

## Assessment of Soil Contamination Status in Selected Agricultural Lands in Dhi Qar Province, Southern Iraq, Using Pollution Indices

Ali Al hafadhi, Behnam Dovlati, Ebrahim Sepehr, Farrokh Asadzadeh, Marziyeh Piri, Salar Rezapour

(Received: June 2025 Accepted: July 2026)

### Abstract

The accumulation and pollution of heavy metals in agricultural soils pose a serious global issue due to their toxicity, abundance of pollution sources, non-degradability, and persistence in the environment. The aim of this study is to assess the potential contamination of heavy metals in agricultural lands in Dhi Qar Province, southern Iraq, using pollution indices. In order to assess the pollution status of soils in the study area, 50 surface soil samples were collected from lettuce (*Lactuca sativa*) cultivated fields. The total concentrations of metals including copper (Cu), zinc (Zn), lead (Pb), cadmium (Cd), chromium (Cr), and nickel (Ni) were measured in the soil samples. To quantify the risk of soil contamination by heavy metals, the geo-accumulation index ( $I_{geo}$ ), contamination factor (CF), and ecological risk potential ( $E_r$ ) were also applied. The results showed that the average concentrations of Cu, Zn, Pb, Cd, Cr, and Ni in the soils were 1198, 2964, 332, 18, 171, and 11 mg kg<sup>-1</sup>, respectively. The levels of heavy metals—Cu, Zn, Pb, Cd, and Cr—exceeded acceptable limits in the study area. Based on the Contamination Factor (CF), Cd and Cr were classified as having high contamination levels ( $CF > 6$ ), while Ni showed low contamination ( $CF \leq 1$ ). According to the  $I_{geo}$  index, Cd was in class six, indicating an extremely high contamination level, and it also had the highest ecological risk potential among the heavy metals studied. Analysis of the spatial distribution maps of the contamination factor indices showed that the highest concentrations of heavy metals occurred in the northern, central, southeastern, and parts of the southwestern regions. Therefore, regular monitoring of heavy metal concentrations and identification of pollution sources in the region's soils are recommended to reduce and manage environmental and health risks.

**Key words:** Cadmium, Contamination Factor, Contaminated Soil, Dhi Qar, Geo-accumulation Index

Al hafadhi A., Dovlati B., Sepehr E., Asadzadeh F., Piri M. and Rezapour S. 2025. Assessment of Soil Contamination Status in Selected Agricultural Lands in Dhi Qar Province, Southern Iraq, Using Pollution Indices. *Applied Soil Research*, 14(1): 17-30

- 1- PhD student, Department of Soil Science; Urmia University; Urmia, Iran.
  - 2- Assistant Professor (Corresponding), Professor, Associate Professor, Department of Soil Science; Urmia University; Urmia, Iran.
  - 3- West Azerbaijan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Soil and Water Research Department, Education and Extension Organization (AREEO), Urmia, Iran
- Corresponding Author: [b.dovlati@urmia.ac.ir](mailto:b.dovlati@urmia.ac.ir)

## ارزیابی وضعیت آلودگی خاک در برخی اراضی زراعی در استان ذی قار، جنوب عراق با استفاده از شاخص‌های آلودگی

علی راضی جابر الحافظی<sup>۱</sup>، بهنام دولتی<sup>۲</sup>، ابراهیم سپهر<sup>۳</sup>، فرخ اسدزاده<sup>۲</sup>، مرضیه پیری<sup>۳</sup>، سالار رضاپور<sup>۲</sup>

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۰۴

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۱۳

### چکیده

انباشت و آلودگی عناصر سنگین در خاک‌های زراعی به دلیل سمیت، فراوانی منابع آلاینده، تجزیه ناپذیر بودن و انباشت آن‌ها در محیط، مشکلی جدی در سطح جهان است. هدف از مطالعه حاضر، ارزیابی آلودگی احتمالی فلزات سنگین در اراضی زراعی استان ذی قار/ جنوب عراق با استفاده از شاخص‌های آلودگی است. به منظور بررسی وضعیت آلودگی خاک‌های منطقه مورد مطالعه، تعداد ۵۰ نمونه خاک سطحی از مزارع تحت کشت کاهو (Lettuce) برداشت شد. غلظت کل عناصر مس (Cu)، روی (Zn)، سرب (Pb)، کادمیم (Cd)، کروم (Cr) و نیکل (Ni) در نمونه‌های خاک اندازه‌گیری شدند. جهت کمی کردن خطر آلودگی خاک به عناصر سنگین از شاخص زمین انباشتگی (I<sub>gen</sub>)، فاکتور آلودگی (CF) و پتانسیل ریسک اکولوژیک (E<sub>r</sub>) استفاده شد. نتایج نشان داد میانگین محتوی عناصر مس، روی، سرب، کادمیم، کروم و نیکل در خاک‌های مورد مطالعه به ترتیب برابر با ۱۱۹۸، ۲۹۶۴، ۳۳۲، ۱۸، ۱۷۱ و ۱۱ mg kg<sup>-1</sup> بود. مقادیر عناصر سنگین مس، روی، سرب، کادمیم و کروم در خاک‌های منطقه مورد مطالعه بیش از حد مجاز مشاهده شدند. براساس شاخص فاکتور آلودگی (CF) مقادیر عناصر کادمیم و کروم در کلاس آلودگی زیاد (CF > ۶) و آلودگی نیکل کم (CF ≤ 1) ارزیابی شدند. براساس مقدار شاخص زمین انباشت، مقدار کادمیم در کلاس شش و در سطح آلودگی بسیار شدید قرار داشت و همچنین پتانسیل ریسک اکولوژیک برای فلز سنگین کادمیم حداکثر بود. بررسی نقشه‌های توزیع پراکندگی شاخص فاکتور آلودگی عناصر بیانگر این نکته بود که حداکثر غلظت فلزات سنگین مورد بررسی در بخش‌های شمال، مرکز، جنوب شرق و بخشی از جنوب غربی منطقه رخ داده است. از این رو، به منظور کاهش و مدیریت خطرات زیست محیطی و سلامتی، پایش منظم مقدار عناصر سنگین و شناسایی منابع آلودگی عناصر در خاک‌های این منطقه توصیه می‌شود.

**واژه‌های کلیدی:** خاک آلوده، ذی قار، شاخص زمین انباشت، فاکتور آلودگی، کادمیم

الحافظی ع، دولتی ب، سپهر ا، پیری م، اسدزاده ف، رضاپور س. ۱۴۰۴. ارزیابی وضعیت آلودگی خاک در برخی اراضی زراعی در استان ذی قار، جنوب عراق با استفاده از شاخص‌های آلودگی. تحقیقات کاربردی خاک. جلد ۱۴، شماره ۱. ص: ۳۰-۱۷.

۱- دانشجوی دکتری گروه علوم خاک؛ دانشگاه ارومیه؛ ارومیه، ایران.

۲- به ترتیب استادیار (مکاتبه کننده)، استاد، استادیار، گروه علوم خاک؛ دانشگاه ارومیه؛ ارومیه، ایران.

۳- استادیار مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان آذربایجان غربی، بخش تحقیقات خاک و آب

نویسنده مسئول: [b.dovlati@urmia.ac.ir](mailto:b.dovlati@urmia.ac.ir)

## مقدمه

فاکتور آلودگی ( $CF^2$ ) (Islam *et al.*, 2020; Fural *et al.*, 2020) (Williams (Er<sup>3</sup>) (2015)، شاخص خطر اکولوژیکی بالقوه (EF<sup>4</sup>) (Antoine, 2020) & فاکتور غنی‌سازی (PI<sup>5</sup>) (Abdelhady *et al.*, 2019)، شاخص آلودگی (NPI<sup>6</sup>) (Wang *et al.*, 2021)، شاخص آلودگی نمره (Ustaoglu & Islam, 2020) می‌باشند. در اغلب کشورهای جهان محققان در مطالعات خود، برای تخمین سطوح آلودگی و خطر سلامتی از این شاخص‌ها استفاده کرده‌اند. کرباسی و همکاران (Karbasi *et al.*, 2016)، منشاء ژئوشیمیایی عناصر خاک و رسوبات ناحیه اطراف دریاچه ارومیه را بررسی کردند. در این مطالعه ارزیابی هر دو شاخص زمین‌انباشتگی و غنی‌سازی بیانگر عدم آلودگی عناصر کادمیم، کبالت، کروم، مس، منگنز، نیکل، سرب، وانادیوم، روی و آهن بود. تامچیک و همکاران (Tomczyk *et al.*, 2023) در ارزیابی آلودگی فلزات سنگین خاک‌های کشاورزی لهستان با استفاده از شاخص‌های آلودگی مشاهده کردند که فاکتور آلودگی عناصر کروم، روی و کادمیم حداکثر و این فاکتور برای عناصر کبالت و وانادیوم حداقل مقدار بود و منشا آلودگی خاک‌ها بیشتر در اثر فعالیت‌های انسانی برآورد شد. لی و همکاران (Liu *et al.*, 2024) در بررسی شاخص‌های آلودگی و ویژگی‌های توزیع فلزات سنگین خاک در الگوهای کاربری اراضی متمایز چین مشاهده کردند که در مزارع سبزیجات بدلیل استفاده از پساب به عنوان آب آبیاری، شاخص آلودگی کادمیم حداکثر می‌باشد. سینگ و همکاران (Singh *et al.*, 2024) در مطالعه بررسی غلظت فلزات سنگین (کروم، نیکل، روی، مس و سرب) در آب آبیاری، خاک و سبزیجات کشت شده در مجاورت منطقه صنعتی شمال هند مشاهده کردند که خطر اکولوژیک عناصر سنگین روی، مس، کروم، نیکل، و مس در گیاهان این منطقه زیاد می‌باشد. با توجه به مطالب ذکر شده می‌توان گفت بحران آب یکی از مسایل اساسی مناطق خشک و نیمه‌خشک بویژه در کشور عراق است، و به‌دلیل استفاده کشاورزان از پساب شهری، ارزیابی پیامدهای آبیاری با پساب بر غلظت کل فلزات سنگین مانند روی، مس، کادمیم، سرب در خاک‌های زراعی ضروری می‌باشد. از آنجا که میزان عناصر سنگین کادمیم، سرب، مس،

یکی از سرمایه‌های با ارزش هر کشور خاک می‌باشد که نقش خیلی مؤثری در زمینه‌های کشاورزی، منابع طبیعی و محیط زیست ایفا می‌کند (Wdowczyk *et al.*, 2023). با توجه به جایگاه خاک در تولید محصول، رشد و نمو گیاهان و ایجاد پوشش گیاهی، عدم حفاظت از این سرمایه ارزشمند کمبود عناصر غذایی، فرسایش خاک و تخریب منابع طبیعی را به دنبال خواهد داشت (Khosravi *et al.*, 2018). اخیراً آلودگی خاک به عنوان یکی از مهمترین پیامدهای زیست محیطی فعالیت‌های بشری مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته است. زیرا با گسترش سریع صنعت، استخراج معادن و همچنین کشاورزی متمرکز در پاسخ به تقاضای غذایی جمعیت در حال رشد، تولید و دفع بیشتر زباله، فاضلاب و مصرف کودهای شیمیایی در کشاورزی منجر به ورود و تجمع فلزات سنگین در خاک‌ها شده است (Tan *et al.*, 2023). فلزات سنگین به‌دلیل آثار زیان‌بار فیزیولوژیک و تجزیه‌ناپذیر بودن در غلظت‌های کم، اهمیت ویژه‌ای دارند (Szymańska-Pulikowska *et al.*, 2023). عناصر سنگین از دو منبع طبیعی و انسانی وارد خاک می‌شوند. در بیشتر خاک‌ها منشأ اصلی عناصر سنگین در خاک مواد مادری است (Pejman *et al.*, 2015). مواد مادری بسته به شرایط تشکیل و جنس، دارای مقادیر متفاوتی از عناصر سنگین هستند (Massas *et al.*, 2013). مهمترین منابع انسانی، فعالیت‌های صنعتی- معدنی، استخراج نفت، حمل و نقل، فاضلاب‌های شهری و فعالیت‌های کشاورزی، کودها و سموم شیمیایی، کودهای حیوانی است (Wei & Yang, 2010). برای ارزیابی کمی و کیفی آلودگی فلزات سنگین و منشأ آنها، در محیط‌های آبی و خاک، روش‌های متفاوتی وجود دارد. یکی از روش‌های رایج کمی‌سازی آلودگی خاک، استفاده از شاخص‌های زیست محیطی است که تاکنون پژوهشگران متعددی کیفیت خاک را از نظر آلودگی با استفاده از این شاخص‌ها مورد ارزیابی قرار داده‌اند. در میان تعدادی از شاخص‌های توسعه‌یافته که برای ارزیابی آنها استفاده می‌شود، رایج‌ترین شاخص‌های ارزیابی وضعیت آلودگی در خاک‌ها عبارتند از شاخص زمین‌انباشت ( $I_{geo}^1$ ) (Dash *et al.*, 2021; Müller, 1969)،

4 - Enrichment Factor

5 - Pollution index

6 - Nemerow Comprehensive Pollution Index

1- Geoaccumulation Index

2 - contamination factor

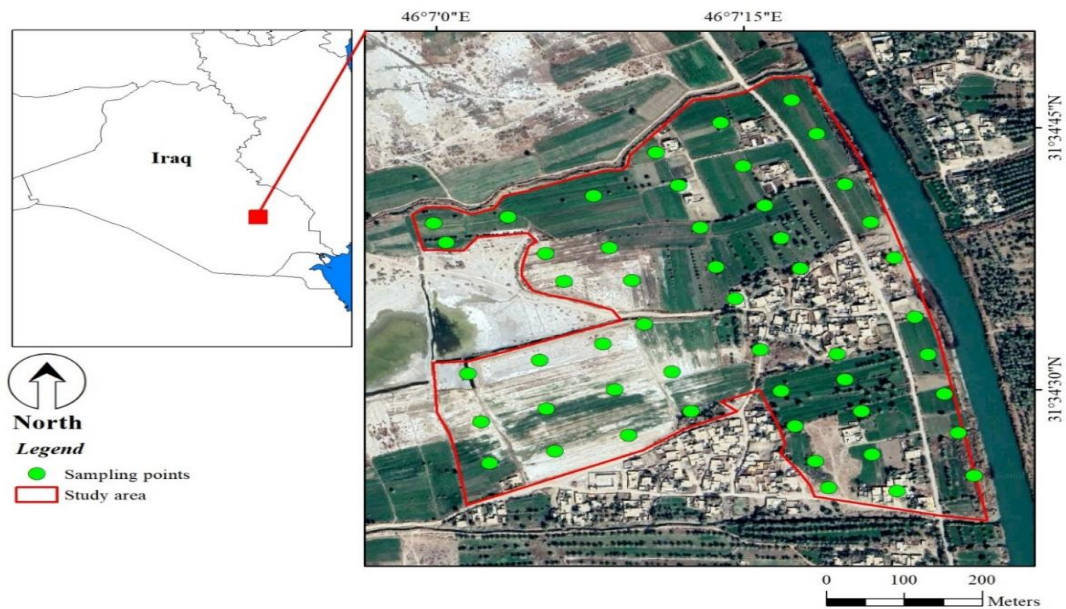
3 - Potential Ecological Risk Index

### منطقه نمونه برداری و آنالیز نمونه‌ها

برای ارزیابی وضعیت آلودگی خاک در برخی مزارع تحت کشت کاهو (Lettuce) در استان ذی قار/ جنوب عراق از خاک سطحی (عمق صفر تا ۱۵ سانتی متری) ۵۰ نمونه جمع‌آوری شد در منطقه مورد مطالعه بیشتر از فاضلاب برای آبیاری مزارع زراعی استفاده می‌شود. طول و عرض جغرافیایی محل‌های نمونه برداری خاک توسط سیستم موقعیت جهانی (GPS) ثبت شد.

روی، کروم و نیکل در اراضی زراعی استان ذی قار واقع در جنوب کشور عراق بررسی نشده است، لذا هدف از این پژوهش ارزیابی میزان آلودگی این عناصر در برخی اراضی زراعی این منطقه تحت کشت ماهو با استفاده از شاخص‌های زیست محیطی می‌باشد همچنین در این پژوهش مناطقی که پتانسیل آلودگی عناصر سنگین بیش از حد مجاز استاندارد باشند، شناسایی و پهنه‌بندی می‌شوند.

### مواد و روش



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

Figure 1. Study area

### شاخص‌های آلودگی

به منظور ارزیابی آلودگی خاک ناشی از فلزات سنگین در منطقه مورد مطالعه شاخص‌هایی مانند فاکتور آلودگی (CF)، زمین انباشت ( $I_{geo}$ ) و شاخص پتانسیل ریسک اکولوژیک (Er) در مورد محاسبه و ارزیابی قرار گرفتند.

**فاکتور آلودگی (CF)** برای تعیین آلودگی خاک به فلزات سنگین در خاک‌های مورد مطالعه از فاکتور آلودگی استفاده گردید. براساس این فاکتور، مقدار فلزات سنگین نسبت به مقدار طبیعی آن سنجیده می‌شود و میزان آلاینده‌ی خاک بر مبنای آن تعیین می‌گردد. این فاکتور از رابطه یک (۱) زیر محاسبه می‌شود:

برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی نظیر بافت به روش هیدرومتری (Gee & Bauder, 1986)، pH و EC در عصاره اشباع، کربن آلی به روش والکلی و بلک (Nelson & Sommers, 1982)، کربنات کلسیم معادل به روش خنثی‌سازی با اسید کلریدریک (Rayment & Higginson, 1992) بر روی نمونه‌های خاک هوا خشک شده (کمتر از ۲ میلی‌متر) اندازه‌گیری شد. غلظت کل عناصر سنگین شامل کادمیم، سرب، مس، روی، کروم و نیکل پس از هضم توسط اسید نیتریک یک مولار با استفاده از دستگاه AES-ICP مدل Imer Perkin Optima DV 2100 اندازه‌گیری شدند

$$CF_{metal} = \frac{C_{metal}}{C_{background}} \quad (1)$$

(Van Ranst et al., 1999).

در این رابطه  $CF_{metal}$  فاکتور آلودگی،  $C_{metal}$  غلظت عنصر در سطح خاک و  $C_{background}$  غلظت عنصر در زمینه (پوسته زمین) می باشد. غلظت عناصر در پوسته زمین برای کادمیم، کروم، مس، نیکل، سرب و روی به ترتیب ۰/۰۹، ۰/۰۹، ۰/۰۹، ۰/۰۹، ۰/۰۹ و ۰/۰۹ می باشد (Gao et al., 1998). در این پژوهش از طبقه بندی هکنسن به منظور ارزیابی آلودگی خاکها با استفاده از این شاخص استفاده شده است (Hakanson, 1980) بطوریکه در این معادله  $CF$  کمتر مساوی یک ( $CF \leq 1$ ) نشان دهنده آلودگی کم،  $1 < CF \leq 3$  میانگر آلودگی متوسط، بین  $3 < CF \leq 6$  آلودگی قابل توجه و بیشتر از ۶ بیانگر آلودگی زیاد می باشد.

شاخص زمین انباشت ( $I_{geo}$ ) این شاخص با استفاده از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$I_{geo} = \log_2 \left[ \frac{C_n}{1.5B_n} \right] \quad (2)$$

که در این معادله به ترتیب  $C_n$  و  $B_n$  غلظت عناصر سنگین در نمونه های خاک مورد آزمایش و غلظت در پوسته زمین می باشد. مقادیر مختلف  $I_{geo}$  را بر اساس شدت آلودگی می توان در ۶ کلاس تقسیم بندی کرد (Muller, 1979). کلاس صفر نسبتا غیر آلوده ( $I_{geo} < 0$ )، کلاس ۱ غیر آلوده تا آلودگی متوسط ( $0 \leq I_{geo} < 1$ )، کلاس ۲ آلودگی متوسط ( $1 \leq I_{geo} < 2$ )، کلاس ۳ آلودگی متوسط تا شدید ( $2 \leq I_{geo} < 3$ )

پتانسیل ریسک اکولوژیک ( $Er$ ) شاخص پتانسیل ریسک اکولوژیک برای ارزیابی خطرات بالقوه زیست محیطی فلزات سنگین در خاک استفاده شده است. در این مطالعه برای ارزیابی پتانسیل ریسک اکولوژیک فلزات سنگین از معادلات ۳ و ۴ استفاده شد:

$$Er = CF \times T_n \quad (3)$$

$$RI = \sum_i^n Er \quad (4)$$

که در رابطه بالا  $CF$  فاکتور آلودگی،  $T_n$  شاخص سمی بودن فلز سنگین که برای عناصر کادمیم، سرب، مس، روی، نیکل و کروم به ترتیب ۲۰، ۵، ۵، ۵، ۱، ۵ و ۲ ارائه شده است (Lu et al., 2012).  $Er$  پتانسیل ریسک اکولوژیک هر عنصر مورد بررسی  $RI$  ریسک اکولوژیک مجموع عناصر را نشان می دهد. سطح آلودگی براساس پتانسیل ریسک اکولوژیک در پنج سطح طبقه بندی می شود (جدول ۱).

جدول ۱- شاخص پتانسیل ریسک اکولوژیک برای ارزیابی شدت آلودگی خاکها به عناصر سنگین

Table 1. Ecological risk potential index for assessing the severity of soil contamination by heavy metals

$E_r^i$	RI	level polution
$E_r^i < 40$	$RI < 150$	low
$40 \leq E_r^i < 80$	$150 \leq RI < 300$	moderate
$80 \leq E_r^i < 160$	$300 \leq RI < 600$	moderate - high
$160 \leq E_r^i < 320$	$600 \leq RI < 1200$	high
$320 \leq E_r^i$	$RI > 1200$	very high polution

Potential Ecological Risk Index ( $E_r$ ); Potential toxicity response index (RI)

## نتایج و بحث

نتایج برخی ویژگی های فیزیکی و شیمیایی خاک های مورد مطالعه در منطقه ذی قار / جنوب عراق در جدول ۲ نشان داده شده است. میانگین درصد رس (Clay)، درصد آهک ( $CaCO_3$ ) و میزان اسیدیته خاکها به ترتیب ۳۱، ۹/۵۹ و ۶/۸۵ درصد می باشد.

## نقشه پراکنش شاخص های مورد مطالعه ( $CF$ , $I_{geo}$ , $E_r$ )

برای شناسایی مناطق آلوده و یا در معرض آلودگی به عناصر سنگین، نقشه های پراکنش فاکتور آلودگی، شاخص زمین انباشت و پتانسیل ریسک اکولوژیک تهیه شد. بدین منظور ابتدا با بسط مدل های تئوری نیم تغییرنمای مناسب برای هر یک از شاخص های محاسبه شده، از روش میان یابی کریجینگ در محیط نرم افزار ARC GIS 9.3 استفاده شد (Johnston et al., 2001).

جدول ۲- برخی از ویژگی‌های خاک مورد مطالعه  
Table 2. Some characteristics of studied soil

	Clay	CaCO <sub>3</sub>	OM	EC	pH	N	P	K
		%		dS m <sup>-1</sup>		%	mg kg <sup>-1</sup>	
Mean	30.82	9.59	2.45	0.83	6.85	0.99	35.92	223.75
Min	13.59	5.47	1.34	0.23	6.24	0.92	30.04	191.86
Max	44.99	14.27	3.60	1.35	7.47	1.05	42.02	253.43
SD	9.97	2.23	0.62	0.31	0.29	0.03	2.93	14.30

کادمیم (۱۷/۸ میلی گرم بر کیلوگرم) < نیکل (۱۰/۸ میلی گرم بر کیلوگرم) می‌باشد و مقادیر مس، روی، سرب، کادمیم و کروم بیش از حد قابل قبول سازمان حفاظت محیط زیست می‌باشد (جدول ۳).

غلظت برخی عناصر سنگین در خاک‌ها در جدول ۳ نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود میانگین غلظت عناصر سنگین، روی (۲۹۶۴ میلی گرم بر کیلوگرم) < مس (۱۱۹۸ میلی گرم بر کیلوگرم) < سرب (۳۳۲ میلی گرم بر کیلوگرم) < کروم (۱۷۰ میلی گرم بر کیلوگرم) <

جدول ۳- غلظت برخی از عناصر سنگین در خاک‌های مورد مطالعه (mg kg<sup>-1</sup>)  
Table 3. Concentration of some heavy elements in the studied soils (mg kg<sup>-1</sup>)

	Cu	Zn	Pb	Cd	Cr	Ni
Mean	1198.5	2964.6	332.7	17.8	170.7	10.8
Min	1022.4	2522.7	186.4	6.0	117.0	9.9
Max	1365.1	3534.7	1263.0	28.4	238.7	11.6
SD	78.3	226.1	157.7	5.5	27.2	0.4
Permissible limits EPA	35-100	300	100-150	2-5	100	50

و کودهای دامی و شیمیایی در زمین‌های کشاورزی باعث افزایش غلظت کادمیم، کروم و مس در خاک‌های زراعی شده است. بنابراین فعالیت‌های انسانی از جمله عملیات کشاورزی، به خصوص استفاده پساب در کشاورزی و استفاده از کودهای دامی و شیمیایی می‌تواند باعث افزایش غلظت عناصر در خاک شود. براساس شکل ۲ مناطق با مقدار فاکتور آلودگی بالای سرب در قسمت‌های مرکزی منطقه مورد مطالعه بالا می‌باشد البته این موضوع ممکن است منشأ زمین‌شناسی نیز داشته باشد و که در مطالعات آینده می‌توان آن را بررسی کرد. بعلاوه کاربری اراضی در این مناطق کشاورزی آبی، صنعت و معدن می‌باشد که پساب، کود و سموم شیمیایی به صورت غیراصولی و بی‌رویه در اراضی کشاورزی مصرف می‌شود. احتمالاً در سنگ بستر به‌طور طبیعی مقدار غلظت سرب بالا باشد. بنابراین عامل مؤثر بر افزایش غلظت سرب در منطقه مورد مطالعه، ساختار زمین‌شناسی و فعالیت‌های کشاورزی (مصرف بی‌رویه پساب، کودهای دامی و شیمیایی) و همچنین آلودگی شهری (وسایل نقلیه) می‌باشد. برخی از محققان در بررسی نرخ انباشت سرب در زمین‌های کشاورزی استان همدان نشان داد که بدون در نظر گرفتن فرونشست‌های

شاخص فاکتور آلودگی (CF) خلاصه‌ای از وضعیت فاکتور آلودگی عناصر سنگین در خاک‌های مورد مطالعه در جدول ۴ ارائه شده است. در بین عناصر مورد مطالعه بالاترین میانگین فاکتور آلودگی به ترتیب برای کادمیم (۳۷)، کروم (۱۵/۴۸)، مس (۴/۴۴)، روی (۲/۷۰)، سرب (۱/۶۶) و نیکل (۰/۱۵) است که این نشان دهنده تأثیر میزان فعالیت‌های انسانی در تغییرات عناصر است. همان‌طور که در جدول ۳ مشاهده می‌شود در بین کلاس‌های آلودگی، کلاس آلودگی زیاد ( $CF > 6$ ) مربوط به عناصر کادمیم و کروم می‌باشد، کلاس آلودگی قابل توجه ( $3 < CF \leq 6$ ) مربوط به عنصر مس و آلودگی متوسط ( $1 < CF \leq 3$ ) مربوط به عناصر روی و سرب می‌باشد و آلودگی نیکل در خاک‌های مورد مطالعه کم می‌باشد ( $CF \leq 1$ ). در مطالعه چنگ و همکاران (Cheng et al., 2023) مقدار CF فلزات سرب، کادمیم و مس نسبت به نیکل بالاتر بود که نتایج مطالعه حاضر را تأیید می‌کند. در شکل ۲ نقشه‌های کریجینگ پراکنش فاکتور آلودگی کادمیم، کروم، نیکل، مس، روی و سرب نشان داده شده است. بالاترین میزان فاکتور آلودگی کادمیم، کروم و مس در شمال، جنوب شرق و بخشی از جنوب غربی واقع شده است. این احتمال وجود دارد که کاربرد آب فاضلاب و پساب

استان تهران با استفاده از شاخص‌های آلودگی مشاهده کردند، وضعیت آلودگی متوسط تا نسبتاً زیاد اکثر نمونه‌های خاک به عنصر کادمیم در منطقه وجود دارد و تحلیل شاخص‌ها به همراه بازدیدهای میدانی از منطقه، تأییدکننده این واقعیت است که فعالیت‌های انسانی تأثیر قابل توجهی در افزایش غلظت این فلز سنگین در خاک‌های سطحی منطقه دارند (Rahmani Siyalarz *et al.*, 2025). عباسی و همکاران (Abbasi *et al.*, 2024) در بررسی غلظت عناصر سنگین Ni و Fe، Cr، Zn، Cu، Cd، Pb در خاک‌های سطحی کشاورزی محدوده مرکز دفن میاندوآب گزارش کردند، منشأ حضور عناصر، وابسته به عوامل طبیعی و انسانی است. بطوریکه کروم، سرب و کادمیم با احتمال زیاد از منابع انسان ساخت و آهن از منابع طبیعی است.

اتمسفری، کودهای دامی و هواپدگی مواد مادری به ترتیب حدود ۱۴ و ۸۵ درصد از کل سرب وارده شده به زمین‌های کشاورزی را تشکیل می‌دهند (Yeganeh 1391). رودریگوز - مارتین و همکاران (Rodríguez Martín *et al.*, 2006) در بررسی میزان عناصر سنگین در خاک‌های کشاورزی حوزه ابرو در اسپانیا با استفاده از آنالیز چند متغیره و زمین آمار نشان دادند که کروم و نیکل توسط مواد مادری کنترل می‌شود درحالی که کادمیم، سرب، جیوه، مس و روی تحت تأثیر فعالیت‌های انسانی هستند و میانگین غلظت مس در مزارع زیتون و انگور بالا بود و به دلیل استفاده از کودهای شیمیایی و مواد حاصلخیزکننده خاک در این مناطق بود. برخی محققان در ارزیابی پتانسیل ریسک اکولوژیکی و زیست‌محیطی فلز کادمیم در خاک‌های اراضی شهری،

جدول ۴- فاکتور آلودگی عناصر سنگین در منطقه مورد مطالعه

Table 4. Contamination factor of heavy metal in the study area

	Pb	Cd	Cr	Cu	Zn	Ni
Mean	1.66	37.1	15.48	4.44	2.70	0.15
Min	0.93	12.44	9.63	3.79	2.29	0.14
Max	6.31	59.15	21.7	5.06	3.21	0.16
SD	0.79	11.51	2.56	0.29	0.21	0.01

قرار داشت. و کروم نیز در کلاس یک غیرآلوده تا آلودگی متوسط ( $0 < I_{geo} \leq 1$ ) قرار گرفته است. در شکل ۳ نقشه-های کریجینگ پراکنش شاخص زمین انباشت ( $I_{geo}$ ) مس و نیکل در بخش‌های شمال، مرکز و جنوب شرق و جنوب غرب واقع شده است. بنابراین این شاخص فلز کادمیم را به عنوان انباشته شده‌ترین فلز در منطقه نشان می‌دهد که با نتایج بلالی و همکاران (Balali *et al.*, 2023) و چن و همکاران (Chen *et al.*, 2023) مطابقت دارد در مطالعه آنها نیز فلز کادمیم بیشترین شاخص زمین انباشت را داشته است. کمترین مقدار  $I_{geo}$  مربوط به نیکل بود که این نتایج برخلاف نتایج سلامی و همکاران (Sellami *et al.*, 2022) بود که در مطالعه آن‌ها کروم کمترین مقدار این شاخص را نشان داد. (۳/۰۸-)

شاخص زمین انباشت ( $I_{geo}$ ) نتیجه بررسی‌های شاخص زمین انباشت ( $I_{geo}$ ) در جدول ۵ ارائه شده است. نتایج نشان داد که مقادیر این شاخص برای نیکل برای تمام نقاط بررسی شده منفی بود که عدم آلودگی به این فلز را نشان می‌دهد. مقدار میانگین شاخص زمین انباشت فلز کادمیم (۶/۹۴) در کلاس شش ( $I_{geo} > 5$ ) در سطح آلودگی بسیار شدید قرار دارد و همانگونه که در شکل ۳ نیز مشاهده می‌شود در بخش‌های شمال، شرق و جنوب شرق مقدار این شاخص برای کادمیم بالا می‌باشد. آلودگی عناصر مس و روی براساس شاخص زمین انباشت ( $I_{geo}$ ) در کلاس پنج آلودگی شدید تا بسیار شدید ( $4 < I_{geo} \leq 5$ ) قرار داشت و آلودگی سرب در کلاس چهار و در آلودگی شدید ( $4 < I_{geo} \leq 5$ )

جدول ۵- شاخص زمین انباشت ( $I_{geo}$ ) عناصر سنگین در منطقه مورد مطالعهTable 5. Geo-accumulation Index ( $I_{geo}$ ) of heavy metals in the study area

	Pb	Cd	Cr	Cu	Zn	Ni
Mean	3.58	6.94	0.25	4.08	4.87	-2.71
Min	2.86	5.47	-0.38	3.86	4.65	-2.83
Max	4.52	7.71	0.79	4.27	5.14	-2.60
SD	0.42	0.53	0.24	0.10	0.11	0.05

**پتانسیل ریسک اکولوژیک ( $E_r$ )**

مقادیر پتانسیل ریسک اکولوژیک ( $E_r$ ) و شاخص ریسک (RI) در جدول ۴ ارائه شده است. نتایج نشان داد میانگین پتانسیل ریسک اکولوژیک ( $E_r$ ) برای فلزات سنگین مورد مطالعه در نمونه‌های خاک بصورت کادمیم < روی < کروم < مس < سرب < نیکل کاهش یافت. پتانسیل ریسک اکولوژیک ( $E_r$ ) فلزات سنگین به ترتیب ۸/۳۲، ۳۹۵۷، ۳۱، ۱۰، ۴۴، ۱ مربوط به سرب، کادمیم، کروم، مس، روی، و نیکل بود که براساس جدول ۱ کادمیم دارای ریسک اکولوژیک شدید ( $E_r > 320$ ) می‌باشد که نشان‌دهنده منابع آلودگی مشهودی در خاک‌های منطقه مورد مطالعه است. روی دارای ریسک پتانسیل اکولوژیک متوسط ( $40 < E_r^i \leq$

۸۰) و سایر عناصر ریسک اکولوژیک کمی دارند ( $E_r < 40$ ). نتایج بدست آمده نشان داد که شاخص ریسک (RI) همه نمونه‌ها از حداقل ۱۴۲۶ تا حداکثر ۶۴۰۶ متغیر است، و براساس میانگین شاخص ریسک (RI) ۴۰۵۲ نمونه‌ها دارای ریسک زیاد هستند. مطالعات نشان دادند، کادمیم، سرب و کروم مسئول بیماری‌های خاص در انسان مانند مشکلات کلیوی، کبدی و سرطان هستند (Bada & Olarinre, 2012). این فلزات به خصوص سرب می‌تواند عملکرد اکولوژیک منطقه‌ای که دارای غلظت بالایی هستند را تحت تأثیر قرار دهد (Ogunkunle & Fatoba, 2013). بنابراین کاهش سطوح فلزات سنگین به منظور جلوگیری از خطر بالقوه این فلزات در محیط زیست بایستی مورد توجه قرار گیرد.

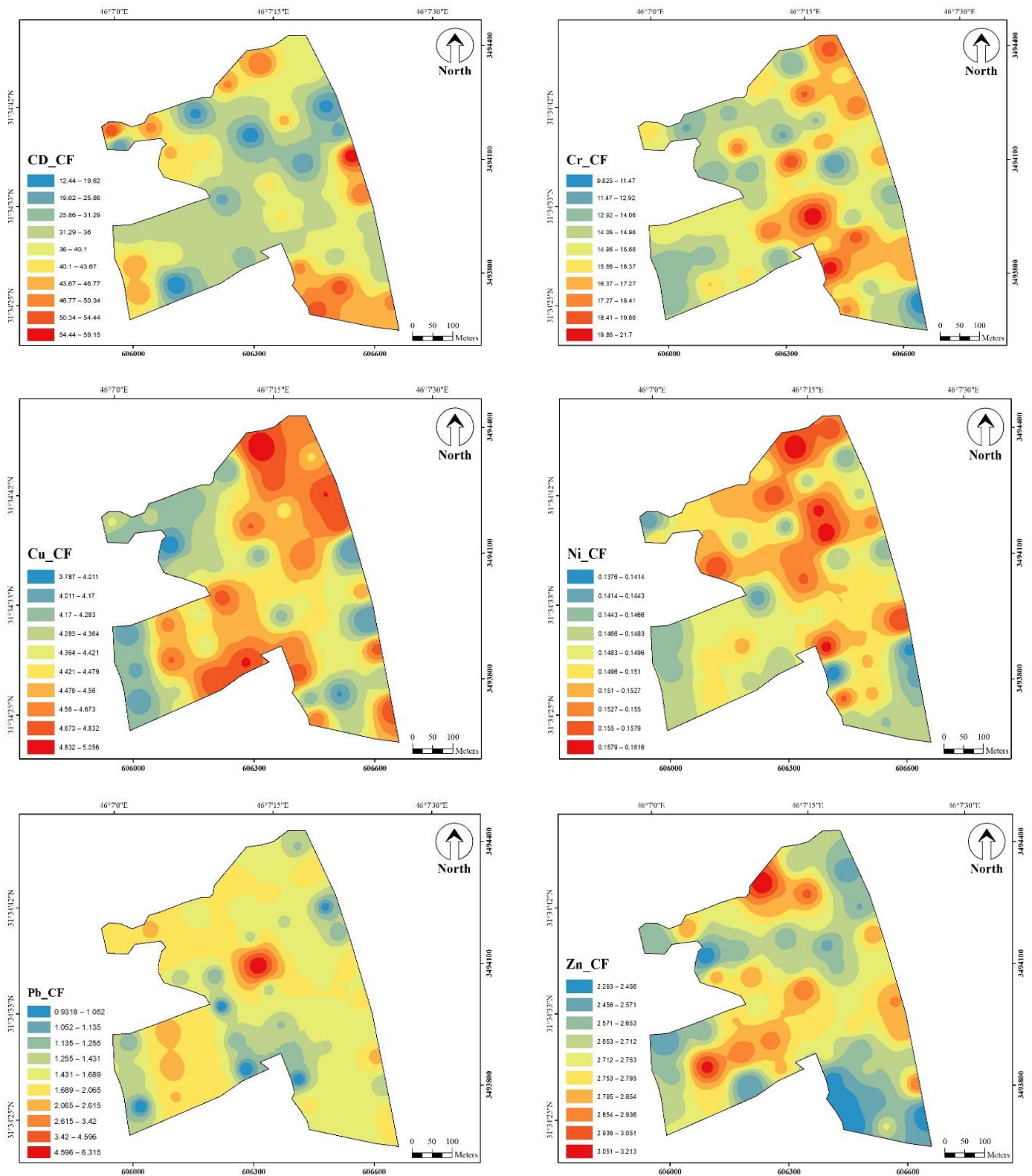
جدول ۶- پتانسیل ریسک اکولوژیک ( $E_r$ ) و شاخص ریسک (RI) عناصر سنگین در منطقه مورد مطالعه

Table 6. Ecological risk potential ( $E_r$ ) and risk index (RI) of heavy metals in the study area

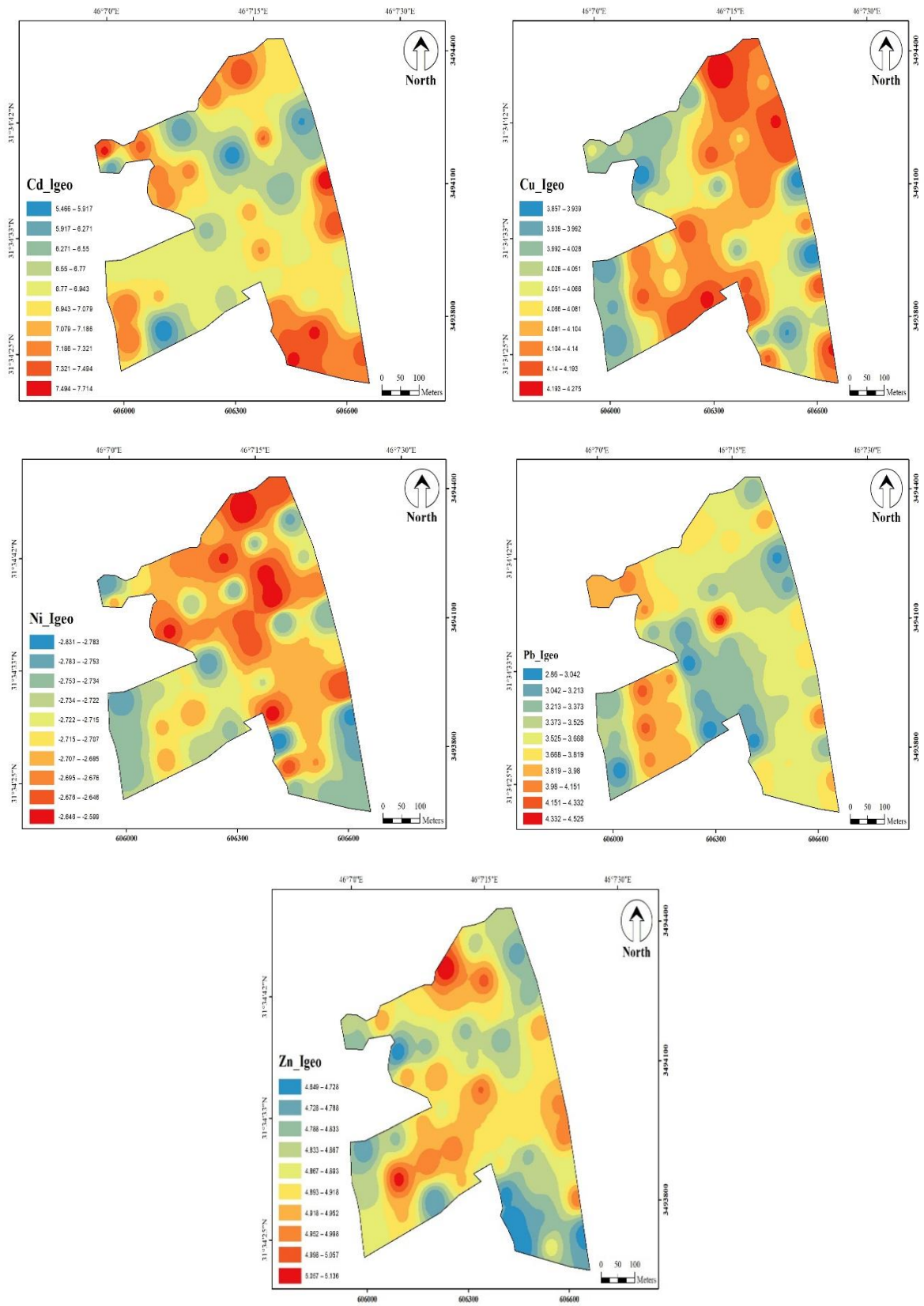
	Ei						RI
	Pb	Cd	Cr	Cu	Zn	Ni	
Mean	8.32	3957.6	30.99	10.51	44.25	1.15	4052.8
Min	4.66	1327.3	19.25	7.57	37.65	1.05	1426.2
Max	31.57	6309.7	43.40	90.45	52.76	1.24	6406.7
SD	3.94	1227.2	5.13	11.55	3.37	0.04	1229.6

در قسمت شمال و جنوب غرب واقع شده است. فعالیت‌های کشاورزی و استفاده از کودها و پساب در کشاورزی، انتشارات صنعتی و ترافیکی از منابع عمده و مهم انتشار عناصر روی، کادمیم و مس هستند (Hu et al., 2023).

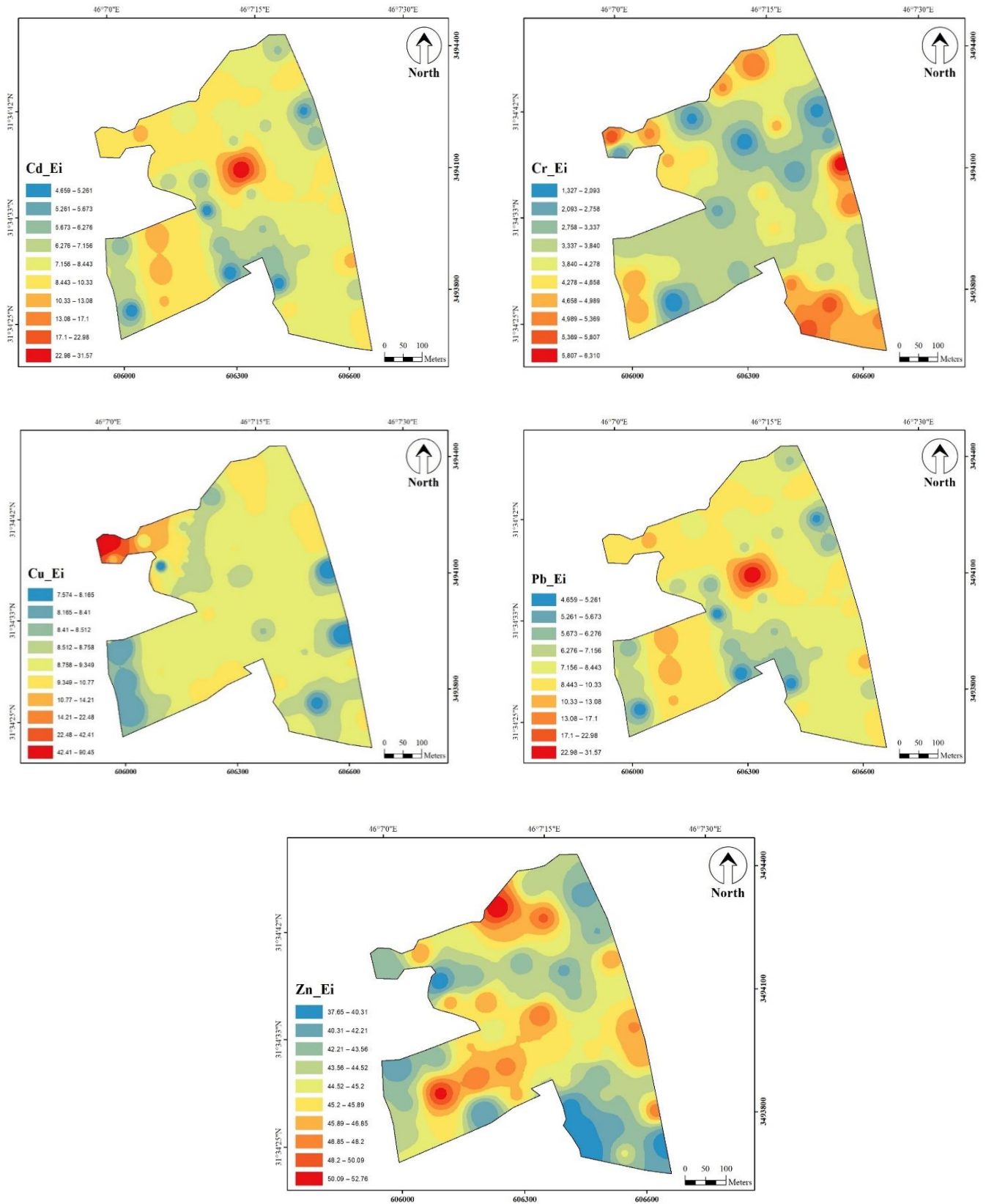
در شکل ۳ نقشه‌های کریجینگ پراکنش پتانسیل ریسک اکولوژیک ( $E_r$ ) کادمیم، کروم، نیکل، مس، روی و سرب نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود بالاترین مقادیر پتانسیل ریسک اکولوژیک کادمیم در قسمت مرکز منطقه مورد مطالعه و پتانسیل ریسک اکولوژیک عنصر روی



شکل ۲- نقشه کریجینگ فاکتور آلودگی (CF) عناصر سنگین  
 Figure 2. Kriging map of contamination factor (CF) of heavy metals



شکل ۳- نقشه کریجینگ شاخص زمین انباشت ( $I_{geo}$ ) عناصر سنگین  
 Figure 3. Kriging map of Geo-accumulation Index ( $I_{geo}$ ) of heavy metals



شکل ۴- نقشه کریجینگ شاخص پتانسیل ریسک اکولوژیک (Er) فلزات سنگین  
 Figure 4. Kriging map of Potential Ecological Risk Index (Er) of heavy metals

## نتیجه گیری کلی

< نیکل کاهش می‌یابد. نقشه پراکنش فاکتور آلودگی فلزات سنگین در منطقه مورد مطالعه نشان داد که آلودگی در بخش‌های شمال، مرکز، جنوب شرق و بخشی از جنوب غربی واقع شده است. احتمالاً کاربرد آب فاضلاب، پساب، کودهای دامی و شیمیایی در زمین‌های کشاورزی باعث افزایش غلظت کادمیم، کروم و مس در خاک‌های زراعی شده است. بنابراین پیشنهاد می‌گردد که اقداماتی در جهت جلوگیری از تخریب محیط زیست و اثرات سوء عناصر خطرناکی مثل کادمیم بر سلامتی ساکنین منطقه صورت پذیرد بعلاوه غلظت عناصر سنگین بایستی در گیاهان کشت شده در این اراضی بطور مرتب پایش شود.

آنالیز مقادیر عناصر سنگین در نمونه‌های خاک زراعی منطقه ذی قار عراق نشان داد که مقادیر مس، روی، سرب، کادمیم و کروم بیش از حد قابل قبول می‌باشد. با توجه به کلاس‌های ارزیابی فاکتور آلودگی، غالب نمونه‌های برداشت شده در منطقه مورد مطالعه دارای کلاس آلودگی زیاد به عناصر کادمیم و کروم می‌باشند و براساس این شاخص آلودگی نیکل در خاک‌ها کم می‌باشد. همچنین براساس مقدار شاخص زمین انباشت، مقدار کادمیم در کلاس شش و در سطح آلودگی بسیار شدید قرار داشت و پتانسیل ریسک اکولوژیک ( $E_r$ ) برای فلزات سنگین بصورت کادمیم < روی < کروم < مس < سرب

## References

- Abbasi, N., & Mohammadi Galangash, M. (2024). Investigation of heavy metal concentrations in agricultural topsoil of Miandoab landfill area. *Iranian Journal of Health and Environment*, 17(2), 343–358.
- Abdelhady, A. A., Khalil, M. M., Ismail, E., Mohamed, R. S. A., Ali, A., Snousy, M. G., Fan, J., Zhang, S., Li, Y., & Xiao, J. (2019). Potential biodiversity threats associated with metal pollution in the Nile Delta ecosystem (Manzala Lagoon, Egypt). *Ecological Indicators*, 98, 844–853.
- Bada, B. S., & Olarinre, T. A. (2012). Characteristics of soils and heavy metal content of vegetation in oil spill impacted land in Nigeria. In *Proceedings of the Annual International Conference on Soils, Sediments, Water and Energy (Vol. 17)*. The Berkeley Electronic Press.
- Balali, A. H., Gholami, S., Javanmardi, M. R., & Valipour, A. (2023). Assessment of heavy metal pollution in the soil of a construction and demolition waste landfill. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, 20, 100856.
- Chen, Z., Zhao, Y., Chen, D., Huang, H., Zhao, Y., & Wu, Y. (2023). Ecological risk assessment and early warning of heavy metal accumulation in soils near the Luanchuan molybdenum polymetallic mine concentration area, Henan Province, Central China. *China Geology*, 6, 15–26.
- Cheng, B., Wang, Z., Yan, X., Yu, Y., Liu, L., Yi, G., Zhang, H., & Yang, X. (2023). Characteristics and pollution risks of Cu, Ni, Cd, Pb, Hg and As in farmland soil near coal mines. *Soil and Environmental Health*, 1, 1–9.
- Dash, S., Borah, S. S., & Kalamdhad, A. S. (2021). Heavy metal pollution and potential ecological risk assessment for surficial sediments of Deepor Beel, India. *Ecological Indicators*, 122, 107265.
- Fural, S., Kükreker, S., & Cürebal, I. (2020). Geographical information systems-based ecological risk analysis of metal accumulation in sediments of İkizcetepeler Dam Lake (Turkey). *Ecological Indicators*, 119, 106784.
- Gee, G. W., & Bauder, J. W. (1986). Particle-size analysis. In A. Klute (Ed.), *Methods of soil analysis: Part 1 (2nd ed., pp. 383–412)*. American Society of Agronomy & Soil Science Society of America.
- Gao, S., Luo, T. C., Zhang, B. R., Zhang, H. F., Han, Y. W., Hu, Y. K., & Zhao, Z. D. (1998). Chemical composition of the continental crust as revealed by studies in East China. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 62(11), 1959–1975.
- Hakanson, L. (1980). An ecological risk index for aquatic pollution control: A sedimentological approach. *Water Research*, 14(8), 975–1001.
- Hu, N. W., Yu, H. W., Deng, B. L., Hu, B., Zhu, G. P., Yang, X. T., et al. (2023). Levels of heavy metals in soil and vegetables and associated health risks in peri-urban areas across China. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 259, 115037.

- Islam, M. S., Ahmed, M. K., Raknuzzaman, M., Habibullah-Al-Mamun, M., & Islam, M. K. (2015). Heavy metal pollution in surface water and sediment: A preliminary assessment of an urban river in a developing country. *Ecological Indicators*, 48, 282–291.
- Johnston, K., Ver Hoef, J. M., Krivoruchko, K., & Lucas, N. (2001). *Using ArcGIS Geostatistical Analyst*. ESRI Press.
- Karbasi, A., Lak, M., & Sanaee, M. (2016). Study on environmental geochemistry of toxic elements in the west area of Khoy City to the Razi border. *Journal of Environmental Sciences Studies*, 1(3), 57–66. (In Persian)
- Khosravi, V., Doulati Ardejani, F., Yousefi, S., & Aryafar, A. (2018). Monitoring soil lead and zinc contents via combination of spectroscopy with extreme learning machine and other data mining methods. *Geoderma*, 318, 29–41.
- Kicińska, A., Smreczak, B., Tan, C., Wang, H., Yang, Q., Yuan, L., Zhang, Y., & Delgado Martín, J. (2023). An integrated approach for quantifying source apportionment and source-oriented health risk of heavy metals in soils near an old industrial area. *Environmental Pollution*, 323, 121271.
- Liu, W., Yuan, C., Farooq, T. H., Chen, P., Yang, M., Ouyang, Z., Fu, Y., Yuan, Y., Wang, G., Yan, W., & Wang, J. (2024). Pollution index and distribution characteristics of soil heavy metals among four distinct land-use patterns of the Taojia River Basin in China. *Gondwana Research*, 135, 198–207.
- Lu, A., Wang, J., Qin, X., Wang, K., Han, P., & Zhang, S. (2012). Multivariate and geostatistical analyses of the spatial distribution and origin of heavy metals in agricultural soils in Shunyi, Beijing, China. *Science of the Total Environment*, 425, 66–74.
- Massas, I., Kalivas, D., Ehaliotis, C., & Gasparatos, D. (2013). Total and available heavy metal concentrations in soils of the Thriassio Plain (Greece) and assessment of soil pollution indexes. *Environmental Monitoring and Assessment*, 185(8), 6751–6766.
- Müller, G. (1969). Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River. *GeoJournal*, 2, 108–118.
- Papadimou, S. G., Kantzou, O. D., Chartodiplomenou, M. A., & Golia, E. E. (2023). Urban soil pollution by heavy metals: Effect of the lockdown during the COVID-19 period on pollutant levels over a five-year study. *Soil Systems*, 7(2), 44.
- Nelson, D. W., & Sommers, L. E. (1982). Total carbon, organic carbon, and organic matter. In A. L. Page (Ed.), *Methods of soil analysis. Part 2: Chemical and microbiological properties* (2nd ed., Agronomy Monograph 9, pp. 539–579). American Society of Agronomy & Soil Science Society of America.
- Ogunkunle, C. O., & Fatoba, P. O. (2013). Pollution loads and ecological risk assessment of soil heavy metals around a mega cement factory in southwest Nigeria. *Polish Journal of Environmental Studies*, 22(2), 487–493.
- Pejman, A., Nabi Bidhendi, G. R., Ardestani, M., Saedi, M., & Baghvand, A. (2015). A new index for assessing heavy metals contamination in sediments: A case study. *Ecological Indicators*, 58, 365–373.
- Rahmani Siyalarz, S., Keshavarzi, A., & Sarmadian, F. (2025). Ecological and environmental risk assessment of cadmium heavy metal in soil (Case study: Shahr-e-Rey, Tehran Province). *Iranian Journal of Soil and Water Research*. Advance online publication. (In Persian)
- Rayment, G. E., & Higginson, F. R. (1992). *Australian laboratory handbook of soil and water chemical methods*. Inkata Press.
- Rodríguez Martín, J. A., López Arias, M., & Grau Corbí, J. M. (2006). Heavy metals contents in agricultural topsoils in the Ebro Basin (Spain): Application of multivariate geostatistical methods to study spatial variations. *Environmental Pollution*, 144(3), 1001–1012.
- Sellami, S., Zeghouan, O., Dhahri, F., Mechi, L., Moussaoui, Y., & Kebabi, B. (2022). Assessment of heavy metal pollution in urban and peri-urban soils of Setif City (High Plains, eastern Algeria). *Environmental Monitoring and Assessment*, 194(2), 126.
- Singh, R., Singh, P. K., Madheshiya, P., Khare, A. K., & Tiwari, S. (2024). Heavy metal contamination in wastewater-irrigated soil and bioaccumulation in cultivated vegetables: Assessment of human health risk. *Journal of Food Composition and Analysis*, 128, 106054.

- Szymańska-Pulikowska, A., Wdowczyk, A., & Wiercik, P. (2023). Analysis of changes in substrates filling constructed wetland systems after landfill leachate treatment: FTIR study. *Journal of Cleaner Production*, 411, 137336.
- Tomczyk, P. T., Wdowczyk, A., Wiatkowska, B., & Szymańska-Pulikowska, A. (2023). Assessment of heavy metal contamination of agricultural soils in Poland using contamination indicators. *Ecological Indicators*, 156, 111161.
- Ustaoğlu, F., & Islam, M. S. (2020). Potential toxic elements in sediments of some rivers at Giresun, northeast Turkey: A preliminary assessment for ecotoxicological status and health risk. *Ecological Indicators*, 113, 106237.
- Van Ranst, E., Verloo, M., Demeyer, A., & Pauwels, J. M. (1999). *Manual for the soil chemistry and fertility laboratory: Analytical methods for soils and plants, equipment, and management of consumables*. Ghent University.
- Wdowczyk, A., & Szymańska-Pulikowska, A. (2023). Effect of substrates on the potential of *Phragmites australis* to accumulate and translocate selected contaminants from landfill leachate. *Water Resources and Industry*, 29, 100206.
- Williams, J. A., & Antoine, J. (2020). Evaluation of the elemental pollution status of Jamaican surface sediments using enrichment factor, geoaccumulation index, ecological risk and potential ecological risk index. *Marine Pollution Bulletin*, 157, 111288.
- Yeganeh, M., Afiuni, M., & Khoshgoftarmanesh, A. (2012). *Modeling the accumulation process of heavy elements in surface soils of Hamadan Province and determining the resulting risk to human health (Doctoral dissertation)*. Isfahan University of Technology. (In Persian)