنی‌شدگی، شاخص زمین‌انباشتگی و فاکتور آلودگی برای منطقه مورد مطالعه نشان‌دهنده وضعیت آلودگی

شدید اکثر نمونه‌های خاک به عنصر سرب در منطقه است. بررسی سه شاخص آلودگی محاسبه شده و بازدید میدانی از منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد عوامل انسانی می‌تواند سهم بالایی در غنی‌شدگی غلظت این فلز در خاک‌های سطحی منطقه داشته باشد. (Wang et al ۲۰۲۰) نیز در مطالعه خود به اینکه سرب عمدتاً توسط منابع انسانی تحت‌تأثیر قرار دارد اشاره کردند. (Seshan et al (2010) نیز بیان کردند که استفاده از شاخص زمین‌انباشتگی و فاکتور غنی‌شدگی به‌خوبی می‌تواند میزان و شدت آلودگی خاک را به‌صورت کمی تعیین کند. ارزیابی آلودگی فلزات سنگین با استفاده از شاخص‌های آلودگی، در خاک‌های کشاورزی مراکش نیز نشان داد که بیشتر شاخص‌های آلودگی در منطقه از سطوح آلودگی متوسط تا سطوح بسیار آلوده متغیر بودند و به‌تدریج در مناطقی که فعالیت صنعتی بالایی وجود داشت سطوح این شاخص‌ها افزایش می‌یافت (Zaakour et al., 2023).

در پژوهش حاضر فاکتور آلودگی برای سرب با داشتن بالاترین مقدار میانگین (۹/۷۱) در نمونه‌های اندازه‌گیری شده نشان‌دهنده سهم زیاد فعالیت‌های انسانی در آلودگی‌های محیطی می‌باشد (Wieczorek, J and Baran., 2022). بررسی سطح آلودگی و ارزیابی ریسک فلزات سنگین با شاخص غنی‌شدگی خاک‌های سطحی جنوب غربی شیراز نشان داده شد به دلیل فعالیت‌های انسانی، عنصر سرب دارای غنی‌سازی شدید در منطقه مورد مطالعه بود (Amiri et al., 2022).

بررسی نقشه تغییرپذیری مکانی سرب خاک

آلودگی خاک‌های منطقه به سرب برای ۴۴ نقطه مورد مطالعه اندازه‌گیری و ارائه شد. در شکل ۲ نقشه پهنه‌بندی سرب خاک به روش کریجینگ در محدوده مورد مطالعه نشان داده شده است.



شکل ۲. نقشه پراکنش غلظت کل عنصر سرب در منطقه مورد مطالعه با استفاده از مدل کریجینگ

استاندارد پیشنهادی سازمان حفاظت محیط‌زیست ایران برای حد استاندارد عنصر سرب ۷۵ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک است (فصیحی و حمیدی، ۱۳۹۹؛ باقری و همکاران، ۱۴۰۰). با توجه به نتایج به‌دست‌آمده در مورد سرب کل در منطقه با میانگین ۱۳۵/۹۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم و بالاتر بودن همه نمونه‌ها از حد استاندارد سرب برای ایران، منطقه مورد مطالعه از نظر این عنصر در شرایط آلودگی قرار دارد. تمام نمونه‌های اندازه‌گیری شده از میزان استاندارد سازمان بهداشت جهانی، آژانس حفاظت محیط‌زیست ایالات‌متحده آمریکا، استاندارد کانادا، میانگین در خاک‌های جهان و میانگین پوسته زمین، بیشتر آلوده به عنصر سرب بوده و نیازمند اقدامات مناسب جهت کاهش آلودگی به این عنصر است. حدود غلظت کل عنصر سرب برای خاک‌های ایران و جهان و کشور کانادا در جدول ۴ ارائه شده است. نظر بر پیوستگی تغییرات مکانی مواد مادری خاک‌ها و تمرکز فعالیت‌های انسانی مخرب محیط‌زیست در نقاط خاص و محدود، بدون

شک نسبت اثرگذاری عوامل طبیعی و انسانی بر غلظت فلزات سنگین در بعد مکان، تغییرات قابل ملاحظه‌ای دارد. داشتن اطلاعات صحیح از الگوی تغییرات مکانی غلظت این فلزات در خاک‌ها پیش‌شرط طراحی برنامه‌های کنترلی است (Yang et al., 2009). اگر در طبیعت ورودی‌های ناشی از فعالیت‌های انسانی وجود نداشته باشد، معمولاً غلظت فلزات سنگین دارای توزیع نرمال خواهند بود (Zhao et al., 2010). در نتیجه باتوجه به غیرنرمال بودن توزیع فراوانی غلظت کل سرب مورد بررسی می‌توان بیان کرد غلظت بالای این فلز سنگین در منطقه مورد مطالعه عمدتاً متأثر از فعالیت‌های انسانی است. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد سرب با غلظت بالایی در منطقه مورد مطالعه وجود دارد که این مسئله می‌تواند تحت‌تأثیر عوامل طبیعی و انسانی باشد.

جدول ۴. غلظت کل عنصر سرب خاک (mg/kg) از دیدگاه استانداردهای مختلف، میانگین جهانی و میانگین پوسته زمین (Holmgren et al., 1993; Boerngen and Hansford., 1981; Mohammadi et al., 2018)

استاندارد کانادا	حد مجاز استاندارد ایران	میانگین در خاک‌های جهان	میانگین پوسته زمین	USEPA ^۱	WHO ^۲
۷۰	۷۵	۳۵	۱۴	۱۰	۳۰

باتوجه به نقشه بیشترین مقدار سرب در قسمت‌های شمالی و شمال غربی منطقه مورد مطالعه وجود دارد. علت میزان بالای این عنصر در این قسمت منطقه ورود این عنصر به خاک از طریق عوامل انسانی موجود در منطقه است. قرارگیری تصفیه‌خانه فاضلاب جنوب تهران در قسمت شمالی منطقه مورد مطالعه، پالایشگاه روغن‌موتور ایرانول در قسمت شمال غربی منطقه و در قسمت‌های جنوبی‌تر، قرارگیری این منطقه در مجاورت شاهراه حمل‌ونقلی تهران به جنوب کشور و حجم سنگین خودروهای عبوری در مسیرهای اصلی و فرعی پر تردد این شهرستان را می‌توان علت بالا بودن مقدار سرب در این قسمت‌ها دانست. علاوه بر این، نقشه غلظت سرب نشان داد در مناطقی که غلظت بالای سرب مشاهده می‌شود به دلیل تجمع آن از فاضلاب‌ها، پالایشگاه، زمین‌های کشاورزی، باغ‌ها، مسیرهای اصلی و فرعی پر تردد و زمین‌های مسکونی بود. چندین مطالعه در این زمینه نتایج مشابهی با مطالعه حاضر ارائه کردند (Marrugo-Negrete et al. 2017; Mohammadi et al., 2018).

(Mousavi et al., 2022) نیز شیوه‌های کشاورزی، به‌عنوان مثال، سم‌پاشی آفت‌کش‌ها و کودهای آلی، مسیرهای پر تردد و همچنین آبیاری خاک با فاضلاب راه‌هایی برای انتشار سرب به خاک و آب گزارش کردند. از دیرباز استفاده از فاضلاب نهر فیروزآباد به‌عنوان یکی از منابع مهم تأمین آب جهت آبیاری محصولات کشاورزی در قسمت جنوب تهران شده است و آلودگی ناشی از این مسئله یکی از دغدغه‌های مهم پژوهشگران مختلف است. پژوهش حاضر نیز نشان می‌دهد مدیریت‌های نادرست و بی‌رویه در مصرف فاضلاب در این منطقه نشان‌دهنده انباشتگی بالای سرب در قسمت‌هایی از منطقه شده است.

قاسمی (۱۳۹۱) در مطالعه خود به‌منظور تهیه نقشه پراکنش آلودگی فلز سرب در اراضی کشاورزی جنوب تهران با استفاده از زمین‌آمار نیز علت بالا بودن عنصر سرب در نواحی حاشیه اتوبان را ورود سرب ناشی از سوخت بنزین در این نواحی بیان کردند. نتایج فسیحی و حمیدی (۱۳۹۹) نیز خاک‌های منطقه شهرستان ری را از نظر غلظت سرب از حدود مجاز بالاتر و در ردیف نمونه‌های نادر کشور از لحاظ درجات بالای آلودگی گزارش کردند. نتایج این مطالعه در مورد محرز بودن آلودگی خاک به عنصر سرب در منطقه شهرری هم سو با مطالعه حاضر می‌باشد. (Dayani and Mohammadi 2010) در مطالعه خود به‌منظور ارزیابی سرب خاک‌های اصفهان با استفاده از کریجینگ به این نتیجه رسیدند که منطقه از نظر آلودگی به عنصر سرب در وضعیت خطرناکی قرار داشت.

ولی‌نژاد و همکاران (۱۳۹۵) نیز با تأیید آلودگی قسمت جنوبی اسلام‌شهر به عنصر سرب، یکی از دلایل این آلودگی را وجود مسیرهای اصلی و فرعی پر تردد در این منطقه بیان کردند. در مطالعه‌ای که توسط رحمانی و همکاران (۱۳۷۹) انجام شد با نمونه‌گیری از خاک‌ها در فواصل مختلف از حاشیه بزرگراه‌های ایران به این نتیجه رسیدند که با افزایش فاصله از بزرگراه‌ها و ترافیک‌های بیشتر، غلظت عنصر سرب روند نزولی شدیدی نشان می‌دهد. با بررسی میزان سرب در حاشیه بزرگراه نیایش نیز بیان شد مقدار میانگین غلظت سرب در خاک حاشیه بزرگراه، با مقادیر زمینه این عنصر دارای اختلاف معناداری است. که علت اصلی ورود این آلاینده‌ها به خاک را تأثیر منابع آلاینده محیطی و عوامل انسانی به‌خصوص حمل و نقل در این منطقه بیان شد (عربی و بیدکانی، ۱۳۹۵).

بررسی نتایج برازش مدل‌های نیم‌تغییرنا

نتایج برازش مدل‌های نیم‌تغییرنا تغییرات مکانی غلظت سرب کل در منطقه مورد مطالعه با استفاده از مدل کروی، نمایی و گوسین در جدول ۵ نشان داده شده است. به‌طور کلی مدل‌های برازش داده شده علاوه بر فراهم کردن مؤلفه‌های ورودی روش درون‌یابی کریجینگ، اطلاعات مربوط به ساختار مکانی متغیرها را نیز فراهم می‌کنند (Burgos et al., 2006). در این پژوهش مدل‌های برازش داده شده بر نیم‌تغییر نامی تجربی، دارای ضریب تبیین (R^2) (۰/۹۳، ۰/۸۷، ۰/۹۳) برای عنصر سرب بودند. این مدل‌ها با R^2 بالا را می‌توان مدل‌های درون‌یابی قابل اعتماد برای محتوای سرب در منطقه مورد مطالعه در نظر گرفت. ویژگی‌های هر مدل در جدول ۵ نشان داده شد.

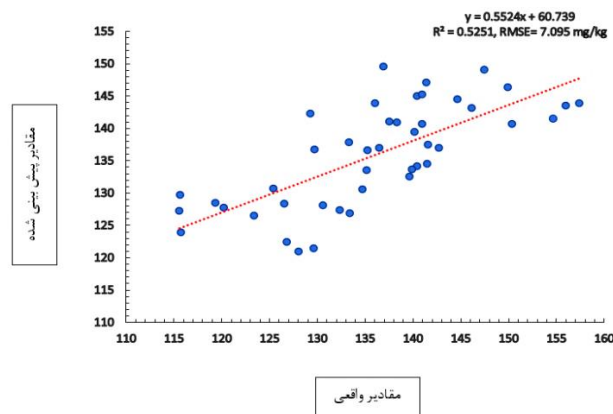
Mazidah et al (۲۰۲۲) جهت ارزیابی فلزات سنگین در مالزی با استفاده از تجزیه و تحلیل‌های زمین‌آماری بهترین مدل نیم‌تغییرنا برازش داده شده برای فلز سرب را مدل Exponential با $R^2 = 0.64$ معرفی کردند. Mirzaei et al (۲۰۲۲) نیز با بررسی فلزات سنگین در جنوب شهر تهران با استفاده از روش کریجینگ معمولی برای فلز سرب، ضریب تبیین مدل‌های نیم‌تغییرنا برازش داده شده را Spherical ($R^2 = 0.5$)، Exponential ($R^2 = 0.59$) و Gaussian ($R^2 = 0.52$) گزارش کردند.

جدول ۵. نتایج برازش مدل‌های نیم‌تغییرنا همسانگرد عنصر سرب در خاک

متغیر	نوع مدل	اثر قطعه‌ای	حد آستانه	دامنه تأثیر (متر)	نسبت اثر قطعه‌ای بر حد آستانه (درصد)	R^2
Pb	Spherical	۱۴/۴۰	۱۳۵/۲۰	۴۳۸۰	۱۰/۶۵	۰/۹۳
Pb	Exponential	۰/۱۰	۱۴۴/۷۰	۵۶۴۰	۰/۰۶	۰/۸۷
Pb	Gaussian	۳۳/۵۰	۱۳۶/۶۰	۲۸۶۲	۲۴/۵۲	۰/۹۳

اعتبارسنجی

جهت اعتبارسنجی عملکرد روش درون‌یابی کریجینگ معمولی از تکنیک اعتبارسنجی حذف یک نقطه‌ای (Leave-One-Out Cross-Validation (LOOCV)) که مزیت عدم نیاز به جدا کردن یک بخش مجزا برای اعتبارسنجی و همچنین استفاده کامل از داده‌ها را دارد، انجام شد. در ادامه برای پیش‌بینی مقادیر فلز سرب از دو معیار در اعتبارسنجی شامل ریشه دوم میانگین مربعات خطا (RMSE) و ضریب تبیین (R^2) استفاده شد. نتایج اعتبارسنجی روش درون‌یابی کریجینگ در پهنه‌بندی داده‌های عنصر سرب خاک با استفاده از روش حذف یک نقطه‌ای $R^2 = 0.52$ و $RMSE = 7.09$ را نشان داد.



شکل ۳. اعتبارسنجی مدل‌سازی مکانی و پهنه‌بندی داده‌های عنصر سرب خاک با استفاده از روش Leave-one-out ($R^2 = 0.52$, $RMSE = 7.09$ mg/kg)

نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر باهدف ارزیابی آلودگی خاک به فلز سرب با استفاده از سه شاخص زیست‌محیطی فاکتور غنی‌شدگی، شاخص زمین‌انباشتگی و فاکتور آلودگی در بخشی از اراضی شهری استان تهران انجام گرفت. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده مقدار میانگین غلظت کل سرب در خاک‌های منطقه مورد مطالعه، بیشتر از دستورالعمل سازمان حفاظت محیط‌زیست ایران و میانگین متوسط پوسته زمین مشاهده شد که

نشان‌دهنده وضعیت آلودگی نسبتاً بالای این منطقه نسبت به این فلز است. آلودگی خاک، ایمنی غذا و سلامت انسان به‌طور جدایی‌ناپذیری با یکدیگر مرتبط هستند. بررسی هر سه شاخص فاکتور غنی‌شدگی، شاخص زمین‌انباشتگی و فاکتور آلودگی برای منطقه مورد مطالعه نشان‌دهنده وضعیت آلودگی بالای اکثر نمونه‌های خاک به عنصر سرب در منطقه است. بررسی شاخص‌های آلودگی محاسبه شده و همچنین بازدید میدانی از منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد عوامل انسانی می‌تواند سهم بالایی در غنی‌شدگی غلظت کل سرب در خاک‌های سطحی منطقه مورد مطالعه داشته باشد. با توجه به نقشه توزیع مکانی، بیشترین مقدار سرب در بخش‌های شمالی و شمال غربی منطقه مورد بررسی مشاهده می‌شود. علت بالا بودن غلظت این عنصر در این بخش‌ها، ورود آن به خاک از طریق فعالیت‌های انسانی موجود در منطقه است. علاوه بر این، نقشه غلظت سرب نشان داد در مناطقی که غلظت بالای این عنصر مشاهده می‌شود، تجمع آن از فاضلاب‌ها، پالایشگاه، زمین‌های کشاورزی و باغ‌ها، مسیرهای اصلی و فرعی پر تردد و مناطق مسکونی است. قرارگیری تصفیه‌خانه فاضلاب جنوب تهران در بخش شمالی منطقه، پالایشگاه روغن موتور ایرانول در قسمت شمال غربی و واقع شدن این منطقه در مجاورت بزرگراه ارتباطی تهران به جنوب کشور و حجم بالای تردد خودروها در مسیرهای اصلی و فرعی پر تردد این شهرستان را می‌توان از دلایل بالا بودن غلظت سرب در این بخش‌ها دانست. نتایج پژوهش حاضر نشان داد استفاده از شاخص‌های زیست‌محیطی آلودگی خاک می‌تواند به منظور ارزیابی کمی و سنجش آلودگی خاک‌ها مفید باشند. استفاده از فاضلاب به‌عنوان یکی از منابع مهم تأمین آب جهت آبیاری محصولات کشاورزی و آلودگی ناشی از این مسئله در این منطقه نشان‌دهنده انباشتگی بالای سرب در قسمت‌هایی از منطقه شده است. با توجه به آلودگی شدید و بیش از حد مجاز در منطقه، انجام اقداماتی چون جلوگیری از آلودگی بیشتر و اعمال مدیریت صحیح جهت بهبود شرایط فعلی، سازمان‌دهی فاضلاب‌ها که وارد اراضی این منطقه شده و در موارد زیادی مستقیماً در اراضی کشاورزی این منطقه استفاده می‌شوند و همچنین، انتخاب صحیح و اصولی کاشت گیاهانی که پتانسیل تجمع فلزات سنگین بالایی دارند، جهت کاهش یا تعدیل آلودگی خاک‌ها در حوزه پالایش سبز، ضروری و مهم محسوب می‌شوند.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

منابع

- باقری، یوسف رضا؛ مسکینی ویشکایی، فاطمه و میرخانی، رسول (۱۴۰۰). بررسی وضعیت آلودگی خاک به سرب، نیکل و کادمیوم و پهنه‌بندی آن با استفاده از زمین‌آمار در اراضی زراعی جنوب تهران. فصلنامه علوم و تکنولوژی محیط‌زیست، ۲۳(۱۱)، ۶۹-۸۴.
- باقری، یوسف رضا؛ مسکینی ویشکایی، فاطمه؛ محمد اسماعیل، زهرا؛ سعادت، سعید و رضایی، حامد (۱۳۹۶). ارزیابی و پهنه‌بندی خطر زیست‌محیطی فلزات سنگین خاک با استفاده از شاخص‌های آلودگی در اراضی زراعی جنوب تهران. نشریه محیط‌زیست طبیعی، ۷۰(۴)، ۷۵۷-۸۶۸.
- حمزه نژاد، رقیه و خداوردیلو، حبیب (۱۳۹۹). ارزیابی کمی آلودگی فلزات سنگین در خاک. تحقیقات کاربردی خاک، ۸(۲)، ۳۷-۵۲.
- رحمانی، حمیدرضا؛ کلباسی، محمود و حاج رسولی‌ها، شاپور (۱۳۷۹). آلودگی خاک بوسیله سرب حاصل از وسایل نقلیه در محدوده برخی از بزرگراه‌های ایران، علوم آب و خاک (علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی)، ۴(۴)، ۳۱-۴۱.
- سرمدیان، فریدون و تیموری بردیانی، سجاد (۱۴۰۱). بررسی کیفیت خاک در بخشی از اراضی کوهین استان قزوین. پژوهش‌های خاک، ۳۶(۴)، ۴۲۷-۴۳۸.
- سیاحتی اردکانی، غلامرضا؛ میر سنجر، میر مهرداد؛ عظیم‌زاده، حمیدرضا و سلگی، عیسی (۱۳۹۷). ارزیابی محیط زیستی برخی از فلزات سنگین در خاک سطحی حاشیه صنایع گندله‌سازی و فولادسازی اردکان. فصلنامه سلامت و محیط‌زیست، ۱۱(۳)، ۴۴۹-۴۶۴.
- صحرائی، نسیم؛ لندی، احمد؛ حجتی، سعید و پاسولی، ادواردو (۱۴۰۲). منشأیابی و ارزیابی آلودگی خاک‌های مرکزی استان خوزستان به برخی فلزات با پتانسیل آلاینده‌گی. آب‌و خاک، ۳۷(۳)، ۴۵۷-۴۷۱.
- عربی، کاملیا و بیدکانی، سمیرا (۱۳۹۵). بررسی میزان سرب ناشی از ترافیک در حاشیه بزرگراه نیایش. ششمین همایش سراسری کشاورزی و منابع طبیعی پایدار، <https://civilica.com/doc/573802>.
- فصیحی، حبیب‌اله و حمیدی، محسن (۱۳۹۹). بررسی گستره آلودگی خاک‌ها و منابع آلاینده متأثر از تهران در دهستان‌های قلعه‌نو و کهریزک شهرستان ری. فصلنامه علوم و تکنولوژی محیط‌زیست، ۲۲(۲)، ۶۹-۷۸.
- قاسمی، شکوفه (۱۳۹۱). تهیه نقشه پراکنش آلودگی فلزات سرب، کادمیم و نیکل در اراضی کشاورزی جنوب تهران با استفاده از زمین‌آمار و GIS. پایان‌نامه کارشناسی ارشد خاک‌شناسی. به راهنمایی دکتر حسین ترابی گل سفیدی. تهران: دانشگاه شاهد، دانشکده علوم کشاورزی.



ولی نژاد، فاطمه؛ حسنی، امیر حسام و صیادی، مجتبی (۱۳۹۵). بررسی میزان فلزات سنگین (کادمیوم، کروم، نیکل، سرب، روی) در منابع آب زیرزمینی شهرستان اسلامشهر و تهیه نقشه پراکنش آن در محیط GIS. فصلنامه علوم و تکنولوژی محیط زیست، ۱۸ (ویژه نامه شماره ۲)، ۱۸۷-۱۹۹.

REFERENCES

- Abuzaid, A. S., Jahin, H. S., Shokr, M. S., El Baroudy, A. A., Mohamed, E. S., Rebouh, N. Y., and Bassouny, M. A. (2023). A Novel Regional-Scale Assessment of Soil Metal Pollution in Arid Agroecosystems. *Agronomy*, 13(1), 161.
- Adnan, M., Xiao, B., Xiao, P., Zhao, P., Li, R., and Bibi, S. (2022). Research progress on heavy metals pollution in the soil of smelting sites in China. *Toxics*, 10(5), 231.
- Alam, R., Ahmed, Z. and Howladar, M.F., (2020). Evaluation of heavy metal contamination in water, soil and plant around the open landfill site Mogla Bazar in Sylhet, Bangladesh. *Groundwater for Sustainable Development*, 10, p.100311.
- Ali, H., Khan, E., and Ilahi, I. (2019). Environmental chemistry and ecotoxicology of hazardous heavy metals: environmental persistence, toxicity, and bioaccumulation. *Journal of chemistry*, 2019.
- Amiri, H., Daneshvar, E., Azadi, S., and Azadi, S. (2022). Contamination level and risk assessment of heavy metals in the topsoil around cement factory: A case study. *Environmental Engineering Research*, 27(5).
- Arabi, K and Bidkani, S. (2016). Investigating the Amount of Lead from Traffic on the Margins of Niayesh Highway, The 6th National Conference on Sustainable Agriculture and Natural Resources, Tehran. (In Persian).
- Bagheri, Y.R., Meskini-Vishkaee, F., & Mirkhani, R. (2022). Soil pollution assessment to lead, nickel and cadmium and mapping it by geostatistics in the Tehran south farms. *Journal of Environmental Science and Technology*, 23(11), 69-84. (In Persian).
- Bagheri, Y.R., Meskini-Vishkaee, F., Mohammad Esmaeil, Z., Saadat, S., & Rezaei, H. (2017). Evaluating and mapping the environmental risk of soil heavy metals using by contamination indexes in the Tehran south farms. *Journal of Natural Environment*, 70(4), 757-868. (In Persian).
- Bali, A.S. and Sidhu, G.P.S., (2021). Heavy metal contamination indices and ecological risk assessment index to assess metal pollution status in different soils. *In Heavy Metals in the Environment*, (pp. 87-98).
- Boerngen, J. G. S., & Hansford, T. (1981). Chemical analyses of soils and other surficial materials of the conterminous United States.
- Burgos, P., Madejón, E., Perez-de-Mora, A., & Cabrera, F. (2006). Spatial variability of the chemical characteristics of a trace-element-contaminated soil before and after remediation. *Geoderma*, 130(1-2), 157-175.
- Cai, L. M., Wang, Q. S., Wen, H. H., Luo, J., and Wang, S. (2019). Heavy metals in agricultural soils from a typical township in Guangdong Province, China: Occurrences and spatial distribution. *Ecotoxicology and environmental safety*, 168, 184-191.
- Carter, M. R., & Gregorich, E. G. (Eds.). (2007). Soil sampling and methods of analysis. CRC press.
- Chen, F., Chen, X., Zhu, F., & Sun, Q. (2019, October). Study on the factors affecting the spatial distribution of heavy metal elements. In IOP Conference Series: *Earth and Environmental Science* (Vol. 330, No. 4, p. 042013). IOP Publishing.
- Chen, G., Yang, Y., Liu, X., and Wang, M. (2021). Spatial distribution characteristics of heavy metals in surface soil of Xilinguole coal mining area based on semivariogram. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 10(5), 290.
- Dayani, M., and Mohammadi, J. (2010). Geostatistical assessment of Pb, Zn and Cd contamination in near-surface soils of the urban-mining transitional region of Isfahan, Iran. *Pedosphere*, 20(5), 568-577.
- El Behairy, R. A., El Baroudy, A. A., Ibrahim, M. M., Mohamed, E. S., Rebouh, N. Y., and Shokr, M. S. (2022). Combination of GIS and Multivariate Analysis to Assess the Soil Heavy Metal Contamination in Some Arid Zones. *Agronomy*, 12(11), 2871.
- Emadi, S. M., & Bahmanyar, M. A. (2017). The effect of zero valent iron nanoparticles on reduction of heavy metal contamination in calcareous, acidic and sandy soils. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 48(4), 799-809.
- Fasihi, H., & Hamidi, M. (2020). Investigating the Spread of Soils Pollution and Pollution Sources Originating from Tehran in Rural Districts of Qal'ehno and Kahrizak (Rey Township, Tehran, Iran). *Journal of Environmental Science and Technology*, 22(2), 69-78. (In Persian).
- Ferreira, C. S., Seifollahi-Aghmiuni, S., Destouni, G., Ghajarnia, N., and Kalantari, Z. (2022). Soil degradation in the European Mediterranean region: Processes, status and consequences. *Science of the Total*

Environment, 805, 150106.

- Ghasemi, Sh. (2012). Preparing a Distribution Map of Lead, Cadmium, and Nickel Contamination in Agricultural Lands South of Tehran Using Geostatistics and GIS. Master's Thesis in Soil Science. Tehran: Shahid University, Faculty of Agricultural Sciences. (In Persian).
- Guan, Y., Shao, C., and Ju, M. (2014). Heavy metal contamination assessment and partition for industrial and mining gathering areas. *International journal of environmental research and public health*, 11(7), 7286-7303.
- Hammam, A. A., Mohamed, W. S., Sayed, S. E. E., Kucher, D. E., and Mohamed, E. S. (2022). Assessment of soil contamination using gis and multi-variate analysis: A case study in El-Minia Governorate, Egypt. *Agronomy*, 12(5), 1197.
- Hamzenejhad, R., & Khodaverdiloo, H. (2020). Quantitative Assessment of Soil Heavy Metals Pollution. *Applied Soil Research*, 8(2), 37-52. (In Persian).
- Holmgren, G. G. S., Meyer, M. W., Chaney, R. L., & Daniels, R. B. (1993). Cadmium, lead, zinc, copper, and nickel in agricultural soils of the United States of America (Vol. 22, No. 2, pp. 335-348). *American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, and Soil Science Society of America*.
- Huang, H., Zhou, Y., Liu, Y., Li, K., Xiao, L., Li, M., Tian, Y. and Wu, F., (2020). Assessment of Anthropogenic Sources of Potentially Toxic Elements in Soil from Arable Land Using Multivariate Statistical Analysis and Random Forest Analysis. *Sustainability*, 12(20), p.8538.
- Jiang, B., Adebayo, A., Jia, J., Xing, Y., Deng, S., Guo, L., et al. (2019). Impacts of heavy metals and soil properties at a Nigerian e-waste site on soil microbial community. *Journal of Hazardous Materials*, 362, 187-195.
- Kabata-Pendias, A. (2011). Trace elements in soil and plants 4 th. CRC Press, Taylor and Francis Group. USA, 12, 564-577.
- Khan, S., Naushad, M., Lima, E. C., Zhang, S., Shaheen, S. M., and Rinklebe, J. (2021). Global soil pollution by toxic elements: Current status and future perspectives on the risk assessment and remediation strategies—A review. *Journal of Hazardous Materials*, 417, 126039.
- Kumar, V., Sharma, A., Minakshi, Bhardwaj, R., and Thukral, A. K. (2018). Temporal distribution, source apportionment, and pollution assessment of metals in the sediments of Beas river, India. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 24(8), 2162-2181.
- Linnik, V. G., Bauer, T. V., Minkina, T. M., Mandzhiyeva, S. S., and Mazarji, M. (2022). Spatial distribution of heavy metals in soils of the flood plain of the Seversky Donets River (Russia) based on geostatistical methods. *Environmental Geochemistry and Health*, 44(2), 319-333.
- Liu, E., Birch, G. F., Shen, J., Yuan, H., Zhang, E., & Cao, Y. (2012). Comprehensive evaluation of heavy metal contamination in surface and core sediments of Taihu Lake, the third largest freshwater lake in China. *Environmental Earth Sciences*, 67, 39-51.
- Lu, X., Gu, A., Huang, C., Wei, Y., Xu, M., Yin, H., and Hu, X. F. (2021). Assessments of heavy metal pollution of a farmland in an urban area based on the Environmental Geochemical Baselines. *Journal of Soils and Sediments*, 21(7), 2659-2671.
- Marrugo-Negrete, J., Pinedo-Hernández, J., & Díez, S. (2017). Assessment of heavy metal pollution, spatial distribution and origin in agricultural soils along the Sinú River Basin, Colombia. *Environmental research*, 154, 380-388.
- Mazidah, Z., Amalyn, A., Shuhada, N. T., Fuad, M. M., Fikriah, F., and Izzuddin, M. A. (2022, July). Assessment of heavy metals and nutrients availability in oil palm plantation effected by bauxite mining using geostatistical and multivariate analyses. In IOP Conference Series: *Earth and Environmental Science* (Vol. 1064, No. 1, p. 012002).
- Mirzaei, F., Abbasi, Y., Sohrabi, T., & Mirhashemi, S. H. (2022). Investigation of heavy metalloid pollutants in the south of Tehran using kriging method and HYDRUS model. *Geoscience Letters*, 9(1), 27.
- Mohammadi, A., Hajizadeh, Y., Taghipour, H., Mosleh Arani, A., Mokhtari, M., & Fallahzadeh, H. (2018). Assessment of metals in agricultural soil of surrounding areas of Urmia Lake, northwest Iran: A preliminary ecological risk assessment and source identification. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 24(8), 2070-2087.
- Mousavi, S. M., Brodie, G., Payghamzadeh, K., Raiesi, T., & Srivastava, A. K. (2022). Lead Bioavailability in the Environment: Its Exposure and and Effects. *Journal of Advances in Environmental Health Research*, 10(1), 1-14.
- Mousavi, S. M., Raiesi, T., Sedaghat, A., & Srivastava, A. K. (2024). Potentially Toxic Metals: Their Effects on the Soil-Human Health Continuum. *Journal of Advances in Environmental Health Research*, 12(2),



86-101.

- Muller, G. M. M. G. M. G. M. G. P. (1969). Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River. *Geojournal*, 2, 108-118.
- Nomas, A. H., and Al-Shamma, A. (2023). Calculation of Pollution Indicators for Heavy Metals in the Surface Soil of Nasiriyah Oil Field. *Journal of Survey in Fisheries Sciences*, 10(3S), 1077-1086.
- Nowrouzi, M. and Pourkhabbaz, A., (2014). Application of geoaccumulation index and enrichment factor for assessing metal contamination in the sediments of Hara Biosphere Reserve, Iran. *Chemical Speciation and Bioavailability*, 26(2), pp.99-105.
- Paz-Ferreiro, J. and Fu, S., (2016). Biological indices for soil quality evaluation: perspectives and limitations. *Land Degradation and Development*, 27(1), pp.14-25.
- Peng, Y., Kheir, R. B., Adhikari, K., Malinowski, R., Greve, M. B., Knadel, M., and Greve, M. H. (2016). Digital mapping of toxic metals in Qatari soils using remote sensing and ancillary data. *Remote Sensing*, 8(12), 1003.
- Qingjie, G., Jun, D., Yunchuan, X., Qingfei, W., and Liqiang, Y. (2008). Calculating pollution indices by heavy metals in ecological geochemistry assessment and a case study in parks of Beijing. *Journal of China university of geosciences*, 19(3), 230-241.
- Rahmani, H. R, Kolbasi, M, and Hajrasulha, Sh. (2000). Soil Contamination by Lead from Vehicles in the Vicinity of Some Highways in Iran. *Water and Soil Science (Agricultural Sciences and Natural Resources)*, 4(4), 31-41. (In Persian).
- Rezaei, A., Hassani, H., Fard Mousavi, S.B., Hassani, S. and Jabbari, N., (2019). Assessment of heavy metals contamination in surface soils in Meiduk Copper Mine Area, Se Iran. *Earth Sciences Malaysia (ESMY)*, 3(2), pp.01-08.
- Rinklebe, J., Antoniadis, V., Shaheen, S.M., Rosche, O. and Altermann, M., (2019). Health risk assessment of potentially toxic elements in soils along the Central Elbe River, Germany. *Environment international*, 126, pp.76-88.
- Sahraei, N., Landi, A., Hojati, S., & Pasolli, E. (2023). Assessment of Pollution in the Central Soils of Khuzestan Province with Potentially Toxic Elements (PTEs) and their Origins. *Water and Soil*, 37(3), 457-471. (In Persian).
- Santos-Frances, F., Martínez-Graña, A., Avila Zarza, C., Garcia Sanchez, A., and Alonso Rojo, P. (2017). Spatial distribution of heavy metals and the environmental quality of soil in the Northern Plateau of Spain by geostatistical methods. *International journal of environmental research and public health*, 14(6), 568.
- Sarmadian, F., & Teimouri Bardyani, S. (2023). Investigating Soil Quality in Part of Kuhin Lands in Qazvin Province, Iran. *Iranian Journal of Soil Research*, 36(4), 427-438. (In Persian).
- Sayadi, M. H., and Sayyed, M. R. G. (2011). Comparative assessment of baseline concentration of the heavy metals in the soils of Tehran (Iran) with the comprisable reference data. *Environmental Earth Sciences*, 63, 1179-1188.
- Seshan, B. R. R., Natesan, U., and Deepthi, K. (2010). Geochemical and statistical approach for evaluation of heavy metal pollution in core sediments in southeast coast of India. *International journal of environmental science and technology*, 7, 291-306.
- Sherene, T. (2010). Mobility and transport of heavy metals in polluted soil environment. *In Biological forum— an international journal* (Vol. 2, No. 2, pp. 112-121).
- Shokr, M. S., Abdellatif, M. A., El Behairy, R. A., Abdelhameed, H. H., El Baroudy, A. A., Mohamed, E. S.,... and Abuzaid, A. S. (2022). Assessment of Potential Heavy Metal Contamination Hazards Based on GIS and Multivariate Analysis in Some Mediterranean Zones. *Agronomy*, 12(12), 3220.
- Siyahati Ardakani, GH.R., Mirsanjari, M., Azimzadeh, H.R., & Solgi, E. (2018). The environmental assessment of some heavy metals in surface soil around pelletizing industries and Ardakan Steel. *Iranian Journal of Health and Environment*, 11(3), 449-464. (In Persian).
- Sparks, D. L., Fendorf, S. E., Toner IV, C. V., & Carski, T. H. (1996). Kinetic methods and measurements. *Methods of Soil Analysis: Part 3 Chemical Methods*, 5, 1275-1307.
- Sutherland, R. A. (2000). Bed sediment-associated trace metals in an urban stream, Oahu, Hawaii. *Environmental geology*, 39, 611-627.
- Tajudin, N. S., Zulkifli, M., Miskon, M. F., Anuar, M. I., Hashim, Z., Faudzi, F., and Jamaluddin, N. M. A. (2022). Integrated Approach of Heavy Metal Evaluation Using Geostatistical and Pollution Assessment Index in Soil of Bauxite Mining Area. *Pertanika Journal of Science and Technology*, 30(2).
- Valinejhad, F., Hassani, A.H., & Sayadi, M. (2016). Investigation of Heavy Metals (Cd, Cr, Ni, Pb, Zn) in Islamshahr Groundwater Resources and their Regional Distribution Pattern in GIS. *Journal of*

- Environmental Science and Technology*, 18(2), 187-199. (In Persian).
- Wang, J., Zhang, X., Yang, Q., Zhang, K., Zheng, Y., and Zhou, G. (2018). Pollution characteristics of atmospheric dustfall and heavy metals in a typical inland heavy industry city in China. *Journal of Environmental Sciences*, 71, 283-291.
- Wang, Y., Duan, X., and Wang, L. (2020). Spatial distribution and source analysis of heavy metals in soils influenced by industrial enterprise distribution: Case study in Jiangsu Province. *Science of the Total Environment*, 710, 134953.
- Wen, Q., Yang, L., Yu, J., Wei, B., & Yin, S. (2023). Sources and Risk Characteristics of Heavy Metals in Plateau Soils Predicted by Geo-Detectors. *Remote Sensing*, 15(6), 1588.
- Wieczorek, J., and Baran, A. (2022). Pollution indices and biotests as useful tools for the evaluation of the degree of soil contamination by trace elements. *Journal of Soils and Sediments*, 1-18.
- Xiao, X., Zhang, J., Wang, H., Han, X., Ma, J., Ma, Y., and Luan, H. (2020). Distribution and health risk assessment of potentially toxic elements in soils around coal industrial areas: A global meta-analysis. *Science of the Total Environment*, 713, 135292.
- Yang, H., Wang, F., Yu, J., Huang, K., Zhang, H., and Fu, Z. (2021). An improved weighted index for the assessment of heavy metal pollution in soils in Zhejiang, China. *Environmental Research*, 192, 110246.
- Yang, P., Mao, R., Shao, H., & Gao, Y. (2009). The spatial variability of heavy metal distribution in the suburban farmland of Taihang Piedmont Plain, China. *Comptes rendus. Biologies*, 332(6), 558-566.
- Zaakour, F., Kholaiq, M., Khouchlaa, A., El Mjiri, I., Rahimi, A., and Saber, N. (2023). Assessment of Heavy Metal Contamination Using Pollution Index, Geo-Accumulation Index, and Potential Ecological Risk Index in Agricultural Soil—A Case Study in the Coastal Area of Doukkala (Morocco). *Ecological Engineering & Environmental Technology*, 2, 38-44.
- Zhao, Y., Wang, Z., Sun, W., Huang, B., Shi, X., & Ji, J. (2010). Spatial interrelations and multi-scale sources of soil heavy metal variability in a typical urban-rural transition area in Yangtze River Delta region of China. *Geoderma*, 156(3-4), 216-227.