JEHE Alborz University of Medical Sciences Journal of Environmental Health Engineering , 2026; 14(1):13-30 Original Article

Ecological risk assessment and enrichment of heavy metals cadmium, lead, zinc and copper in surface soils of agricultural fields in Darkhovin city

Received: 18 February 2026, Accepted: 26 May 2026

Reza Salehi[1], Azita Koushafar[1*]

[1] *Department of Environment, Ahv.C., Islamic Azad University, Ahvaz, Iran*

***Corresponding Author:**
az.koushafar@iau.ac.ir

How to Cite This Article:
Salehi R, Khoushafar A. Ecological risk assessment and enrichment of heavy metals cadmium, lead, zinc and copper in surface soils of agricultural fields in Darkhovin city. Journal of Environmental Health Engineering. 2026;14(1):13-30.

DOI:
10.66224/jehe.14.1.13

ABSTRACT

Background: Heavy metals are persistent pollutants that are highly mobile in soil and enter and accumulate in agricultural products. This study aimed to assess the ecological risk and enrichment of Cd, Pb, Zn and Cu in agricultural fields of Darkhovin city in 2025.

Materials and Methods: Soil samples were collected from the farms of the villages of Umm al-Hajjar, Segara, Umm al-Ghazlan and Salihawiyyah. Four farms were selected in each village and three soil samples were taken from each farm. A Perkin Elmer model 900T atomic absorption spectrometer, manufactured in the United States, was used to measure heavy metals.

Results: The concentrations of Cd (2.26 mg kg^{-1}), Pb (30.51 mg kg^{-1}), Zn (157.30 mg kg^{-1}) and Cu (123.03 mg kg^{-1}) in the soils of agricultural fields at Umm al-Ghazlan station were higher than at other stations ($P<0.05$). The individual pollution indices of CF (11.31), EF (108.77), Igeo (2.91) and Er (339.38) of Cd were higher than those of the other metals at Umm al-Ghazlan station. The pattern of CF, EF and Igeo of metals was as follows: Cd > Zn > Cu > Pb, of course, it should be noted that regarding Igeo at Umm al-Ghazlan station, Cu was observed to be higher than Zn. Also, the pattern of Er of metals was as follows: Cd > Cu > Pb > Zn. The lowest values of CF, EF and Igeo related to Pb were obtained at Segareh station, respectively, 1.45, 13.91 and -0.05.

Conclusion: According to the results of soil pollution indices such as enrichment factor, Geoaccumulation index and pollution load index, the entry of heavy metals such as Pb, Cd, Zn and Cu is affected by human activities and the soil of the study area has high heavy metal pollution. It is suggested that other toxic metals and trace elements be investigated in the soil and trees of urban and residential areas of Darkhovin city and the Darkhovin oil field.

Keywords: Pollution load index, heavy metals, soil pollution, land accumulation index, ecological risk assessment

Copyright © 2026 The Authors.
Published by Alborz University of Medical Sciences
This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International License. (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/).Non-commercial uses of the work are permitted,provided the original work is properly cited.

JEHE Alborz University of Medical Sciences
مجله مهندسی بهداشت محیط، دوره ۱۴، شماره ۱، بهار ۱۴۰۵، صفحات ۱۳ تا ۳۰
مقاله پژوهشی

ارزیابی خطر بوم شناسی و غنی شدگی فلزات سنگین کادمیوم، سرب، روی و مس در خاک های سطحی مزارع کشاورزی شهر دارخوین

تاریخ دریافت : ۱۴۰۴/۱۱/۲۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۰۵

رضا صالحی[۱]، آزیتا کوشافر[۱*]

[۱] گروه محیط زیست، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

***پست الکترونیکی نویسنده مسئول:**
az.koushafar@iau.ac.ir

نحوه استناد به این مقاله:
Salehi R, Khoushafar A. Ecological risk assessment and enrichment of heavy metals cadmium, lead, zinc and copper in surface soils of agricultural fields in Darkhovin city. Journal of Environmental Health Engineering. 2026;14(1):13-30.

DOI:
10.66224/jehe.14.1.13

چکیده

زمینه و هدف: فلزات سنگین آلاینده‌های پایداری هستند که در خاک تحرک بالایی دارند و وارد محصولات کشاورزی شده و انباشته می‌شوند. این تحقیق با هدف ارزیابی خطر بوم‌شناسی و غنی‌شدگی فلزات سنگین کادمیوم، سرب، روی و مس خاک مزارع کشاورزی شهر دارخوین در سال ۱۴۰۴ انجام شد.

مواد و روش ها: نمونه‌های خاک از مزارع روستاهای ام‌الحجار، سگاره، ام‌الغزلان و صلیحاویه تهیه شدند. در هر روستا ۴ مزرعه انتخاب و از هر مزرعه ۳ نمونه خاک نمونه‌برداری شد. برای سنجش فلزات سنگین از دستگاه جذب اتمی Perkin Elmer مدل 900T ساخت کشور آمریکا استفاده گردید.

یافته ها: غلظت کادمیوم (۲/۲۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم)، سرب (۳۰/۵۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم)، روی (۱۵۷/۳۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم) و مس (۱۲۳/۰۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم) در خاک‌های مزارع کشاورزی در ایستگاه ام‌الغزلان نسبت به سایر ایستگاه‌ها بالاتر بود ($P<0/05$). شاخص‌های آلودگی منفرد فاکتور آلودگی (۱۱/۳۱)، فاکتور غنی شدگی (۱۰۸/۷۷)، شاخص زمین انباشت (۲/۹۱) و ریسک اکولوژیک (۳۳۹/۳۸) کادمیوم بالاتر از سایر فلزات در ایستگاه ام‌الغزلان به دست آمد. الگوی مقادیر فاکتور آلودگی، فاکتور غنی شدگی و شاخص زمین انباشت فلزات به صورت کادمیوم > روی > مس > سرب بود، البته باید توجه داشت که درمورد مقادیر شاخص زمین انباشت در ایستگاه ام‌الغزلان مس بالاتر از روی مشاهده شد. همچنین الگوی شاخص ریسک اکولوژیک فلزات به صورت کادمیوم > مس > سرب > روی به‌دست آمد. پایین‌ترین مقادیر فاکتور آلودگی، فاکتور غنی شدگی و شاخص زمین انباشت مربوط به فلز سرب به ترتیب ۱/۴۵، ۱۳/۹۱ و ۰/۰۵- در ایستگاه سگاره بود.

نتیجه گیری: با توجه به نتایج شاخص‌های آلودگی خاک نظیر فاکتور غنی‌شدگی، شاخص زمین انباشت و شاخص بار آلودگی، ورود فلزات سنگین سرب، کادمیوم، روی و مس تحت تاثیر فعالیت های انسانی بوده و خاک منطقه مورد مطالعه دارای آلودگی بالای فلزات سنگین می‌باشد. پیشنهاد می‌شود سایر فلزات سمی و عناصر کمیاب در خاک و درختان مناطق شهری و مسکونی شهر دارخوین و میدان نفتی دارخوین بررسی شوند.

واژه های کلیدی: شاخص بار آلودگی، فلزات سنگین، آلودگی خاک، شاخص زمین انباشت، ارزیابی خطر بوم‌شناسی

مقدمه

خاک پایه و اساس تولید محصولات کشاورزی می‌باشد که شامل طیف وسیعی از عناصر کمیاب ضروری، عناصر معدنی و فلزات سمی است. فلزات سنگین روی و مس برای عملکردهای زیستی و شیمیایی در بدن انسان، حیوانات و گیاهان در غلظت‌های مناسب ضروری هستند، اما در مقادیر بالا و بیش از حد آستانه استاندارد می‌توانند مضر باشند[1]. در حالی که فلزات کادمیوم، جیوه، آرسنیک و سرب در غلظت‌های پایین نیز برای موجودات زنده غیرضروری و سمی هستند[2، 3]. فلزات سنگین موجود در خاک کشاورزی پتانسیل ورود به زنجیره غذایی و تأثیر بر سلامت انسان را دارند[4]. قرار گرفتن در معرض فلزات سنگین به‌دلیل پیشرفت فناوری، رشد جمعیت در مناطق شهری و تشدید فعالیت‌های صنعتی، افزایش یافته است. آلودگی فلزات سنگین در محیط‌زیست بسیار خطرناک و نگران کننده بوده که جوامع مختلف در سراسر جهان تحت تأثیر آن قرار دارند[5].

سرب یک فلز سنگین و سمی است که در پوسته زمین و محیط‌زیست به طور گسترده وجود دارد[6]. این فلز خطر قابل توجهی برای انسان، حیات‌وحش و زیستگاه‌های طبیعی ایجاد می‌کند، زیرا سرب در محیط‌زیست تجزیه نمی‌شود و در نتیجه در خاک تجمع می‌یابد[7]. آلودگی خاک به سرب و گردش آن در زنجیره غذایی زیستی شامل خاک ـ گیاه ـ جانوران ـ انسان، می‌تواند باعث بیماری‌های مزمن در انسان شود[8]. وجود گسترده سرب در محیط زیست در درجه اول به منابع انسانی نسبت داده می‌شود، در حالی که منابع دیگر شامل انتشارات آتشفشانی، هوازدگی ژئوشیمیایی و فرآیندهای طبیعی سنگ‌ها و خاک‌ها نیز می‌توانند سبب افزایش سرب در منابع آب و خاک شوند[9].

کادمیوم یک فلز سنگین با نگرانی‌های زیست‌محیطی و سم‌شناسی قابل توجه است. این فلز به طور گسترده در پوسته زمین با غلظت متوسط حدود ۰/۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم توزیع شده است. بالاترین سطح کادمیوم در محیط‌زیست در سنگ‌های رسوبی انباشته شده است، اما فسفات‌های دریایی حاوی حدود ۱۵ میلی‌گرم کادمیوم بر کیلوگرم هستند[10]. غلظت کادمیوم در خاک با هوازدگی مواد مادری همبستگی مثبت دارد، در حالی که سطح کادمیوم در خاک با افزایش فاصله با واحدهای صنعتی و تولیدی و مناطق شهری به طور متناسب کاهش می‌یابد. در خاک، منبع غالب آلودگی کادمیوم از طریق هوازدگی سنگ‌ها و کانی‌های مختلف موجود در خاک است. کادمیوم فلزی است که اغلب در فعالیت‌های صنعتی مختلف نظیر تولید آلیاژها، رنگدانه‌ها و باتری‌ها استفاده می‌شود[11].

غلظت‌های طبیعی زمینه مس در خاک‌ها بین ۲ تا ۵۰ میلی گرم بر کیلوگرم گزارش شده است. سطح مس در خاک‌ها به ساختار فیزیکی، شرایط و تاریخچه طبیعی و صنعتی منطقه بستگی دارد. غلظت‌های محلی ممکن است در مناطق کشاورزی و صنعتی بالاتر از سطوح زمینه باشد[12]. آلودگی فلز مس در خاک و آب باعث ایجاد مشکلات مداوم برای آلودگی محصولات کشاورزی و خطرات سلامتی انسان می‌شود[13]. آلودگی فلز روی می‌تواند از منابع مختلفی مانند کشاورزی، صنعت و دفع پسماند ناشی شود. منبع اصلی آلودگی روی در خاک ناشی از استفاده از کودهای حاوی روی در تولید محصولات کشاورزی است. استفاده بیش از حد از کودهای حاوی روی باعث آلودگی محیط‌زیست شده و بر اکوسیستم تأثیر منفی می‌گذارد[14]. در حالی که فلز روی یک ریزمغذی ضروری برای محصولات کشاورزی است، غلظت بیش از حد روی در خاک می‌تواند منجر به اثرات مضر بر محصولات کشاورزی و اکوسیستم اطراف آن شود[15]. فلزات سرب و کادمیوم هیچ نقشی در بدن انسان ندارند و به عنوان عناصر غیرضروری شناخته می‌شوند و در سطوح پایین سمی هستند[16]. کادمیوم می‌تواند باعث آسیب حاد کلیه، آسیب استخوان و سرطان در انسان شود. سرب در سطوح پایین بر سیستم ایمنی، کلیه، تولیدمثل و رشد تأثیر می‌گذارد[17]. فلز سرب در محیط به صورت آلودگی در خاک و گرد و غبار باقی می‌ماند و یک مسیر بسیار مهم برای قرار

گرفتن کودکان در معرض سرب است، زیرا کودکان به طور منظم در خاک بازی می‌کنند و از طریق فعالیت دست به دهان در معرض آن قرار می‌گیرند. علاوه بر منابع سرب در فضای داخلی، خاک آلوده به کفش یا پا منتقل می‌شود و توسط جریان هوا به داخل خانه‌ها دمیده می‌شود و در گرد و غبار خانگی جمع می‌شود که منبع اصلی مواجهه کودکان و بزرگسالان با این ماده است[۶، ۱۸]. مس، یک ریزمغذی ضروری است که در متابولیسم دیواره سلولی، سنتز پروتئین، هورمون و پروتئین‌های حامل الکترون مانند پلاستوسیانین شرکت می‌کند، اما در مقادیر بیش از حد برای انسان سمی است و باعث مشکلات سلامتی مانند اختلالات دستگاه گوارش، مشکلات عصبی مرکزی، آسیب کبد و کلیه، آسیب کبدی و کلیوی، آسیب اکسیداتیو سلولی و مرگ سلولی می‌شود[۱۹، ۲۰]. اگرچه روی یک عنصر ضروری است، اما قرار گرفتن بیش از حد در معرض آن و مصرف آن برای بدن انسان سمی است و باعث سردرد، درد شکم، حالت تهوع و موارد دیگر می‌شود[۲۱].

پژوهشگران آلودگی فلزات سنگین خاک را در کشورهای مختلف نظیر ازبکستان، چین، هند و مصر را به دلیل توسعه سریع صنعتی شدن، افزایش جمعیت و دفع نامناسب پسماندهای شهری و پساب خانگی، فعالیت های کشاورزی، تردد وسایل نقلیه سبک و سنگین گزارش کردند. همچنین فلزات سنگین با ورود به محیط‌زیست با کاهش کیفیت خاک و عملکردهای اکوسیستم، تعادل اکولوژیکی را مختل می‌کند. فلزاتی مانند کادمیوم و روی جایگزین کاتیون‌های کلیدی در مکان‌های تبادل خاک می‌شوند و فعالیت‌های میکروبی تنظیم‌کننده pH را مختل کرده و اسیدیته خاک را افزایش می‌دهند[۱۹،۲۰،۲۱،۲۲،۲۳].

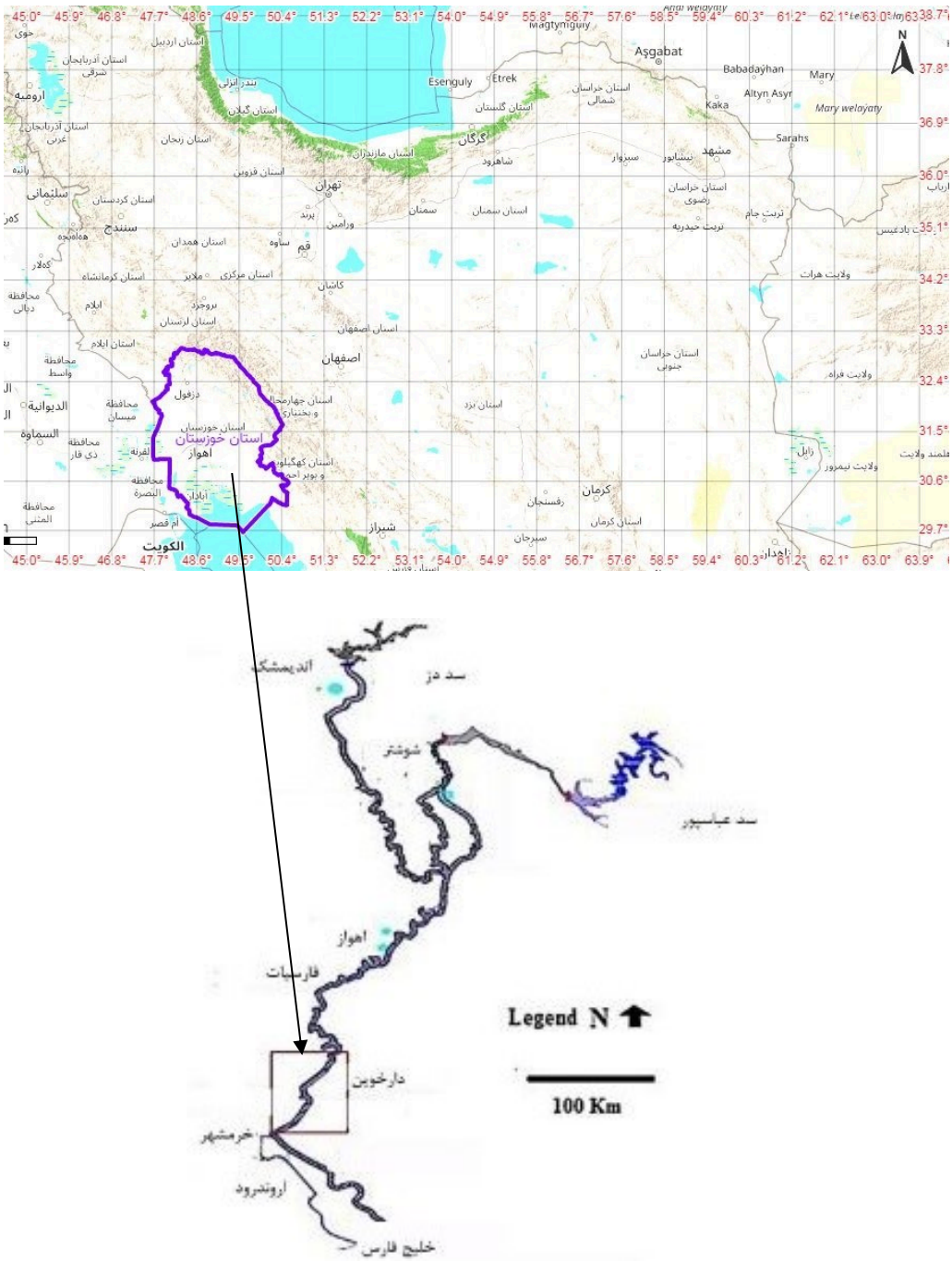
شهر دارخوین در جنوب کلانشهر اهواز دارای مزارع کشاورزی فروانی است که محصولات زراعی متعددی نظیر گندم، جو و سبزیجات در این منطقه کشت و تولید می‌شود. همچنین کشاورزی در منطقه دارخوین به‌دلیل وجود رودخانه کارون در حاشیه اراضی کشاورزی و مناسب بودن شرایط اقلیمی در سطح وسیعی انجام می‌شود که استفاده از انواع کودهای شیمیایی، سموم آفت‌کش‌ها و علف‌کش‌ها در میان کشاورزان شهر دارخوین متداول و رایج است. همچنین آلودگی‌های موجود در صنایع مهم و متعدد اطراف اراضی کشاورزی مورد مطالعه و رودخانه کارون از جمله شرکت‌های نفت و گاز، نیروگاه اتمی و پساب نیشکر نیز می‌توانند در ورود فلزات سنگین به محیط منطقه دارخوین تاثیرگذار باشند، بنابراین این تحقیق برای اولین بار با هدف ارزیابی ارزیابی خطر بوم‌شناسی و غنی‌شدگی فلزات سنگین کادمیوم، سرب، روی و مس در خاک منطقه دارخوین انجام شده است.

روش کار

محل مورد مطالعه

دارخوین یکی از شهرهای استان خوزستان ایران است که در نزدیکی رودخانه کارون و در فاصله ۴۵ کیلومتری خرمشهر و ۸۵ کیلومتری جنوب اهواز قرار دارد[۲۴] (شکل ۱). شهر دارخوین از ادغام چهار روستای بزرگ اسود زرگانی، آلبوبالد، دارخوین و یوخان (علی ابن الحسین) در سال ۱۳۸۷ تشکیل شده است. زندگی روستاییان دارخوین و روستاهای اطراف آن به‌طور عمده بر پایه کشاورزی و دامداری است. کشاورزان در این منطقه به کشت محصولات مختلفی از جمله گندم، جو و سبزیجات می‌پردازند، همچنین دامداری نیز یکی از فعالیت های اقتصادی مهم در این منطقه است. روستاییان از منابع آبی فراوان و خاک حاصلخیز برای افزایش بهره‌وری محصولات خود استفاده می‌کنند. در این تحقیق چهار منطقه (ایستگاه) از روستاهای توابع شهر دارخوین برای نمونه‌برداری خاک از مزارع کشاورزی درنظر گرفته شدند. مناطق چهارگانه شامل روستای ام‌الحجار (۳۰ درجه و ۵۰ دقیقه و ۸ ثانیه شمالی، ۴۸ درجه و ۲۸ دقیقه و ۴۰ ثانیه شرقی)، روستای سگاره (۳۰ درجه و ۵۱ دقیقه و ۴ ثانیه شمالی، ۴۸ درجه و ۲۶ دقیقه و ۱۹ ثانیه شرقی)، روستای ام‌الغزلان (۳۰ درجه و ۵۰ دقیقه و ۵۵ ثانیه شمالی،

۴۸ درجه و ۲۸ دقیقه و ۲۳ ثانیه شرقی) و روستای صلیحاویه (۳۰ درجه و ۴۸ دقیقه و ۱۱ ثانیه شمالی، ۴۸ درجه و ۲۶ دقیقه و ۲۲ ثانیه شرقی) هستند.



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی شهر دارخورین در استان خوزستان، جنوب غرب ایران[۲۴]

روش نمونه‌برداری

در این تحقیق، ۴ ایستگاه ام‌الحجار، سگاره، ام‌الغزلان و صلیحاویه مشخص گردید. در هر ایستگاه، ۴ مزرعه انتخاب شدند که در این مزارع حداقل ۵ سال سابقه کشت و کشاورزی مداوم محصولات در آن‌ها انجام شده بود. از هر مزرعه ۳ نمونه خاک نمونه‌برداری و در مجموع ۴۸ نمونه خاک جمع آوری گردید. نمونه‌های خاک از عمق ۰ تا ۱۵ سانتی‌متر با استفاده از بیلچه فولادی ضد زنگ برای جلوگیری از آلودگی در کیسه‌های کاغذی جمع‌آوری و به آزمایشگاه منتقل شدند[۲۵].

سنجش فلزات سنگین

نمونه‌های خاک از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شدند. سپس در دمای ۶۰ درجه سانتیگراد به مدت ۴۸ ساعت در دستگاه ماکروویو Mileston مدل MicroSYNTH ساخت شرکت ایتالیا خشک شدند. برای جدا کردن ذرات کوچکتر از ۶۳ میکرون نمونه‌های خاک مجددا الک و با استفاده از هاون چینی پودر شدند. یک گرم خاک پودر شده برای هضم به وسیله ترازوی دیجیتال TE214S ساخت شرکت Sartorius آلمان توزین شد. هضم خاک طبق دستورالعمل EPA3050B انجام گردید. روش EPA3050B با استفاده از افزودن متوالی اسید نیتریک، پراکسید هیدروژن و اسید هیدروکلریک برای آزادسازی فلزات به شکل محلول برای تجزیه و تحلیل با تکنیک‌هایی مانند طیف‌سنجی جذب اتمی است. نمونه بدون جوشاندن تا دمای تقریبی ۹۵ درجه سانتیگراد حرارت داده شد تا اسیدها رفلاکس شوند که باعث تجزیه ماتریس آلی و در دسترس قرار گرفتن عناصر کمیاب برای تشخیص می‌شود. هضم نهایی رقیق و فیلتر می‌شود و آن را برای تجزیه و تحلیل ابزاری برای تعیین کمیت فلزات و سایر کاتیون‌ها در نمونه آماده می‌کند. نمونه‌های خاک پودر شده با اسید هیدروکلریک ۱ نرمال و اسید نیتریک مخلوط شدند، به مدت ۲۴ ساعت زیر هود قرار گرفتند و در دمای ۸۰ تا ۹۰ درجه سانتیگراد حرارت داده شدند تا تیره شوند. اسید پرکلریک اضافه شد و حرارت دادن تا زمانی که حجم آن‌ها به ۲ تا ۳ سی‌سی کاهش یابد، ادامه یافت. نمونه‌های فیلتر شده برای سنجش فلزات سنگین آماده شدند[۲۶]. در این تحقیق جهت سنجش فلزات سنگین از دستگاه جذب اتمی Perkin Elmer مدل 900T ساخت کشور آمریکا استفاده شد. روش سنجش فلزات کادمیوم و سرب به روش کوره گرافیکی و فلزات مس و روی به روش شعله بود. مقدار حساسیت برای عناصر مختلف در روش جذب اتمی در حدود ۰/۰۰۰۱ تا ۲۰ppm است.

شاخص‌های آلودگی خاک

شاخص فاکتور آلودگی[1] می‌تواند فلزات سنگین موجود در خاک مورد مطالعه نسبت به غلظت طبیعی آن‌ها در خاک را تعیین کند. فاکتور آلودگی بر اساس رابطه ۱ محاسبه شد که در این رابطه C_n غلظت هر عنصر در خاک و C_o متوسط غلظت هر عنصر در زمینه (غلظت زمینه فلزات سرب، کادمیوم، مس، روی به ترتیب ۱۴، ۰/۲، ۱۰۰، ۷۵، میلی گرم بر کیلوگرم بود) می‌باشد (رابطه ۱). بر اساس طبقه‌بندی ارائه شده توسط هاکانسون، $CF<1$ آلودگی کم، $1\leq CF<3$ آلودگی متوسط، $3\leq CF<6$ آلودگی زیاد و $CF\geq 6$ آلودگی شدید را نشان می‌دهند[۲۷]:

رابطه ۱:

$$C_f = C_o \div C_n$$

درجه آلودگی[2] فلزات سنگین برای اولین بار توسط هاکانسون (۱۹۸۰) استفاده شد که یکی از شاخص‌های تجمعی می‌باشد. درجه آلودگی از مجموع فاکتورهای آلودگی برای عناصر مورد بررسی بر اساس رابطه ۲ به‌دست آمد و نشان دهنده درجه‌ای از آلودگی (Cdeg) است. بر اساس طبقه‌بندی

1.Contamination Factor
2.Degree of contamination

آلودگی کم، Cdeg< سطوح درجه آلودگی، ۸ ≤Cdeg ۱۶ آلودگی متوسط، ۳۲>Cdeg>۱۶ آلودگی شدید را نشان Cdegآلودگی زیاد و ۳۲≤ می‌دهند[۲۷]:

رابطه ۲:

$$Cdeg = \Sigma\ CF$$

شاخص درجه آلودگی ارائه شده توسط هاکانسون دارای محدودیت‌هایی بود[۲۷]، به‌همین دلیل شخصی به نام آبراهیم درجه آلودگی اصلاح شده[۱] را ارائه کرد که با این شاخص امکان ارزیابی آلودگی کل فلزات سنگین خاک فراهم شده است که بر اساس آن CF فاکتور آلودگی و n تعداد فلزات سنگین مورد مطالعه می‌باشد که بر اساس رابطه ۳ محاسبه شد. بر اساس طبقه‌بندی سطوح درجه آلودگی اصلاح شده، ۱/۵>mCd عدم آلودگی تا آلودگی بسیار کم، ۲>mCd≤۱/۵ آلودگی کم، ۴>mCd≤۲ آلودگی متوسط، ۸>mCd≤۴ آلودگی زیاد، ۱۶>mCd≤۸ آلودگی بسیار زیاد، ۳۲>mCd≤۱۶ آلودگی فوق‌العاده زیاد و Cdeg≥۳۲ آلودگی بی‌نهایت زیاد را نشان می‌دهند[۲۸]:

رابطه ۳:

$$mCd = \Sigma\ CF \div n$$

شاخص بار آلودگی[۲] آلودگی مجموع فلزات سنگین خاک را ارائه می‌دهد که از طریق رابطه ۴ محاسبه شد که در این رابطه CF فاکتور آلودگی بوده که از رابطه ۱ برای هر فلز به دست آمد و n تعداد فلزات مورد مطالعه می‌باشد. مقادیر شاخص بار آلودگی از ۰ (غیرآلوده) تا ۱۰ (بسیار آلوده) تغییر می‌کند. مقادیر کوچکتر از ۱ نشان دهنده عدم آلودگی و مقادیر بزرگتر از ۱ نشان دهنده آلودگی نسبت به فلزات سنگین است[۲۷]:

رابطه ۴:

$$PLI = \sqrt[4]{CF_{n1}CF_{n2}CF_{n3}CF_{ni}}$$

فاکتور غنی شدگی[۳] شاخص تفکیک آلودگی فلزات سنگین با منشا طبیعی و زمین‌شناسی و فعالیت‌های انسان‌زاد می‌باشد که برای هر فلز از نسبت بین عنصر نرمالیزه کننده به مقدار زمینه عناصر، طبق رابطه ۵ محاسبه شد. عنصر مرجع در تعیین فاکتور غنی‌شدگی عنصری است که منشا کاملاً زمین‌شناسی داشته باشد که از عنصر آهن به‌عنوان فلز مرجع استفاده شد. بر اساس طبقه‌بندی ارائه شده، ۲>EF آلودگی کم، ۵>EF≤۲ آلودگی متوسط، ۲۰>EF≤۵ آلودگی زیاد، ۴۰>EF≤۲۰ آلودگی بسیار زیاد و EF≥۴۰ آلودگی به شدت زیاد را نشان می‌دهند[۲۷]:

رابطه ۵:

$$EF = (Metal / Fe)_{Sample} \div (Metal/Fe)_{Background}$$

ارزیابی خطر بوم‌شناسی[۴] و شاخص پتانسیل خطر زیستی[۵] نمونه‌های خاک از رابطه‌های ۶ و ۷ محاسبه شدند. این دو شاخص برای ارزیابی کیفیت خاک بر اساس شدت سمیت فلزات سنگین کاربرد دارند. در واقع خطر زیستی و بوم‌شناسی آلودگی فلزات سنگین در خاک برای موجودات زنده را تعیین می‌کنند. در این رابطه CF فاکتور آلودگی، Er ریسک اکولوژیکی هر فلز، RI خطر بوم‌شناسی مجموع عناصر را نشان می‌دهد. هاکانسون (۱۹۸۰) مقدار TR را که شاخص سمی بودن فلزات سنگین می باشد.

1.Modified degree of contamination
2.Pollution Load Index
3.Enrichment factor
4.Ecological Risk
5.Risk Index

را برای کادمیوم، سرب، روی و مس به ترتیب ۳۰، ۵، ۱ و ۵ ارائه کرد[۲۷]. خطر بوم‌شناسی برای هر عنصر در پنج سطح خطر کم Er<۴۰، خطر متوسط ۴۰≤Er<۸۰، خطر قابل توجه ۸۰≤Er<۱۶۰، خطر زیاد ۱۶۰≤Er<۳۲۰ و خطر خیلی زیاد Er≥۳۲۰ رده‌بندی شده است. برای تحلیل پتانسیل مجموع خطر بوم‌شناسی چهار رده خطر بوم‌شناسی کم RI<۱۵۰، خطر بوم‌شناسی متوسط ۱۵۰≤RI<۳۰۰، خطر بوم‌شناسی قابل توجه ۳۰۰≤RI<۶۰۰ و خطر بوم‌شناسی خیلی زیاد RI≥۶۰۰ طبقه‌بندی شده است[۲۷]:

رابطه ۶:

$$Er = TR \times CF$$

رابطه ۷:

$$RI = \sum Er$$

شاخص زمین انباشت[1] یکی از روش‌های رایج تخمین آلودگی فلزات سنگین خاک می‌باشد که می‌تواند درجه آلایندگی خاک را تعیین نماید. این شاخص که اولین بار توسط مولر ارائه شد، در تحلیل‌های زیست‌محیطی به‌منظور مشخص کردن سطوح آلوده کاربرد دارد و از رابطه ۸ محاسبه شد. در این رابطه Igeo شاخص زمین انباشتگی، Cn غلظت فلز سنگین موجود در خاک، Bn غلظت زمینه (متوسط شیل) می باشد. در این رابطه برای این که اثرات مواد مادری خاک و نوسانات طبیعی محتوای ماده داده شده در محیط‌زیست و تغیرات بسیار کم ایجاد شده در اثر فعالیت‌های انسانی تصحیح شود از ضریب ۱/۵ استفاده شد. اساس طبقه‌بندی مولر هفت کلاس آلودگی، Igeo<۰ غیرآلوده، ۱-۰ غیر آلوده تا کمی آلوده، ۲-۱ کمی آلوده، ۳-۲ کمی آلوده تا خیلی آلوده، ۴-۳ خیلی آلوده، ۵-۴ خیلی آلوده تا شدیداً آلوده و ۵ < شدیدا آلوده طبقه بندی شده است[۲۹]:

رابطه ۸:

$$Igeo = Log_2 (Cn/1.5*Bn)$$

شاخص نمرو[2] پتانسیل آلودگی فلزات سنگین و کمیت ریسک آلودگی را نشان می‌دهد. شاخص نمرو ریسک آلودگی برای همه فلزاتی که مورد مطالعه قرار می‌گیرد را مشخص می‌کند. این شاخص در پنج سطح بدون آلودگی (NIPI<۰/۷)، خطر هشدار آلودگی (۰/۷≤NIPI<۱)، سطح آلودگی کم (۱≤ NIPI<۲)، سطح آلودگی متوسط (۳> NIPI≥۲)، سطح بالای آلودگی (NIPI>۳) طبقه-بندی شده است و از رابطه ۹ محاسبه شد[۲۷]:

رابطه ۹:

$$NIPI = \sqrt{\frac{PI_i^2 max + PI_i^2 ave}{2}}$$

تجزیه و تحلیل آماری

برای تجزیه و تحلیل داده‌های فلزات سنگین از نرم‌افزار آماری اس‌پی‌اس‌اس[3] نسخه ۲۴ استفاده شد. میانگین داده‌ها به منظور مقایسه اختلاف معنی‌دار با حدود اطمینان ۹۵٪ (P=۰/۰۵) با استفاده از آنالیز واریانس یکطرفه[4] انجام شد. برای رسم جداول و محاسبات شاخص‌های آلودگی از نرم-افزار اکسل[5] نسخه ۲۰۰۷ استفاده گردید. برای مقایسه فلزات سنگین خاک با استانداردهای ملی ایران و استانداردهای بین المللی از آزمون T استفاده شد.

1.Geo-accumlation Index
2.Nemerow Pollution Index
3.SPSS Ver. 24
4.ANOVA one way
5.Excel 2007

یافته‌ها

میانگین غلظت کادمیوم در خاک مزارع کشاورزی بین ایستگاه‌های مورد مطالعه اختلاف معنی‌داری نداشت (P>۰/۰۵)، اما مقادیر فلزات روی و مس خاک در ۴ ایستگاه اختلاف معنی‌داری را نشان داد (P<۰/۰۵). درمورد فلز سرب فقط بین ایستگاه‌های ام‌الحجار و صلیحاویه اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد (P>۰/۰۵). غلظت فلزات کادمیوم (۲/۲۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم)، سرب (۳۰/۵۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم)، روی (۱۵۷/۳۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم) و مس (۱۲۳/۰۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم) در خاک‌های مزارع کشاورزی در ایستگاه ام‌الغزلان نسبت به سایر ایستگاه‌ها بالاتر بود (P<۰/۰۵). غلظت کادمیوم (۱/۸۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم)، روی (۱۳۲/۱۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم) و مس (۱۰۱/۹۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم) در ایستگاه ام‌الحجار پایین‌ترین مقادیر را نسبت به ایستگاه‌های سگاره، ام‌الغزلان و صلیحاویه داشتند (P<۰/۰۵). غلظت سرب در ایستگاه سگاره (۲۴/۶۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم) نسبت به سایر ایستگاه‌ها پایین‌تر به‌دست آمد (جدول ۱).

جدول ۱. میانگین غلظت فلزات سنگین (میلی‌گرم بر کیلوگرم) خاک مزارع کشاورزی شهر دارخوین

ایستگاه‌ها	کادمیوم	سرب	روی	مس
ام‌الحجار	۱/۸۱±۰/۰۸^{a}	۲۸/۵۴±۰/۹۹^{a}	۱۳۲/۱۱±۲۴/۲۲^{a}	۱۰۱/۹۱±۱/۷۷^{a}
سگاره	۱/۹۶±۰/۰۷^{a}	۲۴/۶۰±۰/۵۶^{b}	۱۵۵/۰۴±۱/۹۵^{b}	۱۱۱/۴۱±۱/۰۵^{b}
ام‌الغزلان	۲/۲۶±۰/۰۷^{a}	۳۰/۵۱±۰/۴۷^{c}	۱۵۷/۳۰±۱/۷۷^{c}	۱۲۳/۰۳±۲/۲۲۶^{c}
صلیحاویه	۱/۹۰±۰/۰۴^{a}	۲۷/۸۹±۰/۱۵^{a}	۱۴۳/۹۵±۳/۱۳^{d}	۱۰۵/۹۵±۲/۵۶^{d}

حروف متفاوت در هر ستون اختلاف معنی‌دار غلظت فلز در سطح اطمینان ۹۵ را نشان می‌دهد (P<۰/۰۵)

شاخص‌های آلودگی منفرد فاکتور آلودگی (۱۱/۳۱)، فاکتور غنی‌شدگی (۱۰۸/۷۷)، شاخص زمین‌انباشت (۲/۹۱) و خطر بوم‌شناسی (۳۳۹/۳۸) کادمیوم بالاتر از سایر فلزات در ایستگاه ام‌الغزلان به‌دست آمد. الگوی مقادیر فاکتور آلودگی، فاکتور غنی‌شدگی و شاخص زمین انباشت فلزات به‌صورت کادمیوم > روی > مس > سرب بود، البته باید توجه داشت که درمورد مقادیر شاخص زمین انباشت در ایستگاه ام‌الغزلان مس بالاتر از روی مشاهده شد. همچنین الگوی شاخص خطر بوم‌شناسی فلزات به‌صورت کادمیوم > مس > سرب > روی به‌دست آمد. پایین‌ترین مقادیر فاکتور آلودگی، فاکتور غنی شدگی و شاخص زمین انباشت مربوط به فلز سرب به‌ترتیب ۱/۴۵، ۱۳/۹۱ و ۰/۰۵- در ایستگاه سگاره به‌دست آمد (جدول ۲). در این تحقیق بالاترین مقادیر شاخص‌های آلودگی تجمعی خاک در مزارع کشاورزی منطقه ام‌الغزلان به دست آمد. همچنین پایین‌ترین مقادیر شاخص‌های درجه آلودگی، درجه آلودگی اصلاح شده، شاخص بار آلودگی، شاخص نمرو و مجموع خطر بوم‌شناسی خاک مزارع در ایستگاه ام‌الحجار مشاهده شد (جدول ۳).

جدول ۲. میانگین شاخص‌های آلودگی تجمعی فلزات سنگین خاک مزارع کشاورزی شهر دارخوین

شاخص آلودگی	ایستگاه‌ها	کادمیوم	سرب	روی	مس
فاکتور آلودگی	ام‌الحجار	۹/۰۷	۱/۶۸	۴/۷۲	۳/۰۹
	سگاره	۹/۸۱	۱/۴۵	۵/۵۴	۳/۳۸
	ام‌الغزلان	۱۱/۳۱	۱/۷۹	۵/۶۲	۳/۷۳
	صلیحاویه	۹/۵۰	۱/۶۴	۵/۱۴	۳/۲۱
فاکتور غنی شدگی	ام‌الحجار	۸۷/۲۷	۱۶/۱۵	۴۵/۲۳	۲۹/۷۱
	سگاره	۹۴/۲۹	۱۳/۹۱	۵۳/۲۵	۳۲/۴۸
	ام‌الغزلان	۱۰۸/۷۷	۱۷/۲۶	۵۴/۰۵	۳۵/۸۶
	صلیحاویه	۹۱/۳۷	۱۵/۷۸	۴۹/۴۷	۳۰/۸۸
زمین انباشت	ام‌الحجار	۲/۶۰	۰/۱۶	۱/۶۵	۱/۰۴
	سگاره	۲/۷۱	−۰/۰۵	۱/۸۸	۱/۱۷
	ام‌الغزلان	۲/۹۱	۰/۲۶	۱/۳۱	۱/۹۱
	صلیحاویه	۲/۶۶	۰/۱۳	۱/۷۸	۱/۱۰
خطر بوم‌شناسی	ام‌الحجار	۲۷۲/۰۶	۸/۴۰	۴/۷۲	۱۵/۴۴
	سگاره	۲۹۴/۳۸	۷/۲۴	۵/۵۴	۷/۲۴
	ام‌الغزلان	۳۳۹/۳۸	۸/۹۷	۵/۶۲	۱۸/۶۴
	صلیحاویه	۲۸۵	۸/۲۱	۵/۱۴	۱۶/۰۵

جدول ۳. میانگین شاخص‌های آلودگی منفرد فلزات سنگین خاک مزارع کشاورزی شهر دارخوین

ایستگاه‌ها	درجه آلودگی	درجه آلودگی اصلاح شده	شاخص بار آلودگی	شاخص نمرو	مجموع خطر بوم‌شناسی
ام‌الحجار	۱۸/۵۶	۴/۶۴	۱/۵۶	۶/۵۱	۳۰۰/۶۲
سگاره	۲۰/۱۸	۵/۰۴	۱/۶۵	۷/۰۴	۳۲۴/۰۳
ام‌الغزلان	۲۲/۴۵	۵/۶۱	۱/۸۹	۸/۱۱	۳۷۲/۶۱
صلیحاویه	۱۹/۴۹	۴/۸۷	۱/۶۲	۶/۸۱	۳۱۴/۴۰

غلظت فلزات سنگین کادمیوم ـ مس (r=۰/۷۳۹)، کادمیوم ـ روی (r=۰/۷۵۳)، کادمیوم ـ سرب (r=۰/۳۷۷) و مس ـ روی (r=۰/۸۱۴) در نمونه‌های خاک ارتباط مثبت و همبستگی داشتند (P<۰/۰۵) (جدول ۴). تجزیه و تحلیل مولفه اصلی غلظت فلزات سنگین خاک مزارع کشاورزی شهر دارخوین نشان داد که منشا کادمیوم، روی و مس مشترک می‌باشند، اما سرب دارای یک منشا خاص و ویژه بوده و با روی، مس و کادمیوم همگرایی نداشت (جدول ۵).

جدول ۴. نتایج همبستگی پیرسون غلظت فلزات سنگین خاک مزارع کشاورزی شهر دارخوین

فلزات سنگین	پارامترها	سرب	کادمیوم	روی	مس
سرب	همبستگی (r)	۱			
	Sig				
کادمیوم	همبستگی (r)	۰/۳۷۷*	۱		
	Sig	۰/۰۳۴			
روی	همبستگی (r)	۰/۱۰۱	۰/۷۵۳**	۱	
	Sig	۰/۵۸۸	۰/۰۰		
مس	همبستگی (r)	۰/۲۷۹	۰/۷۳۹**	۰/۸۱۴**	۱
	Sig	۰/۱۲۲	۰/۰۰	۰/۰۰	

* همبستگی در سطح ۰/۰۵ معنی‌دار است (P<۰/۰۵). ** همبستگی در سطح ۰/۰۱ معنی‌دار است (P<۰/۰۵)

جدول ۵. تجزیه و تحلیل مولفه اصلی غلظت فلزات سنگین خاک مزارع کشاورزی شهر دارخوین

فلزات سنگین	۱	۲
کادمیوم	۰/۹۴۲	۰/۱۰۲
سرب	۰/۴۰۲	۰/۸۸۲
روی	۰/۶۲۵	-۰/۳۴۷
مس	۰/۹۲۷	-۰/۰۰۶

روش چرخش (Rotation Method) واریماکس با نرمال‌سازی کایزر (Varimax with Kaiser Normalization)

در این پژوهش فلزات سنگین کادمیوم، سرب، مس و روی در خاک‌های مزارع کشاورزی شهر دارخوین در مقایسه با استاندارد ملی ایران و استاندارد کشور کانادا پایین‌تر بود (P<۰/۰۵)، اما میزان کادمیوم، سرب و روی در نمونه‌های خاک در مقایسه استاندارد آمریکا بالاتر به‌دست آمد (P<۰/۰۵). همچنین میزان مس و کادمیوم در مقایسه با استاندارد کشور چین بالاتر بود (P<۰/۰۵) (جدول ۶).

جدول ۶. مقایسه غلظت فلزات سنگین (میلی‌گرم بر کیلوگرم) در خاک‌های مزارع کشاورزی با استانداردهای ملی و جهانی[۳۲،۳۱،۳۰]

استانداردها	کادمیوم			سرب			روی			مس		
	میانگین	P	Sig	میانگین	P	Sig	میانگین	P	Sig	میانگین	P	Sig
استاندارد ملی ایران	۳/۹	۰/۰۲۰	<0/05	۸۰	۰/۰۳۲	<0/05	۵۰۰	۰/۰۳۹	<0/05	۴۰۰	۰/۰۴۱	<0/05
استاندارد کانادا	۲۲	۰/۰۱۷	<0/05	۹۱	۰/۰۳۵	<0/05	۶۰۰	۰/۰۱۲	<0/05	۲۵۰	۰/۰۴۵	<0/05
استاندارد آمریکا	۰/۰۶	۰/۰۲۱	<0/05	۱۰	۰/۰۱۷	<0/05	۵۰	۰/۰۲۵	<0/05	۳۶۰	۰/۰۲۹	<0/05

استاندارد ملی چین	۰/۳	۰/۰۲۷	<0/05	۱۰۰	۰/۰۲۲	<0/05	۳۰۰	۰/۰۳۵	<0/05	۳۰	۰/۰۱۵	<0/05
تحقیق حاضر	۱/۹۸	-	-	۲۷/۸۸	-	-	۱۴۷/۱۰	-	-	۱۱۰/۵۷	-	-

بحث

شاخص‌های آلودگی مربوط به فلزات سنگین خاک، فاکتور آلودگی و شاخص زمین انباشت فلزات سنگین نشان دهنده آلودگی شدید خاک به فلز کادمیوم بود. همچنین فاکتور غنی شدگی فلز کادمیوم حاکی از ورود این عنصر از فعالیت‌های انسان‌زاد به خاک‌های کشاورزی می‌باشد. از طرف دیگر شاخص خطر بوم شناسی، خطر خیلی زیاد را برای فلز کادمیوم نشان داد. کادمیوم به‌دلیل کاربرد گسترده صنعتی، یک آلاینده اصلی زیست‌محیطی است. آلودگی خاک می‌تواند انسانی یا طبیعی باشد. آلودگی عمدی شامل آبیاری با فاضلاب، آفت‌کش‌ها، کودهای حیوانی، کودها، رنگ‌های سرب‌دار، ضایعات سنگ معدن (باطله معدن)، لجن فاضلاب، نشت تقطیرهای نفتی، بقایای احتراق زغال‌سنگ و تخلیه زباله‌ها می‌شود. استفاده از فاضلاب و پساب‌هایی که تصفیه نشده‌اند، باعث ورود مقدار زیادی فلزات سنگین به زمین‌های کشاورزی ما شده و بنابراین توسط محصولاتی که معمولاً توسط خود انسان‌ها خورده می‌شوند، جذب شده‌اند[۱۰،۱۱]. آلودگی خاک و آب با کادمیوم نسبتاً کلاسیک است، اما به‌عنوان یک مشکل جدید ظهور کرده است[۳۳]. فاکتور آلودگی نشان داد سرب، روی و مس دارای آلودگی متوسط تا آلودگی زیاد بودند. شاخص زمین انباشت نشان داد خاک از نظر سرب آلودگی نداشت و درمورد روی و مس آلودگی کم را دارند. شاخص خطر بوم‌شناسی سرب، روی و مس رده خطر کم داشت. غنی‌شدگی خاک به وسیله فلز سرب زیاد و درمورد روی و مس خیلی زیاد بود. فاکتور غنی‌شدگی کمتر از ۱۰ نشان دهنده منشا طبیعی و فرآیندهای زمین‌شناسی عناصر بالقوه سمی در خاک است[۳۴،۳۵]، بنابراین چنین به‌نظر می‌رسد که احتمالا ورود فلزات سنگین سرب، کادمیوم، روی و مس تحت تاثیر فعالیت‌های انسانی بود. منابع معمول آلودگی بالای سرب در خاک همانند کادمیوم، انسان‌ساخت هستند. انتشار گازهای خروجی خودروها در بزرگراه‌ها، رسوبات اتمسفری و رواناب‌ها در جهت باد غالب و عملیات ذوب و ریخته‌گری، پساب‌ها و پسماندها مناطق مسکونی و کاربرد لجن فاضلاب تصفیه‌شده در زمین‌های کشاورزی از منابع انتشار سرب در محیط می‌باشند[۶،۹]. مس و روی از عناصر ریزمغذی ضروری هستند که به طور طبیعی در خاک وجود دارند. در برخی شرایط، کمبود آن‌ها وجود دارد و برای اطمینان از تغذیه کافی گیاهان یا حیوانات چراکننده، به اصلاحاتی نیاز است. با این حال، آلودگی صنعتی و شیوه‌های کشاورزی اغلب منجر به محتوای بالقوه سمی خاک می‌شوند. سطح زمینه هر دو فلز روی و مس در خاک متفاوت است، اما اغلب حدود ۵۰ تا ۶۰ میلی‌گرم در کیلوگرم بیان می‌شود. خاک‌های کشاورزی محتوای بیشتری روی و مس دارند و محتوای آن‌ها در خاک‌های به شدت آلوده ممکن است تا ۲ برابر بیشتر باشد[۵،۱۳].

شاخص‌های تجمعی درجه آلودگی، درجه آلودگی اصلاح شده، شاخص بار آلودگی فلزات سنگین و شاخص نمرو نشان داد که خاک مزارع کشاورزی شهر دارخوین دارای آلودگی بالایی نسبت به فلزات سنگین سرب، کادمیوم، روی و مس هستند. یکی از دلایل بالا بودن آلودگی فلزات سنگین در خاک های کشاورزی شهر دارخوین میادین نفت و گاز اطراف این منطقه می باشد. میدان نفتی منصوری، میدان نفتی دارخوین و میدان نفتی یادآوران در مجاورت و نزدیکی این مزارع کشاورزی هستند. همچنین جاده اهواز ـ آبادان در حاشیه این منطقه عبور می کند که خودروهای بسیاری در

آن تردد می کنند. از سوی دیگر این منطقه در پایین دست رودخانه کارون قرار دارد که بسیاری از آلودگی های کشاورزی، صنایع و شهری بالادست با جریان آب به این اراضی وارد شده و به دلیل آبیاری با آب رودخانه کارون سبب آلودگی خاک می گردد. تجزیه و تحلیل منبع آلودگی فلزات سنگین خاک به طور گسترده در تحقیقات قبلی مورد استفاده قرار گرفته است. مطالعات اخیر به طور گسترده از شاخص‌های بسیاری، از جمله شاخص بار آلودگی، شاخص زمین انباشت، ارزیابی ریسک اکولوژیک، شاخص آلودگی نمرو برای تجزیه و تحلیل آلودگی‌های خاک استفاده کرده‌اند[۳۲، ۳۶، ۳۷]. شاخص‌های زمین انباشت و بار آلودگی فلزات سنگین برای ارزیابی سطوح آلودگی و انباشت فلزات در خاک استفاده می‌شوند. در همین حال، ارزیابی خطر بوم شناسی، آسیب ایجاد شده را ارزیابی و اطلاعات ضروری را برای کنترل آلودگی فراهم می‌کند و شاخص نمرو ارزیابی کاملی از بار آلودگی ارائه می‌دهد و مدل‌های گیرنده کمی مورد استفاده برای تعیین منابع آلاینده‌ها را بهبود می‌بخشد[۳۸]. این شاخص‌ها در ارزیابی فلزات سنگین خاک بسیار مهم هستند و به توسعه برنامه‌های مدیریت آلودگی و تلاش برای کاهش خطرات کمک می‌کنند[۳۷]. در این تحقیق شاخص‌های آلودگی فلزات سنگین نشان دهنده این است که خاک مزارع کشاورزی مورد مطالعه دارای آلودگی بالا به سرب، کادمیوم، روی و مس هستند. احتمالا محتوای بالای فلزات سنگین در خاک‌ها به توانایی تجمع زیستی و زمینی آن‌ها و همچنین سرعت انتقال در پروفیل خاک مربوط می‌شود. توزیع فلزات سنگین در پروفیل خاک می‌تواند اطلاعاتی درمورد منشا آن‌ها ارائه دهد[۱۷، ۲۰]. غنی‌سازی خاک با فلزات سنگین می‌تواند منعکس‌کننده فعالیت‌های انسانی باشد[۳۲]. منابع آلودگی انسانی فعلی مانند صنعت و کشاورزی، تأثیر بدون شک بر تجمع فلزات سنگین در خاک دارند[۲۷]. فلزات سنگین می‌توانند از منابع انتشار محلی و دوردست مشتق شوند و بنابراین با توجه به طوفان های گرد و غبار و خاک در منطقه می‌توانند در محل رسوب کنند یا به دلیل توانایی آن‌ها در اتصال به گرد و غبار، می‌توانند در فواصل طولانی منتقل شوند[۲۳]. اکثر آلاینده‌های انسانی در اتمسفر منتشر می‌شوند و سپس روی سطح خاک رسوب می‌کنند. فلزات سنگین اجزای اساسی پوسته زمین محسوب می‌شوند، از این رو، ماهیت مواد اولیه و خاک‌زایی در محل می‌تواند شرایط مطلوب یا نامطلوبی را برای تجمع فلزات سنگین ایجاد کند. علاوه بر این، هوازدگی مواد اولیه یک فرآیند طبیعی است که بر تعداد فلزات سنگین موجود در خاک تأثیر می‌گذارد[۳، ۱۹].

کادمیوم ـ مس، کادمیوم ـ روی، کادمیوم ـ سرب و مس ـ روی در نمونه های خاک ارتباط مثبت و همبستگی وجود داشت ($P<۰/۰۵$). تجزیه و تحلیل مولفه اصلی غلظت فلزات سنگین خاک مزارع کشاورزی شهر دارخوین نشان داد که منشا کادمیوم، روی و مس مشترک می باشند، اما سرب دارای یک منشا خاص و ویژه بوده و با روی، مس و کادمیوم همگرایی نداشت. این یافته نشان می‌دهد که فلزات سنگین مشکوک به داشتن منبع و فرآیند توزیع یکسان هستند[۳۸]. همبستگی مثبت ممکن است منعکس کننده تأثیرات فعالیت‌های کشاورزی باشد. همانطور که قبلاً گزارش شده است، تصور می‌شود که همبستگی مثبت مربوط به آلودگی انسانی باشد[۳۹]. همبستگی‌های مشاهده شده بین فلزات سنگین می‌تواند نشان دهنده روابط متقابل بین عناصر مرتبط یا منابع آلودگی باشد[۴۰]. بار عاملی تجزیه و تحلیل مولفه اصلی را می‌توان به صورت قوی (>۰/۷۵)، متوسط (۰/۷۵-۰/۵۰) و ضعیف (۰/۵۰-۰/۳۰) طبقه‌بندی کرد[۳۴]. بنابراین، بارهای عاملی ضعیف در این بحث نادیده گرفته می‌شوند. علامت بار نشان می‌دهد که یک متغیر چقدر در مؤلفه اصلی نقش دارد. این مقدار از ۱- تا ۱+ متغیر است، بنابراین می‌تواند مثبت یا منفی باشد. بار مثبت به این معنی است که متغیر در مؤلفه اصلی نقش دارد، در حالی که بار منفی به این معنی است که عدم وجود آن در آن نقش دارد[۳۹]. در این تحقیق نیز از تکنیک ضریب همبستگی پیرسون و تحلیل مؤلفه‌های اصلی برای ارزیابی ارتباطات و منشأهای

بالقوه فلزات سنگین استفاده شد. برای مدیریت مؤثر آلودگی فلزات سنگین خاک، تشخیص کیفی منشأهای آلودگی و تخصیص منابع از اهمیت اساسی برخوردار است. رویکردهایی برای تعیین دقیق این منشأها شامل استفاده از تحلیل مؤلفه‌های اصلی است که به عنوان یک رویکرد خطی برای کاهش ابعاد عمل می‌کند، طیف وسیعی از متغیرهای محیطی را با استفاده از مجموعه‌ای محدود از مؤلفه‌های اصلی، به منشأهای متمایز تبدیل می‌کند[۴۱]. فلزات سنگین می‌توانند از منابع انسانی یا زمین‌زاد در خاک ناشی شوند. منابع زمین‌زاد، از جمله فرآیندهای ژئوشیمیایی و ژئوفیزیکی، غلظت ذاتی فلزات را تعیین می‌کنند[۴۲]. در همین حال، منابع انسانی شامل فعالیت‌های انسانی نیز از عوامل اصلی آلودگی در آب و محیط زیست هستند[۲۳]. این فعالیت‌ها شامل فرآوری سنگ معدن فلز، عملیات معدن‌کاری، احتراق سوخت‌های فسیلی، دفع زباله‌های صنعتی، تخلیه زباله‌های خانگی، انتشار گازهای گلخانه‌ای و استفاده بیش از حد از نهاده‌های کشاورزی مانند آفت‌کش‌ها و کودها می‌شود[۳۵]. سرب، کادمیوم، روی و مس از هر دو منبع فعالیت های کشاورزی و تردد و حمل و نقل خودروهای سبک و سنگین سرچشمه می‌گیرند. استفاده از قارچ‌کش‌ها، آفت‌کش‌ها و کودهای شیمیایی در کشاورزی منبع اصلی آلودگی کادمیوم است[۸،۱۰،۱۴]. بنابراین، با توجه به کاربرد گسترده کودهای شیمیایی و نزدیکی مزارع به جاده‌ها در منطقه مورد مطالعه، می‌توان نتیجه گرفت که سرب، روی، مس و کادمیوم آلاینده‌هایی هستند که از انتشار گازهای گلخانه‌ای از وسایل نقلیه و فعالیت‌های کشاورزی سرچشمه می‌گیرند[۳۲].

ندوکا و همکاران (۲۰۲۳) گزارش کردند توزیع کروم، مس، آرسنیک، سرب، نیکل، آهن و منگنز در خاک های کشاورزی سه منطقه در کشور نیجریه تحت تأثیر ترافیک، انتشار صنعتی و منابع طبیعی قرار گرفته است، تجزیه و تحلیل اکولوژیکی آلودگی کم تا متوسط را نشان داد. ارزیابی ریسک سلامت برای کودکان و بزرگسالان از طریق هر مسیر کمتر از ۱ بود[۳۶]. در تحقیقی غلظت کادمیوم خاک‌های کشاورزی مورد استفاده برای تولید گندم در مراکش در منطقه محمدیه بن سلیمان در چند ایستگاه از مقدار استاندارد (۲ میلی گرم بر کیلوگرم) فراتر گزارش شده و به ۱۰/۳۷۵ میلی گرم بر کیلوگرم رسید. غلظت سرب و روی در زمین‌های تاکستان بیشتر از زمین‌های گندم بود. غلظت سرب و روی به ترتیب ۲۰/۲۲ و ۱۴۸/۶۰ میلی گرم بر کیلوگرم بود[۳]. همچنین سالیم و همکاران (۲۰۲۴) گزارش کردند میانگین فلزات سنگین در نمونه‌های خاک سطحی مزارع کشاورزی به صورت $Fe > Mn > Zn > Ni > Cr > Cu > Pb > Co > As > Cd > Hg$ بود. فاکتور آلودگی، شاخص انباشت زمین و ضریب غنی‌سازی به ترتیب آلودگی قابل توجه، آلودگی متوسط و غنی‌سازی قابل توجهی را برای آرسنیک و کادمیوم بر اساس مقدار میانه نشان دادند. نتایج ضریب خطر اکولوژیکی ریسک اکولوژیکی پایینی را برای همه فلزات مورد مطالعه به جز کادمیوم نشان داد که ریسک اکولوژیکی قابل توجهی را نشان داد. سطوح شاخص خطر اکولوژیکی بالقوه ریسک اکولوژیکی پایین تا ریسک قابل توجه را نشان داد. به طور کلی، نتایج نشان‌دهنده تجمع آرسنیک و کادمیوم در منطقه مورد مطالعه است[۴]. غلظت هشت فلز سنگین به طور قابل توجهی بالاتر از مقادیر پس‌زمینه برای خاک‌های استان یوننان در کشور چین گزارش شده است که ناهمگونی مکانی واضحی را نشان داد. سطح کلی آلودگی از خفیف تا شدید متغیر بود و کادمیوم و سرب بحرانی‌ترین آلاینده‌ها بودند. چهار منبع اصلی آلودگی حمل و نقل صنعتی، مواد اولیه، کشاورزی و معدن از طریق رویکرد مدل‌سازی دوگانه شناسایی شدند[۲۰]. در مطالعه دیگری تجمع ۹ فلز سمی در خاک‌های کشاورزی، منابع آلودگی، شاخص خطرات زیست‌محیطی و خطرات بهداشتی در نمونه‌های خاک از چهار منطقه حاوی سطوح قابل تشخیصی از عناصر بالقوه سمی بودند که غلظت آهن، مس، آرسنیک، کادمیوم و سرب از حد مجاز فراتر رفته بود. فعالیت‌های طبیعی و انسانی به عنوان منابع فلزات سمی شناسایی شده‌اند. شاخص خطر زیست‌محیطی بالقوه فلزات سمی بسیار بالا است[۳۸]. مقایسه

نتایج تحقیقات و مطالعات ذکر شده با نتایج غلظت فلزات سنگین در خاک مزارع شهر دارخوین نشان می دهد که تفاوت هایی وجود دارد که می تواند به دلیل منشا و منابع فلزات سنگین در ورود به خاک مناطف مختلف باشد. خولیکولوف و همکاران (۲۰۲۵) بیان می کنند سهم قابل توجه انسان در تجمع فلزات سنگین، ناشی از انتشار گازهای گلخانه‌ای وسایل نقلیه، فرسودگی لاستیک و فعالیت‌های صنعتی را در آلودگی خاک‌ها برجسته می‌کند[۱۹].

نتیجه‌گیری

غلظت فلزات سنگین کادمیوم، سرب، مس و روی در خاک-های مزارع کشاورزی شهر دارخوین در مقایسه با استاندارد ملی ایران پایین تر بود. با توجه به نتایج شاخص های آلودگی خاک نظیر فاکتور غنی شدگی، شاخص زمین انباشت و شاخص بار آلودگی، بنابراین می توان چنین بیان کرد که احتمالا ورود فلزات سنگین سرب، کادمیوم، روی و مس تحت تاثیر فعالیت های انسانی بود و خاک منطقه مورد مطالعه دارای آلودگی بالای فلزات سنگین می باشد. به طور کلی، نتایج ارزیابی آلودگی فلزات سنگین در نمونه‌های خاک مزارع کشاورزی نشان داد که ممکن است فلزات سنگین منجر به اثرات منفی و حاد برای افراد شوند. استفاده نامنظم و طولانی مدت از نهاده‌های کشاورزی، همراه با استقرار تأسیسات صنعتی در مجاورت نزدیک به زمین‌های کشاورزی، استقرار بی‌رویه کودهای شیمیایی، استفاده از لجن فاضلاب به عنوان منبع مناسب، برای حفظ یک رژیم منسجم نظارت بر کالاهای غذایی با توجه به سطح فلزات سنگین و بقایای ترکیبات شیمیایی آن‌ها برای حفظ یکپارچگی پروتکل‌های ایمنی مواد غذایی، عاقلانه است. علاوه بر این، نزدیکی به میدان نفتی دارخوین و جاده مواصلاتی آبادان ـ اهواز ممکن است منجر به افزایش غلظت فلزات سنگین در منطقه اطراف شود. آزمایش دوره‌ای خاک به کشاورزان کمک می‌کند تا سطح فلزات سنگین را در مزارع خود شناسایی کنند. این اطلاعات آن‌ها را قادر می‌سازد تا در مورد شیوه‌های مناسب مدیریت خاک و انتخاب محصول، تصمیمات آگاهانه‌ای بگیرند. نظارت مداوم بر غلظت فلزات سنگین در محیط زیست، از جمله خاک و آب، برای ارزیابی اثربخشی استراتژی‌های کاهش و شناسایی منابع آلودگی بالقوه ضروری است. پیشنهاد می شود سایر فلزات سمی و عناصر کمیاب در خاک و درختان مناطق شهری و مسکونی شهر دارخوین بررسی شود. همچنین فلزات سنگین خاک میدان نفتی دارخوین و درختان بومی منطقه و ردیابی فلزات سنگین در هوا، آب، خاک، محصولات کشاورزی در منطقه دارخوین مطالعه گردد.

سپاسگزاری

این مقاله حاصل پایان‌نامه مقطع کارشناسی‌ارشد گروه محیط‌زیست دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهواز با عنوان "ارزیابی آلودگی فلزات سنگین خاک و محصول مزارع کشت گندم محدوده شهر دارخوین در جنوب کلانشهر اهواز"می‌باشد. نویسندگان مقاله مراتب تشکر و قدردانی را از معاونت پژوهشی دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهواز اعلام می‌نمایند.

تعارض منافع

نویسندگان هیچ گونه تضاد منافع حقیقی یا مادی با یکدیگر ندارند.

حمایت مالی

نویسندگان اعلام می کنند که این تحقیق پشتیبان مالی نداشته است.

ملاحظات اخلاقی

نویسندگان تمام نکات اخلاقی شامل عدم سرقت ادبی، انتشار دوگانه، تحریف داده‌هاو داده‌سازی را در این مقاله رعایت کرده‌اند. با توجه به نوع روش این مطالعه در رابطه با حقوق مادی و معنوی جوامع انسانی و آسیب‌های وارده به حیات وحش هیچ‌گونه نقشی وجود نداشته است.

مشارکت نویسندگان

طراحی تحقیق: آزیتا کوشافر

مراحل میدانی و آزمایشگاهی: رضا صالحی

نگارش مقاله: رضا صالحی

تجزیه و تحلیل داده ها: رضا صالحی

ویرایش نهایی مقاله: آزیتا کوشافر

References

1. Velayatzadeh M, Payandeh K. Effect of household water treatment on the concentration of heavy metals of drinking water in Ahvaz city. Iranian South Medical Journal. 2020; 22(6): 402-414. [In Persian].
2. Tiecher TL, Ceretta CA, Tiecher T, Ferreira PA, Nicoloso FT, Soriani HH, Brunetto G. Effects of zinc addition to a copper-contaminated vineyard soil on sorption of Zn by soil and plant physiological responses. Ecotoxicology and Environmental Safety. 2016; 129: 109-119.
3. Zaakour F, Kholaiq M, Khouchlaa A, El Mjiri I, Rahimi A, Saber N. Heavy metal contamination in agricultural soils: a case study in Mohammedia Benslimane region (Morocco). Journal of Ecological Engineering. 2022; 23(5): 1-15.
4. Saleem M, Pierce D, Wang Y, Sens DA, Somji S, Garrett S.H. Heavy metal (oid) s contamination and potential ecological risk assessment in agricultural soils. Journal of Xenobiotics. 2024; 14(2): 634-650.
5. Wang G, Cisse G, Staunton S. Changes in chemical fractionation of copper and zinc in soil as a function of incubation moisture content and organic matter amendments. Chemosphere. 2024; 351: p.141198.
6. Mishra P, Ali S, Kumar R, Shekhar S. Global Lead Contamination in Soils, Sediments, and Aqueous Environments: Exposure, Toxicity, and Remediation. Journal of Trace Elements and Minerals. 2025; 100259.
7. Moyebi OD, Lebbie T, Carpenter D.O. Standards for levels of lead in soil and dust around the world. Reviews on Environmental Health. 2025; 40(1): 185-196.
8. Bouida L, Rafatullah M, Kerrouche A, Qutob M, Alosaimi AM, Alorfi H.S, Hussein M.A. A review on cadmium and lead contamination: Sources, fate, mechanism, health effects and remediation methods. Water. 2022;14(21): 3432.
9. Hamoud YA, Shaghaleh H, Zia-ur-Rehman M, Rizwan M, Umair M, Usman M, Alghanem S.M.S. Cadmium and lead accumulation in important food crops due to wastewater irrigation: Pollution index and health risks assessment. Heliyon. 2024; 10(3), e24712.
10. Alloway B.J. Heavy metals in soils, In: Blackie academic and professional. 1995; 368.
11. Paschal D.C, Burt V, Caudill S.P, Gunter E.W, Pirkle J.L, Sampson E.J, Jackson R.J. Exposure of the US population aged 6 years and older to cadmium: 1988–1994. Archives of Environmental Contamination and Toxicology. 2000; 38(3): 377-383.
12. Hassan W, Zahra Q.A, Attia K.A, Bashir S, Fiaz S, Mohammed A.A, Chen Z. Assessing the impact of copper toxicity on soil ecosystems and barley growth: identification of robust indicators. Environmental Monitoring and Assessment. 2025; 197(5): 1-21.
13. Chiou W.Y, Hsu F.C. Copper toxicity and prediction models of copper content in leafy vegetables. Sustainability. 2019; 11(22): 6215.
14. Alloway B.J. Soil factors associated with zinc deficiency in crops and humans. Environmental geochemistry and health. 2009; 31(5): 537-548.
15. Van H.T, Nga L.T.Q. Effects of Zn pollution on soil: Pollution sources, impacts and solutions. Results in Surfaces and Interfaces. 2024; 17: 100360.
16. Sharmin S, Wang Q, Islam M.R, Isobe Y, Enyoh C.E, Shangrong W. Unveiling Heavy Metal Distribution in Different Agricultural Soils and Associated Health Risks Among Farming Communities of Bangladesh. Environments. 2025; 12(6): 198.
17. Angon P.B, Islam M.S, Kc S, Das A, Anjum N, Poudel A, Suchi S.A. Sources, effects and present perspectives of heavy metals contamination: Soil, plants and human food chain. Heliyon. 2024; 10: e28357.
18. Ciszewski D, Kubsik U, Aleksander-Kwaterczak U. Long-term dispersal of heavy metals in a catchment affected by historic lead and zinc mining. Journal of soils and sediments. 2012; 12(9): 1445-1462.
19. Kholikulov S.T, Erdem H, Bobobekov I.N, Demir S, Gence C.C. Assessment of the levels of heavy metal pollution in roadside soils of Termiz–Taskent, Uzbekistan. Journal of Ecological Engineering. 2025; 26(3): 283-295.
20. Li Y, Wang S, Shang X, Zhou H, He J, Chen W, Zhang N. Characterization and source apportionment of heavy metal contamination in agricultural soils in the complex genesis region of western Yunnan. Scientific Reports. 2025; 15(1): 32213.
21. Seyed Sharifi R, Khalilzadeh R, Pirzad A, Anwar, S. Effects of biofertilizers and nano zinc-iron oxide on yield and physicochemical properties of wheat under water deficit conditions. Communications in Soil Science and Plant Analysis. 2020; 51(19): 2511-2524.
22. Kumar V, Sharma A, Kaur P, Sidhu G.P.S, Bali A.S, Bhardwaj R, Cerda A. Pollution assessment of heavy metals in soils of India and ecological risk assessment: A state-of-the-art. Chemosphere. 2019; 216, 449-462.
23. Emam W.W, Soliman, K.M. Geospatial analysis, source identification, contamination status, ecological and health risk assessment of heavy metals in agricultural soils from Qallin city, Egypt. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment. 2022; 36(9): 2437-2459.
24. Malakouti H, Shokoohi A, Zolfagharzadeh H. Assessing the uncertainty and risk of design floods at the Darkhovin Nuclear Site. Watershed Engineering and Management. 2022; 14(2): 126-144. [In Persian].
25. Yassir B, Alain P. Speciation of four heavy metals in agricultural soils around DraaLasfarmine area in Marrakech (Morocco). Pollution. 2015; 1(3): 257-264.
26. Kimbrough D.E, Wakakuwa J.R. Acid digestion for sediments, sludges, soils, and solid wastes. A proposed alternative to EPA SW 846 Method 3050. Environmental Science & Technology. 1989; 23(7): 898-900.
27. Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control a sediment logical approaches. Water Research. 1980; 14: 975–1001.
28. Abrahim G.M.S. Holocene sediments of Tamaki Estuary: Characterization and impact of recent human activity on an urban estuary in Auckland, New Zealand, Ph.D. thesis, University of Auckland, Auckland, New Zealand. 2005; 361 p.
29. Muller G. Index of geo accumulation in the sediments of the Rhine River. Geojournal. 1979; 2: 108–118.
30. NEPAC (National Environmental Protection Agency of China). Environmental Quality Standard for Soils; NEPAC: Beijing, China. 1995; GB 15618.
31. CCME. Canadian soil quality guidelines for the protection of environmental and human health, Canadian Council of Minister of the Environment. 2007.
32. Mansouri Moghadam S, Payandeh K, Koushafar A, Goosheh M., Mohammadi Rouzbahani M. Level of heavy metals and environmental pollution index in Ahvaz, Southwest Iran. Scientific Reports. 2024; 14(1): 14754.

33. Zulfiqar U, Jiang W, Xiukang W, Hussain S, Ahmad M, Maqsood M.F, Ali N, Ishfaq M, Kaleem M, Haider F.U, Farooq N. Cadmium phytotoxicity, tolerance, and advanced remediation approaches in agricultural soils; a comprehensive review. Frontiers in Plant Science. 2022; 13: 773815.
34. Liu Q.T, Diamond M.L, Gingrich S.E, Ondov J.M, Maciejczyk P, Stern G.A. Accumulation of metals, trace elements and semi-volatile organic compounds on exterior window surfaces in Baltimore. Environmental Pollution. 2003; 122(1): 51-61.
35. Suzuki K, Yabuki T., Ono Y. Roadside Rhododendron pulchrum leaves as bioindicators of heavy metal pollution in traffic areas of Okayama, Japan. Environmental Monitoring and Assessment. 2009; 149(1): 133-141.
36. Nduka J.K, Umeh T.C, Kelle H.I, Mgbemena M.N, Nnamani R.A, Okafor P.C. Ecological and health risk assessment of heavy metals in roadside soil, dust and water of three economic zone in Enugu, Nigeria. Urban Climate. 2023; 51: 101627.
37. Wang X, Dan Z, Cui X, Zhang R, Zhou S, Wenga T, Yan B, Chen G, Zhang Q, Zhong L. Contamination, ecological and health risks of trace elements in soil of landfill and geothermal sites in Tibet. Science of the Total Environment. 2020;715: 136639
38. Widyayanti S, Widodo S, Pustika A.B, Purwaningsih H, Hanifa A.P, Muazam A, Mulyani A. Potentially toxic elements'(PTEs) spatial distribution in agricultural soils and their impact on ecological and health risks. Case Studies in Chemical and Environmental Engineering. 2024; 10, 100936.
39. Briffa J, Sinagra E, Blundell R. Heavy metal pollution in the environment and their toxicological effects on humans. Heliyon. 2020; 6(9): e04691.
40. Deng J, Li W, Xu W, He Z, Tan X. Correlation and the concentrations of Pb, Cd, Hg and As in vegetables and soils of Chongqing, China. Environmental Geochemistry and Health. 2021; 43(6): 2357-2376.
41. El Behairy RA, El Baroudy AA, Ibrahim M.M, Mohamed E.S, Rebouh N.Y, Shokr M.S. Combination of GIS and multivariate analysis to assess the soil heavy metal contamination in some arid zones. Agronomy. 2022; 12(11), 2871.
42. Devkota B, Schmidt G.H. Accumulation of heavy metals in food plants and grasshoppers from the Taigetos Mountains, Greece. Agriculture, ecosystems & environment. 2000; 78(1): 85-91.