

Comprehensive Risk Assessment of Heavy Metals in Soil and Determination of Pollution Hotspots (Case Study: Baiji Refinery, Iraq)

ABSTRACT

Oil refinery activities are considered to be one of the most important sources of heavy metal emissions in the environment and can cause soil pollution and increase ecological and health risks. The present study was conducted with the aim of assessing the status of heavy metal pollution, determining ecological and human health risks, and identifying pollution hotspots in soils located near the wastewater discharge route of the Baiji Oil Refinery in Iraq. For this purpose, 15 soil samples were taken from the wastewater discharge route to the Tigris River and the concentrations of eight heavy metals were measured using an ICP-MS device. The examination of pollution indices showed that the overall condition of the region was in the low to moderate pollution range, however, Cd and Hg contributed the most to the increase in ecological risk. The PERI index showed moderate risk in a significant part of the sites, and sites 6, 9, 14 and 15 were identified as hotspots of contamination. The results also showed that organic matter and clay percentage are the most important factors affecting the accumulation of heavy metals in the soil. The health risk assessment showed that although the non-carcinogenic risks for adults were within acceptable limits, children faced unacceptable risks at 100% of the sites. The ELCR values at all sites for both age groups were above the standard range. Overall, the findings indicate that continued input of pollutants could lead to increased environmental and health risks in the region in the future. Therefore, continuous monitoring, control of pollutant sources, and implementation of targeted management measures around the Baiji Refinery seem essential.

Keywords: Ecological Risk, Heavy Metals, Human Health Risk, Soil Pollution

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

The oil industry, as one of the main pillars of economic development, has always been associated with serious environmental challenges. Crude oil refining processes lead to the production of significant volumes of industrial wastewater containing hazardous pollutants, including heavy metals. Heavy metals are toxic and non-degradable pollutants that enter soil and water through refinery activities and pose serious risks to the ecosystem and human health due to their high persistence and ability to bioaccumulate and magnify in the food chain. Long-term exposure to these elements can lead to neurological damage, kidney disorders, cardiovascular diseases and even cancer. Iraq, as one of the largest oil producers, is highly exposed to these pollutants. The Baiji refinery, located north of Baghdad, is one of the largest refineries in the country, with a daily production capacity of about 250,000 barrels. However, a review of the research background showed that previous studies in this region have been mainly limited to measuring the concentration of heavy metals. The use of a complete set of pollution indices (CF, C_{deg} , PLI, I_{geo}), ecological risk (PERI) and health risk (ADD, HQ, HI, ELCR), as well as the investigation of the correlation of pollutants with soil physicochemical properties, has not been carried out in this region so far. Therefore, the present study was designed and implemented with the aim of comprehensively assessing the status of heavy metal pollution and identifying pollution hotspots in the soils around the Baiji refinery wastewater discharge route to the Tigris River.

Method

In this study, 15 sampling points were systematically and purposefully selected along the approximately 5 km route of the refinery's treated wastewater discharge to the beginning of the Tigris River. From each point, 15 surface soil samples (0-20 cm depth) were collected in January 2026. After sample preparation and air-drying, the physicochemical properties of the soil, including texture, electrical conductivity (EC), pH, and organic matter (OM) percentage, were determined using standard methods. For heavy metal analysis, samples were prepared using the acid digestion method and the concentrations of eight heavy metals (Ni, Cr, Pb, Cd, As, Zn, Cu, and Hg) were measured using an ICP-MS device. In order to comprehensively assess the pollution and risks, a set of indicators including CF, C_{deg} , PLI, I_{geo} , PERI, ADD in three routes of ingestion, dermal contact, and inhalation, HI, and ELCR were calculated. Statistical analyses, including the Shapiro-Wilk test to examine the normality of the data and the Pearson correlation test to examine the relationships between soil properties and heavy metal concentrations, were performed using SPSS version 26 software, and scatter maps were prepared using ArcGIS 10.8 software.

Results

The results showed that Ni and Cr have the highest concentrations in the soils of the region. The highest coefficient of variation was related to Cu and Zn, which indicates the greater spatial dispersion of these two metals. Pearson correlation analysis showed that organic matter and clay percentage as the most important controlling factors have a positive and significant correlation

with Ni, Cr, Cu, Zn, and As, which indicates the role of these two factors in the absorption and accumulation of heavy metals in the soil. The results of the pollution indices showed that CF for all metals is in the low to medium pollution range and Hg has the highest pollution level with a maximum CF of 2.6. The C_{deg} showed that 8 points are in the low pollution range and 7 points are in the medium pollution range, and no point reached a significant or severe pollution level. PLI for all points was less than 1, but points 6, 9, 14 and 15 were very close to the medium pollution threshold, which put these areas on the verge of crisis. The I_{geo} analysis showed that Cd was in the moderate pollution category with an average I_{geo} of 1.71 and all 15 I_{geo} points were positive for Cd, indicating widespread and widespread contamination of this metal throughout the region. The Hg was in the uncontaminated to moderate category with an average I_{geo} of 0.33, but points 9 and 15 were very close to the moderate contamination threshold. The most important finding of the study was related to PERI. Although the contamination factors of Hg and Cd were at moderate levels, these two metals accounted for more than 82% of the total ecological risk of the region due to their very high toxicity response coefficients. PERI values were in the low risk category at points 10 and in the moderate risk category at points 5. The results of the health risk assessment showed that for adults, HI was less than 1 at all points, indicating an acceptable non-carcinogenic risk. However, the situation for children was very worrying. In all 15 points (100%), HI values for children exceeded the safe threshold. The average ELCR for adults was calculated to be about 255 times higher than the standard upper limit and for children about 2000 times higher, indicating an unacceptable risk of carcinogenicity for residents of the area. The results showed that points 9, 15, 6 and 14 were identified as pollution hotspots in the area.

Conclusions

The present study, using a comprehensive set of pollution, ecological risk, and human health indicators, provided a clear picture of the soil pollution situation around the Baiji Refinery. The findings showed that although the overall pollution level of the region is in the low to moderate range, pollution hotspots show significant concentrations of heavy metals. Among them, Hg and Cd, despite their lower concentrations, have a dominant contribution to the ecological risk of the area due to their high inherent toxicity, which highlights the need to reconsider the prioritization of pollutants based on toxicity, not just absolute concentration. The most worrying finding is the unacceptable carcinogenic risk for residents of the area and the unacceptable non-carcinogenic risk for children at all sampling locations (100% of sites). Also, the strong correlation between organic matter and clay with metal concentrations indicates that soil characteristics play a key role in the accumulation of contaminants. Based on the results, a management strategy is prioritized at four levels: 1) immediate actions in hotspots, including restricting children's access, covering contaminated soil, and, implementing biostabilization plans; 2) establishing a continuous and seasonal monitoring system with an emphasis on Cr, Ni, and, As; 3) conducting epidemiological studies to assess the health effects of long-term exposure on the child population; and, 4) public empowerment and educating families on ways to reduce exposure to contaminated soil.

ارزیابی جامع ریسک فلزات سنگین در خاک و تعیین نقاط داغ آلودگی (مطالعه موردی: پالایشگاه بایجی عراق)

چکیده

فعالیت پالایشگاه‌های نفت از مهم‌ترین منابع انتشار فلزات سنگین در محیط‌زیست محسوب شده و می‌تواند موجب آلودگی خاک و افزایش مخاطرات اکولوژیکی و بهداشتی گردد. پژوهش حاضر با هدف ارزیابی وضعیت آلودگی فلزات سنگین، تعیین خطرات اکولوژیکی و سلامت انسان و شناسایی نقاط داغ آلودگی در خاک‌های واقع در نزدیکی مسیر تخلیه پساب پالایشگاه نفت بایجی عراق انجام شد. بدین منظور، تعداد ۱۵ نمونه خاک از مسیر تخلیه پساب تا رودخانه دجله برداشت و غلظت هشت فلز سنگین با استفاده از دستگاه ICP-MS اندازه‌گیری شد. بررسی شاخص‌های آلودگی نشان داد که وضعیت کلی منطقه در محدوده آلودگی کم تا متوسط قرار دارد، با این حال کادمیوم و جیوه بیشترین سهم را در افزایش خطر اکولوژیکی داشتند. شاخص PERI در بخش قابل توجهی از نقاط، خطر متوسط را نشان داد و نقاط ۶، ۹، ۱۴ و ۱۵ به عنوان نقاط داغ آلودگی شناسایی شدند. نتایج همچنین نشان داد که ماده آلی و درصد رس از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر تجمع فلزات سنگین در خاک هستند. ارزیابی ریسک سلامت نشان داد اگرچه خطرات غیرسرطان‌زایی برای بزرگسالان در محدوده قابل قبول قرار دارد، اما در ۱۰۰ درصد نقاط، کودکان با خطر غیرقابل قبول مواجه هستند. مقادیر ELCR در تمامی نقاط برای هر دو گروه سنی فراتر از محدوده استاندارد بود. در مجموع، یافته‌ها نشان می‌دهد تداوم ورود آلاینده‌ها می‌تواند در آینده منجر به تشدید مخاطرات زیست‌محیطی و سلامت در منطقه شود. بنابراین پایش مستمر، کنترل منابع آلاینده و اجرای اقدامات مدیریتی هدفمند در اطراف پالایشگاه بایجی ضروری به نظر می‌رسد.

کلمات کلیدی: آلودگی خاک، ریسک اکولوژیکی، ریسک سلامت انسان، فلزات سنگین

مقدمه

فلزات سنگین نظیر کادمیوم (Cd)، سرب (Pb)، نیکل (Ni)، کروم (Cr)، جیوه (Hg) و آرسنیک (As) از جمله آلاینده‌های سمی و پایداری هستند که می‌توانند از فعالیت‌های صنعتی، فرآوری نفت و سایر صنایع وارد محیط‌های آبی و خاکی شوند (Tchounwou et al., 2012; Mustapha et al., 2025). این عناصر به‌طور گسترده در پساب پالایشگاه‌ها و محیط پیرامونی آنها گزارش شده‌اند و برخلاف بسیاری از آلاینده‌های آلی، غیر قابل تجزیه بوده و می‌توانند در خاک و رسوبات تجمع یابند. این تجمع باعث بی‌ثباتی در ساختار جمعیت‌های زیستی می‌شود و می‌تواند اثرات مستقیمی مانند کاهش تنوع زیستی، اختلال در رشد و تولیدمثل و مرگ‌ومیر موجودات آبی و خاکی را به دنبال داشته باشد. همچنین غلظت این عناصر از طریق تجمع زیستی و بزرگنمایی زیستی در زنجیره غذایی بالا می‌روند، به گونه‌ای که حتی در سطوح پایین نیز می‌توانند اثرات شدیداً سمی ایجاد کنند (Mustapha et al., 2025).

انسان‌ها از طریق آب آشامیدنی، غذا (به‌ویژه گیاهان و آبزیان آلوده)، تماس پوستی و استنشاق گرد و غبار در معرض فلزات سنگین قرار می‌گیرند (Abdullah, 2024; Sharafi & Salehi, 2025). مواجهه طولانی‌مدت با فلزات سنگین می‌تواند منجر به آسیب‌های عصبی، اختلالات کلیوی، سرطان، مشکلات قلبی-عروقی و اختلالات رشد شود (Ahmed et al., 2025). به‌طور خاص، برخی فلزات مانند کادمیوم و کروم در برخی شرایط به‌عنوان عامل‌های سرطان‌زا یا سرطان‌زای محتمل شناخته شده‌اند که اهمیت ارزیابی ریسک انسانی را بیش از پیش افزایش می‌دهد (Faraji et al., 2023).

عراق به عنوان یکی از بزرگ‌ترین تولیدکنندگان نفت، با خطرات قابل‌توجهی از آلودگی‌های نفتی و فلزات سنگین روبرو است. فاضلاب حاصل از فعالیت‌های پالایشگاهی منبع اصلی آلودگی محیط زیست است که باعث تخریب و تغییر خواص فیزیکی و شیمیایی اکوسیستم‌ها می‌شود (Rahi et al., 2021; Atiyah et al., 2025). پالایشگاه بایجی یکی از بزرگ‌ترین پالایشگاه‌های عراق است که تقریباً در ۲۱۰ کیلومتری شمال بغداد در استان صلاح‌الدین واقع شده و نقش کلیدی در تأمین فرآورده‌های نفتی این کشور

دارد. تا سال ۲۰۲۴، ظرفیت تولید این پالایشگاه تقریباً ۲۵۰،۰۰۰ بشکه در روز بوده است (Ahmed et al., 2025). این تولید بالا، مقادیر قابل توجهی فاضلاب صنعتی تولید می‌کند که به واحدهای تصفیه آب پالایشگاه هدایت می‌شوند. با این حال، فاضلاب صنعتی تخلیه‌شده حاوی آلاینده‌های خطرناک مختلفی است که کیفیت آب و خاک اطراف را کاهش می‌دهد و بر زندگی آبیان، اقتصاد و سلامت انسان تأثیر می‌گذارد (Atiyah et al., 2025; Numaan et al., 2024).

بررسی پیشینه پژوهش در پالایشگاه نفت بایجی عراق نشان می‌دهد که مطالعات پیشین عمدتاً به اندازه‌گیری غلظت فلزات سنگین در منطقه بایجی پرداخته‌اند و هیچ تحقیق جامعی تاکنون به ارزیابی فلزات سنگین در خاک در نزدیکی مسیر تخلیه پساب از خروجی پالایشگاه تا رودخانه دجله نپرداخته است. همچنین، استفاده از شاخص‌های آلودگی در مطالعات موجود بسیار محدود بوده و صرفاً به شاخص‌های ساده‌ای مانند فاکتور آلودگی (CF) و شاخص بار آلودگی (PLI)^۲ بسنده شده است، در حالی که مجموعه کاملی از شاخص‌های مکمل شامل درجه آلودگی (C_{deg})^۳، شاخص خطر اکولوژیکی بالقوه (PERI)^۴، شاخص انباشت جغرافیایی (I_{geo})^۵، ارزیابی قرار گرفتن در معرض (ADD)^۶، ضریب خطر (HQ)^۷، شاخص خطر کل (HI)^۸ و خطر اضافی سرطان در طول زندگی (ELCR)^۹ تاکنون در این منطقه به کار گرفته نشده است. عدم بررسی سیستماتیک همبستگی آلاینده‌ها با ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک از مهم‌ترین کاستی‌های تحقیقات پیشین محسوب می‌شود (Abdullah, 2024; Ahmed et al., 2025). بنابراین، ضرورت انجام پژوهشی جامع با رویکرد استفاده از مجموعه کامل شاخص‌های آلودگی، برآورد دقیق ریسک اکولوژیک و سلامت انسان، شناسایی نقاط بحرانی در نزدیکی مسیر تخلیه پساب و بررسی تأثیر ویژگی‌های خاک بر توزیع آلاینده‌ها، بیش از پیش احساس می‌شود. چنین پژوهشی نه تنها برای شناسایی مناطق پرخطر و اولویت‌بندی اقدامات کنترلی ضروری است، بلکه می‌تواند مبنای علمی مناسبی برای تصمیم‌گیری‌های مدیریتی، اصلاح سیستم‌های تصفیه و تدوین سیاست‌های حفاظت از محیط‌زیست در اطراف پالایشگاه بایجی فراهم آورد.

مواد و روش‌ها

نمونه‌برداری

پالایشگاه بایجی یکی از بزرگ‌ترین پالایشگاه‌های عراق است که در مختصات جغرافیایی حدود ۳۵ درجه و ۰ دقیقه عرض شمالی و ۴۳ درجه و ۳۰ دقیقه طول شرقی، در پنج کیلومتری شمال شهر بایجی و حدود ۲۱۰ کیلومتری شمال بغداد واقع شده است (Ahmed et al., 2025). این پالایشگاه با چالش‌هایی از جمله نشت مکرر نفت و تخلیه فاضلاب صنعتی مواجه است که منجر به آلودگی خاک و خطرات زیست‌محیطی می‌شود (Grmasa et al., 2023; Atiyah et al., 2025). در این پژوهش، تعداد ۱۵ نقطه نمونه‌برداری به صورت سیستماتیک-هدفمند در راستای مسیر حدود ۵ کیلومتری تخلیه فاضلاب تصفیه‌شده پالایشگاه تا ابتدای رودخانه دجله انتخاب

^۱Contamination Factor

^۲Pollution Load Index

^۳Contamination Degree

^۴Potential Ecological Risk Index

^۵Geoaccumulation Index

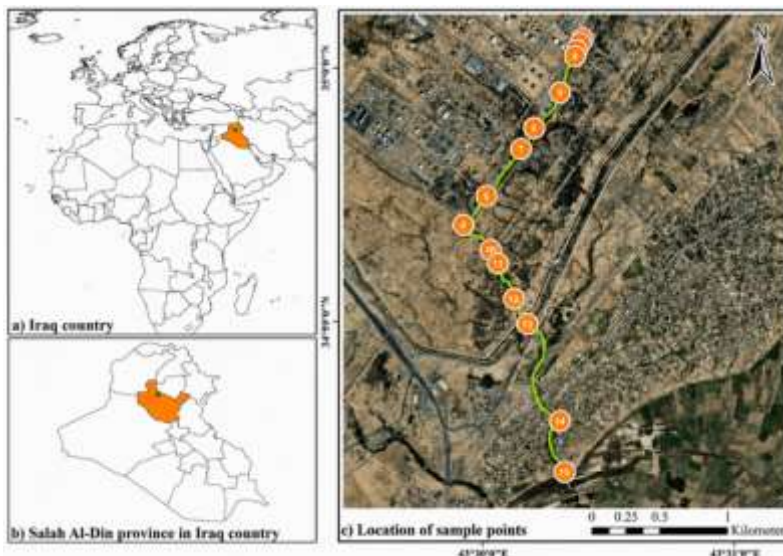
^۶Average Daily Dose

^۷Hazard Quotient

^۸Hazard Index

^۹Excess Lifetime Cancer Risk

گردید. از هر نقطه، یک نمونه خاک (با سه تکرار) از عمق ۲۰-۰ سانتی متری سطح زمین در اوایل بهمن ماه سال ۱۴۰۴ برداشت شد. موقعیت مکانی هر نقطه با استفاده از دستگاه GPS ثبت گردید (شکل ۱).



شکل ۱. موقعیت نقاط نمونه برداری در اطراف پالایشگاه نفت بایجی عراق

آماده سازی نمونه ها و تعیین ویژگی های خاک

نمونه های خاک بلافاصله پس از انتقال به آزمایشگاه، در دمای اتاق و دور از نور مستقیم خورشید به مدت ۲-۳ روز هوا خشک شدند. نمونه ها پس از پودر شدن از الک ۲ میلی متر عبور داده شدند تا ذرات درشت و بقایای گیاهی حذف گردند. ویژگی های فیزیکوشیمیایی خاک شامل بافت (به روش هیدرومتری)، هدایت الکتریکی عصاره اشباع (با هدایت سنج مدل Jenway-4510)، pH با (pH متر مدل PHM-2000) و درصد ماده آلی (به روش والکی-بلک) مطابق با روش های استاندارد تعیین شدند (Weaver, 2008).

استخراج و آنالیز فلزات سنگین در خاک

برای آنالیز فلزات سنگین، ۰/۵ گرم از خاک الک شده به ظرف هضم تفلونی منتقل و ۱۰ میلی لیتر اسید نیتریک غلیظ به آن اضافه شد. نمونه ها در دستگاه مایکروویو هضم کننده بر اساس روش استاندارد EPA 3051A در دمای ۱۷۵ درجه سانتی گراد به مدت ۱۰ دقیقه قرار داده شدند (USEPA, 2007). پس از هضم، نمونه ها خنک شده و از صافی سرنگ ۰/۲۲ میکرومتر عبور داده شدند و محلول نهایی در یخچال با دمای ۴ درجه سانتی گراد تا زمان آنالیز نگهداری گردید (Weaver, 2008). اندازه گیری غلظت هشت فلز سنگین (نیکل، کروم، سرب، کادمیوم، آرسنیک، روی، مس و جیوه) با استفاده از دستگاه طیف سنج جرمی پلاسمای جفت شده القایی (ICP-MS) مطابق با روش استاندارد EPA 6020B انجام شد. برای اصلاح اثرات ماتریکس پیچیده خاک و تغییرات سیگنال دستگاه، از استانداردهای داخلی استفاده شد و منحنی کالیبراسیون با استفاده از استانداردهای فلزات در غلظت های مختلف (۱، ۱۰، ۵۰، ۱۰۰ و ۵۰۰ میکروگرم بر لیتر) تهیه گردید (USEPA, 2014).

ارزیابی آلودگی و خطرات

فاکتور آلودگی (CF)

CF برای ارزیابی غنی‌سازی فلزات سنگین در خاک مورد استفاده قرار می‌گیرد. این فاکتور در ابتدا توسط Hakanson (1980) برای ارزیابی سطوح فلزات سنگین در رسوبات در ارتباط با مقادیر زمینه آنها استفاده شد. CF برای هر فلز با استفاده از رابطه (۱) تعیین شد:

$$CF = \frac{C_n}{B_v} \quad \text{رابطه (۱)}$$

C_n (mg/kg) غلظت فلزات سنگین در نمونه خاک و B_v (mg/kg) مقدار پس‌زمینه فلزات سنگین در پوسته زمین می‌باشد. مقادیر پس‌زمینه و ضریب پاسخ سمیت در جدول (۱) و شاخص‌های آلودگی و طبقه‌بندی آنها در جدول (۲) آمده است.

جدول ۱. مقادیر پس‌زمینه (B_v) و ضریب پاسخ سمیت (T_r)

فلز	مقدار زمینه (B_v) (mg/kg)	ضریب پاسخ سمیت (T_r)
نیکل	۱۵۰ ^a	۵ ^c
کروم	۲۰۰ ^a	۳ ^c
سرب	۱۴ ^a	۵ ^c
کادمیوم	۰/۲۵ ^a	۳۰ ^c
آرسنیک	۵/۵ ^a	۱۰ ^c
روی	۱۵۰ ^a	۱ ^c
مس	۴۵ ^a	۵ ^c
جیوه	۰/۰۵ ^b	۴۰ ^c

a: (Abed et al., 2015), b: (Turekian & Wedepohl, 1961), c: (Hakanson, 1980)

جدول ۲. شاخص‌های آلودگی و طبقه‌بندی آنها

شدت آلودگی	PERI ^a	PLI ^b	C_{deg} ^a	CF ^a
کم	$RI < 150$	$PLI < 1$	$C_{deg} < 8$	$CF < 1$
متوسط	$150 \leq RI < 300$	$1 \leq PLI < 2$	$8 \leq C_{deg} < 16$	$1 \leq CF < 3$
قابل توجه	$300 \leq RI < 600$	$2 \leq PLI < 3$	$16 \leq C_{deg} < 32$	$3 \leq CF < 6$
بسیار زیاد	$RI \geq 600$	$PLI \geq 3$	$C_{deg} \geq 32$	$CF \geq 6$

a: (Hakanson, 1980), b: (Tomlinson et al., 1980)

درجه آلودگی (C_{deg})

C_{deg} برای تعیین سطح آلودگی در هر ایستگاه نمونه‌برداری مورد استفاده قرار گرفت (Hakanson, 1980). همان‌طور که در رابطه (۲) آمده است، با جمع کردن فاکتورهای آلودگی همه فلزات سنگین به‌دست آمد، که در آن n تعداد فلزات سنگین تحلیل شده است.

$$C_{deg} = \sum_{i=1}^n CF \quad \text{رابطه (۲)}$$

شاخص بار آلودگی (PLI)

PLI برای ارزیابی کلی آلودگی یک منطقه با در نظر گرفتن همه فلزات استفاده می‌شود. بنابراین از رابطه (۳) استفاده شد، که در آن n تعداد فلزات سنگین در نظر گرفته شده است (Tomlinson et al., 1980).

$$PLI = (CF_1 \times CF_2 \times CF_3 \times \dots \times CF_n)^{1/n} \quad \text{رابطه (۳)}$$

شاخص خطر اکولوژیکی بالقوه (PERI)

PERI برای ارزیابی خطر اکولوژیکی فلزات سنگین در خاک استفاده می‌شود، که می‌توان آن را با استفاده از رابطه (۴) تعیین کرد:

$$PERI = \sum_{i=1}^n E_r^i = \sum_{i=1}^n T_r^i \times CF \quad \text{رابطه (۴)}$$

CF فاکتور آلودگی، n تعداد فلزات سنگین، E_r و T_r به‌ترتیب عامل خطر اکولوژیکی بالقوه و فاکتور پاسخ سمیت هستند.

شاخص انباشت جغرافیایی (I_{geo})

این شاخص برای اولین بار توسط مولر پیشنهاد شد و به طور گسترده برای اندازه‌گیری میزان آلودگی فلزات سنگین در خاک استفاده می‌شود. مقدار بالاتر I_{geo} نشان‌دهنده ناخالصی شدیدتر در منطقه مورد مطالعه است. شاخص انباشتگی خاک، ابزاری برای سنجش

میزان تأثیر فعالیت‌های انسانی بر آلودگی خاک است. این شاخص با حذف اثر نوسانات طبیعی غلظت آلاینده‌ها (پس‌زمینه محیطی)، تخمین واقع‌گرایانه‌تری از آلودگی ناشی از فعالیت انسان ارائه می‌دهد. طبقه‌بندی شاخص انباشت جغرافیایی در جدول (۳) آمده است. I_{geo} بر اساس رابطه (۵) محاسبه می‌شود (Muller, 1969):

$$I_{geo} = \log_2 \left(\frac{C_n}{1.5B_v} \right)$$

رابطه (۵)

جایی که C_n (mg/kg) نشان‌دهنده غلظت فلزات در خاک‌های منطقه مورد مطالعه و B_v (mg/kg) محتوای پس‌زمینه فلز می‌باشد. برای محاسبه نوسانات احتمالی در مقادیر پس‌زمینه، از ثابت ۱/۵ استفاده شد.

جدول ۳. طبقه‌بندی شاخص انباشت جغرافیایی (I_{geo})

کلاس	شدت آلودگی	I_{geo}
۱	غیر آلوده	$I_{geo} \leq 0$
۲	غیر آلوده تا کمی آلوده	$0 < I_{geo} \leq 1$
۳	آلودگی متوسط	$1 < I_{geo} \leq 2$
۴	آلودگی متوسط تا شدید	$2 < I_{geo} \leq 3$
۵	آلودگی شدید	$3 < I_{geo} \leq 4$
۶	آلودگی شدید تا بسیار شدید	$4 < I_{geo} \leq 5$
۷	آلودگی بسیار شدید	$I_{geo} > 5$

ارزیابی قرار گرفتن در معرض (ADD)

برای بررسی میانگین دوز روزانه از طریق مسیرهای مختلف مواجهه با فلزات سنگین در خاک، یعنی بلع، پوست و استنشاق، از روابط (۶) تا (۸) استفاده شد (Nisbet & LaGoy, 1992). جدول (۴) پارامترها و مقادیر مربوطه برای محاسبه ADD را نشان می‌دهد.

$$ADD_{ingest} = \frac{C_s \times IR_{ing} \times EF \times ED \times CF}{BW \times AT} \quad \text{رابطه (۶)}$$

$$ADD_{dermal} = \frac{C_s \times SA \times AF \times ABS \times EF \times ED \times CF}{BW \times AT} \quad \text{رابطه (۷)}$$

$$ADD_{inhale} = \frac{C_s \times IR_{air} \times EF \times ED}{BW \times AT \times PEF} \quad \text{رابطه (۸)}$$

ADD_{ingest} : میانگین دوز روزانه از طریق بلع (mg/kg/d)، C_s : غلظت فلز در خاک (mg/kg)، IR_{ing} : میزان بلع (mg/day)، EF : دفعات مواجهه (days/year)، ED : مدت مواجهه (year)، CF : ضریب تبدیل (kg/mg)، BW : وزن بدن (kg)، AT : میانگین زمان مواجهه (day)، ADD_{dermal} : میانگین دوز روزانه از طریق تماس پوستی (mg/kg/d)، SA : سطح پوست در تماس (cm²/day)، AF : ضریب چسبندگی پوستی (mg/cm²)، ABS : کسر جذب پوستی (بدون واحد)، ADD_{inhale} : میانگین دوز روزانه از طریق استنشاق (mg/kg/d)، IR_{air} : نرخ استنشاق هوا (m³/day) و PEF : فاکتور انتشار ذرات (m³/kg).

جدول ۴. راهنمای پارامترهای معادلات مقادیر جذب روزانه^a

پارامتر	بزرگسالان	کودکان
IR_{ing}	۱۰۰	۲۰۰
IR_{air}	۲۰	۷/۶۳
EF	۳۵۰	۳۵۰
ED	۳۰	۶
BW	۷۰	۱۵
AT (غیر سرطان‌زایی)	$ED \times ۳۶۵$	$ED \times ۳۶۵$
AT (سرطان‌زایی)	۷۰×۳۶۵	۷۰×۳۶۵
PEF	$۱/۳۶ \times ۱۰^۹$	$۱/۳۶ \times ۱۰^۹$
SA	۵۷۰۰	۲۸۰۰

۰/۲	۰/۲	AF
۰/۰۱	۰/۰۱	ABS
۶-۱۰	۶-۱۰	CF

a: (Aguilera et al., 2021)

شاخص خطر کل (HI)

شاخص ضریب خطر (HQ) از طریق رابطه (۹) و شاخص خطر کل (HI) از طریق رابطه (۱۰) محاسبه می‌شود (Nisbet & LaGoy, 1992):

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

$$HI = \sum HQ$$

رابطه ۹

رابطه ۱۰

RfD دوز مرجع است (mg/kg/day) و به عنوان برآوردی از میزان مواجهه روزانه انسان با فلزات سنگین در مسیرهای مختلف در معرض تماس در نظر گرفته می‌شود که مقادیر مربوط به آن در جدول (۵) آمده است.

جدول ۵. راهنمای مقادیر RfD بر حسب (mg/kg/day)

منبع	RfD _{ing}	RfD _{derm}	RfD _{inh}	فلز
USEPA, 1998b	$2/00 \times 10^{-2}$	$5/40 \times 10^{-3}$	$2/40 \times 10^{-5}$	نیکل
USEPA, 1998a	$3/00 \times 10^{-3}$	$7/50 \times 10^{-5}$	$2/86 \times 10^{-6}$	کروم
USEPA, 2005a	$3/50 \times 10^{-3}$	$5/25 \times 10^{-3}$	$3/50 \times 10^{-3}$	سرب
USEPA, 1999	$1/00 \times 10^{-3}$	$1/00 \times 10^{-3}$	$1/00 \times 10^{-5}$	کادمیوم
USEPA, 2025	$6/00 \times 10^{-5}$	$1/22 \times 10^{-4}$	$3/00 \times 10^{-5}$	آرسنیک
USEPA, 2005b	$3/00 \times 10^{-1}$	$6/00 \times 10^{-2}$	$3/00 \times 10^{-1}$	روی
(Taylor et al., 2023)	$4/00 \times 10^{-2}$	$1/20 \times 10^{-2}$	—	مس
USEPA, 1995	$3/00 \times 10^{-4}$	$2/10 \times 10^{-4}$	$8/60 \times 10^{-6}$	جیوه

خطر اضافی سرطان در طول زندگی (ELCR)

پس از محاسبه مقادیر ADD در هر یک از مسیرهای سه‌گانه، برای تمام فلزات سرطان‌زا (آرسنیک، کادمیوم، کروم و نیکل)، ELCR از طریق رابطه (۱۱) محاسبه شد (Muhammad et al., 2010; Uyanik, 2023):

$$ELCR = ADD \times CSF$$

رابطه ۱۱

جایی که CSF (mg/kg/day) فاکتور شیب سرطان است (Muhammad et al., 2010; Jang et al., 2023; Rim, 2023; Thompson et al., 2023). مقادیر CSF برای محاسبه ELCR در جدول (۶) آمده است (USEPA, 2024; USEPA, 2025). مقادیر ELCR به سه رده تقسیم می‌شوند که در جدول (۷) آمده است.

جدول ۶. راهنمای مقادیر CSF بر حسب (mg/kg/day)

عناصر	مسیر مواجهه	CSF
آرسنیک	بلع	۳۲
آرسنیک	استنشاق	۱۵/۱۰
کادمیوم	استنشاق	۶/۳۰
کروم	بلع	۱۶

کروم	استنشاق	۴۲/۰۰
سرب	بلع	۰/۰۰۸۵
نیکل	استنشاق	۰/۸۴

جدول ۷. طبقه‌بندی ELCR

وضعیت	سطح خطر	ELCR
قابل قبول	کم	$ELCR < 1 \times 10^{-6}$
در محدوده قابل قبول	متوسط	$1 \times 10^{-6} \leq ELCR < 1 \times 10^{-3}$
غیرقابل قبول	بالا	$ELCR \geq 1 \times 10^{-3}$

تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها

در این پژوهش، تمام آزمایش‌ها در سه تکرار انجام شد. به منظور بررسی روابط بین متغیرها، ابتدا نرمال بودن توزیع داده‌ها با استفاده از آزمون شاپیرو-ویلک در سطح معنی‌داری ۰/۰۵ مورد سنجش قرار گرفت (Shapiro & Wilk, 1965). به دلیل نرمال بودن توزیع داده‌ها، از آزمون همبستگی پیرسون برای بررسی روابط خطی بین ویژگی‌های خاک و غلظت فلزات سنگین استفاده شد (Pallant, 2020). شاخص‌های آمار توصیفی شامل میانگین، انحراف معیار، حداقل، حداکثر و ضریب تغییرات (CV) برای هر یک از فلزات سنگین محاسبه گردید (Zar, 2010). تحلیل‌های آماری با استفاده از نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۶ انجام شد و رسم نمودارها با نرم‌افزار Excel 2023 صورت گرفت. برای تهیه نقشه پراکندگی نقاط از نرم‌افزار ArcGIS 10.8 استفاده شد.

یافته‌های پژوهش و بحث

میانگین غلظت فلزات سنگین در خاک

نتایج آنالیز فلزات سنگین در ۱۵ نقطه نمونه‌برداری خاک در جدول (۸) آمده است. بیشترین غلظت نیکل، کروم و مس در نقطه ۹، بیشترین غلظت سرب و کادمیوم در نقطه ۶، بیشترین غلظت آرسنیک در نقطه ۱۴، بیشترین غلظت روی در نقاط ۶ و ۹ و بیشترین غلظت جیوه در نقاط ۹ و ۱۵ مشاهده گردید. شاخص‌های آمار توصیفی نشان داد که بالاترین ضریب تغییرات مربوط به مس (۲۳/۳٪) و روی (۲۰/۷٪) است که بیانگر پراکندگی مکانی بیشتر این دو فلز در اثر منابع موضعی آلودگی می‌باشد. در مقابل، کمترین ضریب تغییرات مربوط به کادمیوم (۷/۴٪) است که نشان‌دهنده توزیع نسبتاً یکنواخت این فلز در تمام نقاط نمونه‌برداری می‌باشد. نتایج نشان داد نیکل و کروم با بالاترین میانگین، از مهم‌ترین عناصر موجود در خاک‌های پیرامون پالایشگاه بایچی هستند. مطالعات متعددی بیان کرده‌اند که این دو عنصر در اثر نشت نفت، احتراق سوخت و فعالیت‌های پالایشگاهی وارد خاک می‌شوند (Kabata-Pendias, 2011; Alloway, 2013). توزیع مکانی فلزات نشان داد که نقاط ۶، ۹، ۱۴ و ۱۵ دارای غلظت بالاتری نسبت به سایر نقاط هستند. چنین الگویی معمولاً در مناطق صنعتی و پالایشگاهی مشاهده می‌شود و بیانگر وجود منابع موضعی آلودگی، رسوب ذرات معلق صنعتی و انتقال آلاینده‌ها توسط رواناب‌های سطحی می‌باشد (Wei & Yang, 2010).

جدول ۸. تغییرات غلظت فلزات سنگین در نقاط نمونه‌برداری

عنصر (mg/kg)	نیکل	کروم	سرب	کادمیوم	آرسنیک	روی	مس	جیوه
نقطه								
۱	۱۱۰	۱۴۰	۱۴	۰/۲۵	۵	۸۰	۲۵	۰/۰۸
۲	۱۰۵	۱۲۵	۱۵	۰/۳۰	۵/۲	۸۰	۲۸	۰/۰۹
۳	۹۵	۱۲۵	۱۳	۰/۳۰	۴	۷۰	۳۰	۰/۰۶
۴	۱۳۰	۱۵۰	۱۶	۰/۳۰	۴/۵	۱۰۰	۴۰	۰/۱۰
۵	۱۲۵	۱۴۵	۱۵	۰/۳۳	۵/۸	۱۱۰	۵۰	۰/۱۱

۰/۱۲	۵۵	۱۳۰	۶	۰/۳۵	۱۸	۱۶۰	۱۳۰	۶
۰/۱۰	۴۸	۱۰۵	۴/۸	۰/۳۰	۱۴	۱۴۰	۱۱۵	۷
۰/۰۸	۴۰	۹۰	۴/۲	۰/۳۰	۱۴	۱۳۸	۱۰۸	۸
۰/۱۳	۶۰	۱۳۰	۶	۰/۳۳	۱۷	۱۷۰	۱۴۰	۹
۰/۰۷	۳۳	۷۰	۴/۸	۰/۳۳	۱۳	۱۳۰	۱۰۰	۱۰
۰/۰۹	۴۳	۹۰	۴/۵	۰/۳۰	۱۵	۱۴۳	۱۱۳	۱۱
۰/۱۰	۴۴	۹۸	۴/۶	۰/۳۰	۱۶	۱۴۵	۱۱۵	۱۲
۰/۰۸	۳۶	۸۰	۴/۹	۰/۳۴	۱۳	۱۳۵	۱۰۵	۱۳
۰/۱۲	۵۸	۱۲۵	۶/۲	۰/۳۱	۱۶	۱۶۵	۱۳۵	۱۴
۰/۱۳	۵۹	۱۲۸	۶/۱	۰/۳۳	۱۷	۱۶۸	۱۳۸	۱۵
۰/۰۹۸	۴۴/۶	۹۸/۴	۵/۱	۰/۳۱	۱۵/۱	۱۴۸/۱	۱۱۸/۸	میانگین
۰/۰۲۰	۱۰/۴	۲۰/۴	۰/۷	۰/۰۲	۱/۶	۱۴/۲	۱۳/۹	انحراف معیار
۰/۰۶	۲۵	۷۰	۴	۰/۲۵	۱۳	۱۲۵	۹۵	حداقل
۰/۱۳	۶۰	۱۳۰	۶/۲	۰/۳۵	۱۸	۱۷۰	۱۴۰	حداکثر
۲۰/۴	۲۳/۳	۲۰/۷	۱۳/۹	۷/۴	۱۰/۶	۹/۶	۱۱/۷	ضریب تغییرات (%)

تأثیر ویژگی‌های خاک بر غلظت فلزات سنگین

با بررسی آزمون پیرسون (جدول ۹) مشخص شد که ماده آلی و درصد رس به عنوان مهم‌ترین عوامل کنترل‌کننده، همبستگی مثبت و معنی‌داری با نیکل، کروم، مس، روی و آرسنیک نشان دادند. این یافته حاکی از آن است که افزایش ماده آلی و رس در خاک، به دلیل بالا بردن ظرفیت تبادل کاتیونی و ایجاد سطوح جذب بیشتر، منجر به انباشت این فلزات در خاک می‌شود. پارامتر EC دارای اثر دوگانه بود. از یک سو با نیکل، کروم، روی و مس همبستگی منفی و معنی‌دار داشت که نشان‌دهنده کاهش جذب این فلزات در شرایط شوری بالاست. از سوی دیگر، با سرب و کادمیوم همبستگی مثبت و معنی‌دار داشت که بیانگر منشأ مشترک انسان‌زاد این دو فلز با مناطق دارای شوری بالا می‌باشد. پارامتر pH هیچ همبستگی معنی‌داری با هیچ یک از فلزات سنگین نشان نداد ($p > 0.05$). مطالعات مختلف نشان دادند که فعالیت‌های صنعتی مهم‌ترین عامل تغییر در خصوصیات خاک و تجمع فلزات سنگین می‌باشند (Khaleel & Khwedim, 2024; Elbagory et al., 2025). در مطالعه Wang et al., (2023) بر روی خاک‌های آلوده به فعالیت‌های پالایشگاهی در چین مشخص شد که ماده آلی با تشکیل کمپلکس‌های آلی-فلزی پایدار، نقش کلیدی در تثبیت فلزات سنگین در ماتریس خاک ایفا می‌کند. در مورد نقش رس، Zhang et al., (2025) در یک متاآنالیز جامع نشان دادند که رس‌های اصلاح‌شده از طریق مکانیسم‌های تبادل یونی، جذب سطحی و کمپلکس‌شدگی، قابلیت تثبیت فلزات سنگین را به طور قابل توجهی افزایش می‌دهند. Liu et al., (2025) نیز در مطالعه‌ای بر روی ۳۰۰ نمونه خاک در چین نشان دادند که رس موجود در خاک‌های سطحی به طور مؤثری فلزات سنگین را جذب و از مهاجرت آنها جلوگیری می‌کند.

جدول ۹. ضرایب همبستگی پیرسون جهت بررسی همبستگی بین ویژگی‌های خاک و غلظت فلزات سنگین

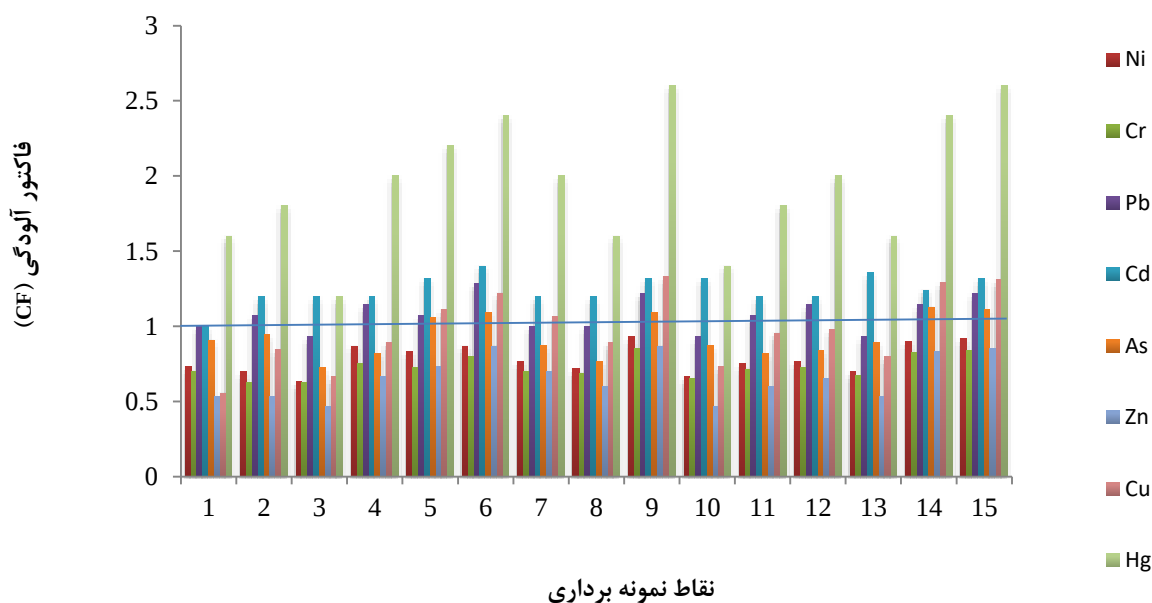
Hg	Cu	Zn	As	Cd	Pb	Cr	Ni	Clay	EC	OM	pH	
											۱	pH
										۱	۰/۱۳	OM
									۱	-۰/۴۴	۰/۰۹	EC
								۱	-۰/۳۲	۰/۶۰*	۰/۲۱	Clay
							۱	۰/۷۶**	-۰/۶۹**	۰/۷۸**	۰/۱۸	Ni
						۱	۰/۷۹**	۰/۷۲**	-۰/۶۵**	۰/۷۵**	۰/۰۱	Cr
					۱	۰/۲۹	۰/۳۲	۰/۳۸	۰/۶۸**	۰/۴۳	۰/۱۵	Pb
				۱	۰/۸۳**	۰/۳۱	۰/۲۸	۰/۳۳	۰/۵۸*	۰/۳۹	۰/۰۷	Cd
			۱	۰/۳۹	۰/۴۲	۰/۱۸	۰/۱۵	۰/۵۴*	-۰/۳۲	۰/۶۴*	۰/۰۱	As

		۱	۰/۲۱	۰/۳۳	۰/۳۵	۰/۷۲**	۰/۷۶**	۰/۶۵**	۰/۵۵*	۰/۶۹**	۰/۱۳	Zn
	۱	۰/۷۹**	۰/۲۷	۰/۴۱	۰/۴۴	۰/۸۱**	۰/۸۴**	۰/۷۹**	۰/۶۷**	۰/۸۱**	۰/۰۷	Cu
۱	۰/۴۶	۰/۴۴	۰/۵۲	۰/۳۷	۰/۳۹	۰/۳۸	۰/۴۱	۰/۵۵*	۰/۴۴	۰/۶۰*	۰/۰۹	Hg

** رابطه معنی‌دار در سطح ۰/۰۱، * رابطه معنی‌دار در سطح ۰/۰۵، اعداد بدون ستاره: همبستگی معنی‌دار نیست.

شاخص‌های آلودگی، اکولوژیکی و سلامت

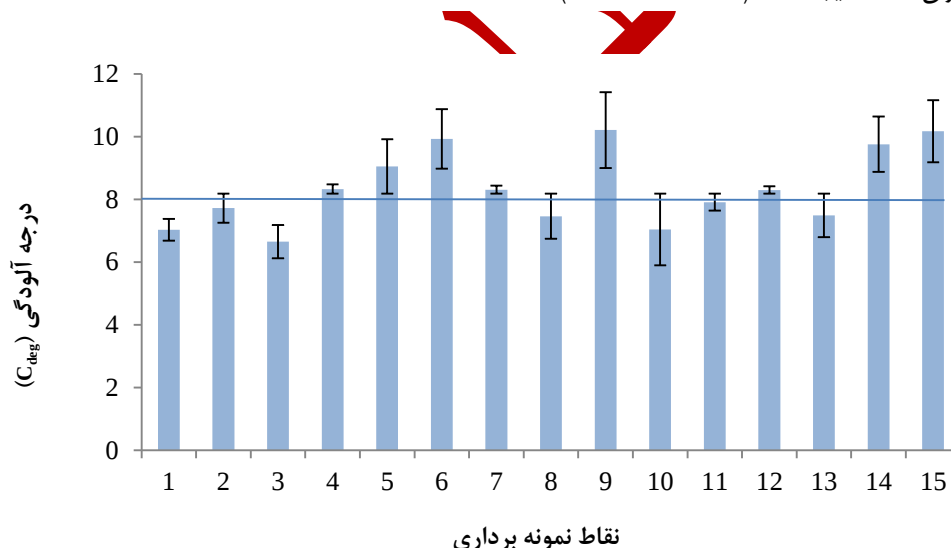
نتایج حاصل از محاسبه فاکتور آلودگی (CF) برای ۱۵ نقطه مورد مطالعه (شکل ۲) نشان می‌دهد فلزات نیکل، کروم و روی در تمام نقاط دارای آلودگی کم هستند که می‌تواند ناشی از غلظت زمینه نسبتاً بالای این عناصر در مقایسه با غلظت‌های اندازه‌گیری شده باشد. فلزات سرب، کادمیوم، آرسنیک و جیوه الگوی آلودگی متوسط را در اکثر نقاط نشان می‌دهند که بیانگر تأثیر فعالیت‌های انسان‌زاد در منطقه مورد مطالعه می‌باشد. مطالعات متعددی منشأ این فلزات را فعالیت‌های صنعتی، ترافیک و تخلیه پسماندها معرفی کرده‌اند (Islam et al., 2024; Malvandi et al., 2024; Soodmand et al., 2025). جیوه با حداکثر CF معادل ۲/۶ بالاترین سطح آلودگی را در بین فلزات مورد مطالعه دارد که نیازمند توجه ویژه در برنامه‌های پایش زیست‌محیطی می‌باشد. کادمیوم نیز با CF بالای ۱ در تمام نقاط، الگوی آلودگی یکنواخت و گسترده‌ای در منطقه نشان می‌دهد که با ماهیت سمیت بالا و پتانسیل خطر اکولوژیکی این فلز همخوانی دارد (Islam et al., 2024; Malvandi et al., 2024). از آنجا که هیچ یک از فلزات مورد مطالعه به محدوده آلودگی قابل توجه ($CF \geq 3$) نرسیده‌اند، می‌توان نتیجه گرفت که منطقه مورد مطالعه در سطح آلودگی کم تا متوسط قرار دارد. با این حال، روند افزایشی CF برای برخی فلزات در نقاط ۹، ۱۴ و ۱۵ می‌تواند هشدار برای تشدید آلودگی در آینده باشد. پایش مستمر و شناسایی منابع دقیق آلاینده‌ها برای جلوگیری از پیشرفت آلودگی به سطوح بالاتر ضروری به نظر می‌رسد (Duodu et al., 2016).



شکل ۲. نمودار توزیع CF فلزات سنگین در نقاط مختلف خاک منطقه نمونه‌برداری

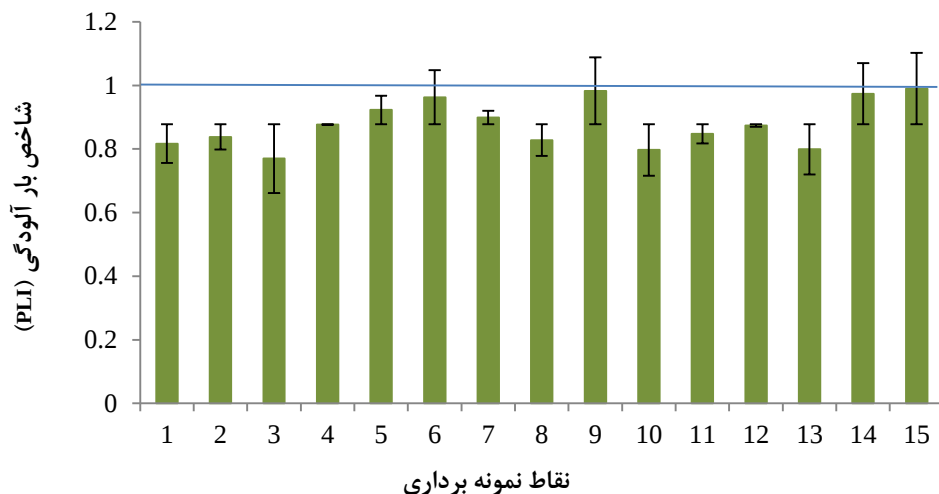
نتایج حاصل از محاسبه درجه آلودگی (C_{deg}) در ۱۵ نقطه (شکل ۳) نشان می‌دهد که ۸ نقطه در محدوده آلودگی کم ($C_{deg} < 8$) و ۷ نقطه در محدوده آلودگی متوسط ($8 \leq C_{deg} < 16$) قرار دارند. هیچ نقطه‌ای به سطوح آلودگی قابل توجه یا بسیار بالا نرسیده است.

در این زمینه، نتایج حاصل با یافته‌های تحقیقات پیشین بر روی خاک‌های منطقه‌ای از جنوب ایران (Mahdavi et al., 2018) همخوانی قابل توجهی دارد. شباهت آماری، بیانگر الگوهای آلودگی مشابه در برخی مناطق تحت تأثیر فعالیت‌های انسانی است. به استناد (Kowalska & Zaleski, 2020) مقادیر C_{deg} بالاتر از ۸ اغلب با حضور منابع آلاینده انسان‌ساخت نظیر فعالیت‌های صنعتی، کشاورزی فشرده و مناطق شهری مرتبط است. در پژوهش حاضر، نقاط دارای بالاترین C_{deg} (نقاط ۶، ۹، ۱۴ و ۱۵) احتمالاً در مجاورت چنین منابعی قرار دارند که شامل جاده‌های پرتردد (احتمال سرب بالا)، اراضی تحت کشاورزی با مصرف کودهای فسفاته (منبع کادمیوم)، واحدهای صنعتی کوچک (منابع جیوه و مس) و دفع نامناسب پسماندها می‌شود (Alloway, 2013). از سوی دیگر، عوامل هیدرولوژیکی و توپوگرافی نیز در توزیع مکانی آلودگی نقش دارند؛ به گونه‌ای که جریان آب‌های سطحی و زیرزمینی می‌تواند فلزات سنگین را از نواحی مرتفع به نقاط پایین‌دست منتقل کرده و در نقاطی مانند ۹ و ۱۵ تجمع دهد (Förstner & Wittmann, 1983). افزون بر این، ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک از جمله میزان ماده آلی و بافت خاک، تعیین‌کننده اصلی ظرفیت جذب و نگهداری فلزات سنگین هستند. نقاط با C_{deg} بالاتر دارای خاک‌های رسی با ماده آلی بیشتر می‌باشند که شرایط را برای انباشت فلزات تسهیل می‌کنند. از منظر پیامدهای زیست‌محیطی و سلامت، اگرچه محدوده C_{deg} در منطقه مورد مطالعه در طبقه کم تا متوسط قرار دارد، اما نباید از نظر دور داشت که اثرات تجمعی فلزات سنگین در طولانی مدت می‌تواند به افزایش تدریجی C_{deg} منجر شود. به ویژه فلزاتی همچون جیوه و کادمیوم، حتی در غلظت‌های پایین نیز دارای سمیت بالا بوده و قابلیت تجمع زیستی در زنجیره غذایی را دارا می‌باشند (Järup, 2003). بنابراین تماس طولانی‌مدت با خاک‌های دارای C_{deg} بین ۸ تا ۱۶ می‌تواند مخاطراتی برای سلامت ساکنان، کارگران و کشاورزان منطقه ایجاد کند (Tóth et al., 2016).



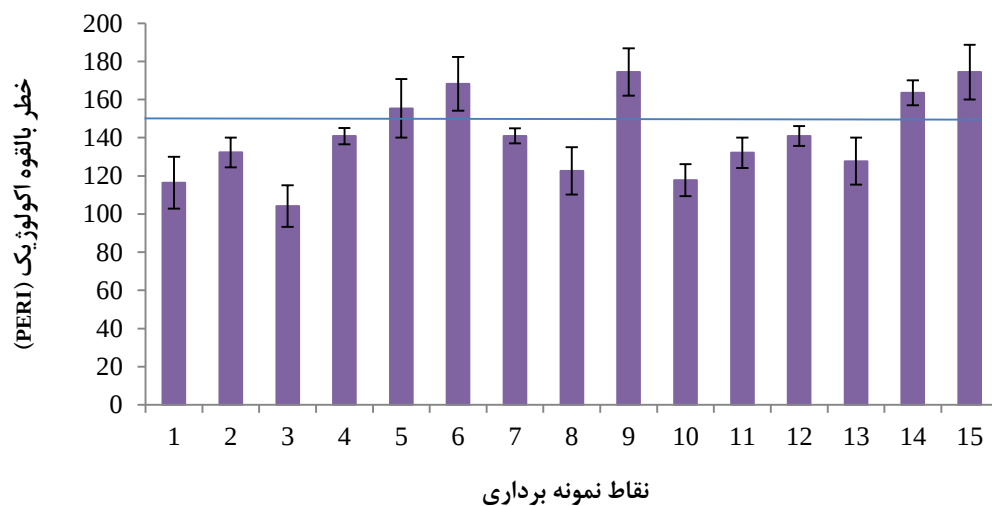
شکل ۳. نمودار توزیع C_{deg} فلزات سنگین در نقاط مختلف خاک منطقه نمونه‌برداری

نتایج حاصل از محاسبه شاخص بار آلودگی (PLI) در مطالعه حاضر (شکل ۴) نشان داد که مقادیر PLI برای تمامی ۱۵ نقطه نمونه‌برداری کمتر از ۱ بوده و پراکندگی نسبتاً کمی داشتند. نکته حائز اهمیت آنکه نقاط ۶، ۹، ۱۴ و ۱۵ بسیار به آستانه آلودگی متوسط ($PLI = 1$) نزدیک هستند. این نقاط در آستانه خروج از طبقه آلودگی کم و ورود به طبقه آلودگی متوسط قرار دارند. به استناد (Salazar-Rojas et al., 2023)، مناطقی با PLI بین ۰/۹ تا ۱ را باید مناطق در آستانه بحران در نظر گرفت. این مناطق اگرچه در طبقه آلودگی کم قرار دارند، اما کوچکترین افزایش در غلظت فلزات سنگین (به ویژه جیوه، کادمیوم و سرب که در این نقاط بیشترین مقادیر CF را داشتند) می‌تواند آنها را وارد طبقه آلودگی متوسط نماید. بنابراین، اجرای برنامه‌های پایش مستمر و اقدامات پیشگیرانه قبل از خروج این نقاط از طبقه آلودگی کم، امری ضروری می‌باشد.



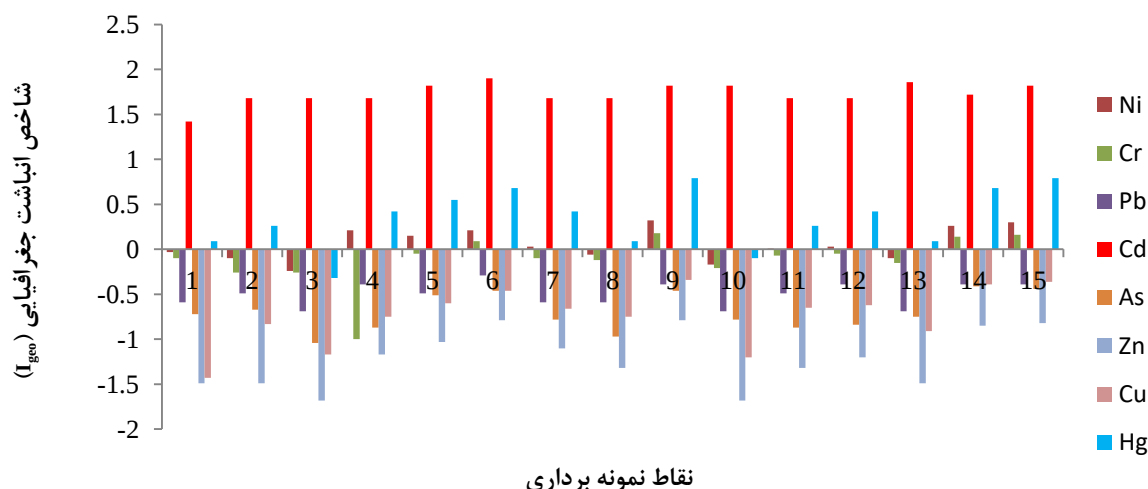
شکل ۴. نمودار توزیع PLI فلزات سنگین در نقاط مختلف خاک منطقه نمونه برداری

نتایج محاسبه شاخص خطر بالقوه اکولوژیک (PERI) نشان داد (شکل ۵) که مقادیر این شاخص در ۱۵ نقطه نمونه برداری در دامنه ۱۰۴/۱۴ تا ۱۷۴/۴۹ قرار داشته و میانگین آن ۱۴۰/۰۹ می باشد. بر اساس طبقه بندی استاندارد (Hakanson, 1980)، ۱۰ نقطه در رده خطر کم ($PERI < 150$) و ۵ نقطه شامل نقاط ۵، ۶، ۹، ۱۴ و ۱۵ در رده خطر متوسط ($150 \leq PERI < 300$) قرار گرفتند. یافته بسیار مهم این مطالعه، تسلط جیوه و کادمیوم در ایجاد خطر اکولوژیک منطقه است. با وجود آنکه فاکتور آلودگی جیوه و کادمیوم به ترتیب حداکثر ۲/۶ و ۱/۴ بود، بیش از ۸۲ درصد از کل PERI منطقه را به خود اختصاص دادند. این پدیده به دلیل ضریب پاسخ سمیت بالای جیوه ($T_r=40$) و کادمیوم ($T_r=30$) رخ می دهد که نشان می دهد سمیت ذاتی فلزات، به مراتب مهم تر از غلظت مطلق آنها در ارزیابی خطرات زیست محیطی نقش دارد (Järup, 2003; Tóth et al., 2016). در مقابل، فلزاتی مانند روی ($T_r=1$) و کروم ($T_r=2$) با وجود CFهای مشابه، سهم ناچیزی در PERI داشته که این موضوع ضرورت توجه ویژه به فلزات با ضریب سمیت بالا را آشکار می سازد. نقاط ۹ و ۱۵ به عنوان بحرانی ترین نقاط از نظر خطر اکولوژیک شناسایی شدند که با نتایج حاصل از سایر شاخص های آلودگی (C_{deg} و PLI) نیز مطابقت دارد و قابلیت اطمینان یافته ها را افزایش می دهد (Varol, 2011).



شکل ۵. نمودار توزیع PERI فلزات سنگین در نقاط مختلف خاک منطقه نمونه برداری

داده‌های شاخص انباشت جغرافیایی (I_{geo}) در شکل (۶) نشان می‌دهد که کادمیوم با میانگین $I_{geo} = 1/71$ در طبقه آلودگی متوسط قرار دارد. تمام ۱۵ نقطه دارای I_{geo} مثبت برای کادمیوم هستند که نشان‌دهنده آلودگی فراگیر و گسترده این فلز در کل منطقه می‌باشد. جیوه با میانگین $I_{geo} = 0/33$ در طبقه غیرآلوده تا متوسط قرار دارد، اما نقاط ۹ و ۱۵ با $I_{geo} = 0/79$ بسیار نزدیک به آستانه آلودگی متوسط ($I_{geo} > 1$) می‌باشند. نیکل با میانگین $I_{geo} = 0/03$ در محدوده غیرآلوده تا کمی آلوده قرار دارد. نقاط ۴، ۵، ۶، ۹، ۱۴ و ۱۵ دارای I_{geo} مثبت برای نیکل می‌باشند. فلزات کروم، سرب، آرسنیک، روی و مس میانگین I_{geo} منفی داشتند که نشان می‌دهد غلظت آنها در همه نقاط کمتر از مقدار زمینه است. شاخص انباشت جغرافیایی اثر تغییرات طبیعی بستر زمین را حذف کرده و تنها آلودگی انسان‌ساز را منعکس می‌سازد (Kowalska et al., 2018). یافته بسیار مهم در مورد این شاخص، آلودگی گسترده و فراگیر کادمیوم در تمام ۱۵ نقطه نمونه‌برداری است که نشان‌دهنده حضور یک یا چند منبع آلاینده انسان‌ساز در سطح منطقه می‌باشد (Alloway, 2013). کادمیوم به عنوان یکی از سمی‌ترین فلزات سنگین، عمدتاً از فعالیت‌های انسان‌زاد نظیر مصرف کودهای فسفاته در کشاورزی، فاضلاب‌های صنعتی و دفع نامناسب پسماندهای الکترونیکی وارد محیط می‌شود (Järup & Åkesson, 2009). نیمه‌عمر طولانی کادمیوم در بدن انسان (۱۰ تا ۳۰ سال) و تجمع آن در کلیه‌ها و استخوان‌ها، این فلز را به یک تهدید جدی برای سلامت ساکنان و کشاورزان منطقه تبدیل کرده است (Tóth et al., 2016). اگرچه هیچ یک از نقاط به طبقه آلودگی شدید ($I_{geo} > 3$) نرسیده‌اند، اما نزدیکی نقاط ۶ و ۱۳ به آستانه طبقه متوسط تا شدید ($I_{geo} > 2$) یک هشدار جدی محسوب می‌شود. بنابراین انجام مطالعات تکمیلی برای تعیین منشأ دقیق کادمیوم، پایش فصلی غلظت آن در خاک و محصولات کشاورزی و اعمال محدودیت در مصرف کودهای فسفاته و کنترل منابع صنعتی به عنوان اولویت‌های فوری مدیریت زیست‌محیطی منطقه توصیه می‌گردد (Chen et al., 2015).



شکل ۶. نمودار توزیع I_{geo} فلزات سنگین در نقاط مختلف خاک منطقه نمونه‌برداری

مقادیر ADD برای هر سه مسیر در جدول ۱۰ آمده است. برای هر دو گروه سنی، مسیر بلع بیشترین سهم را در ADD داشت. مسیر تماس پوستی سهم ناچیز و مسیر استنشاق کمترین سهم را دارا بود. مقادیر ADD برای کودکان به طور قابل توجهی (حدود ۳ تا ۱۰ برابر) بیشتر از بزرگسالان است که دلایل آن وزن بدن کمتر کودکان نسبت به بزرگسالان، نرخ بلع بیشتر کودکان نسبت به وزن بدن و تماس پوستی بیشتر در کودکان می‌باشد. برای هر دو گروه سنی کروم و نیکل بالاترین و جیوه و کادمیوم پایین‌ترین ADD را داشتند. نکته مهم اینجاست که غلظت پایین برابر با خطر کم نمی‌باشد. همان‌طور که در PERI بررسی شد، جیوه و کادمیوم به دلیل سمیت ذاتی بالا، حتی با ADD پایین نیز خطرناک هستند.

جدول ۱۰. نتایج ADD فلزات سنگین برای بزرگسالان و کودکان

فلز	ADD _{inh} بزرگسالان	ADD _{derm} بزرگسالان	ADD _{ing} بزرگسالان	ADD _{inh} کودکان	ADD _{derm} کودکان	ADD _{ing} کودکان
نیکل	$2/79 \times 10^{-11}$	$5/54 \times 10^{-7}$	$1/61 \times 10^{-4}$	$7/58 \times 10^{-11}$	$2/33 \times 10^{-7}$	$5/20 \times 10^{-4}$
کروم	$3/48 \times 10^{-11}$	$6/91 \times 10^{-7}$	$2/01 \times 10^{-4}$	$9/45 \times 10^{-11}$	$2/91 \times 10^{-7}$	$6/48 \times 10^{-4}$
سرب	$3/55 \times 10^{-12}$	$7/04 \times 10^{-8}$	$2/05 \times 10^{-5}$	$9/63 \times 10^{-12}$	$2/96 \times 10^{-8}$	$6/61 \times 10^{-5}$
کادمیوم	$7/28 \times 10^{-14}$	$1/44 \times 10^{-9}$	$4/20 \times 10^{-7}$	$1/98 \times 10^{-13}$	$6/09 \times 10^{-10}$	$1/36 \times 10^{-6}$
آرسنیک	$1/20 \times 10^{-12}$	$2/38 \times 10^{-8}$	$6/92 \times 10^{-6}$	$3/25 \times 10^{-12}$	$1/00 \times 10^{-8}$	$2/23 \times 10^{-5}$
روی	$2/31 \times 10^{-11}$	$4/59 \times 10^{-7}$	$1/33 \times 10^{-4}$	$6/37 \times 10^{-11}$	$1/93 \times 10^{-7}$	$4/30 \times 10^{-3}$
مس	$1/05 \times 10^{-11}$	$2/08 \times 10^{-7}$	$6/05 \times 10^{-5}$	$2/84 \times 10^{-11}$	$8/76 \times 10^{-8}$	$1/95 \times 10^{-4}$
منگنز	$2/30 \times 10^{-14}$	$4/57 \times 10^{-10}$	$1/33 \times 10^{-7}$	$6/25 \times 10^{-14}$	$1/92 \times 10^{-10}$	$4/29 \times 10^{-7}$

نتایج محاسبه شاخص خطر کل (HI) برای بزرگسالان (جدول ۱۱) نشان می‌دهد که مقادیر این شاخص در تمامی ۱۵ نقطه نمونه‌برداری در دامنه ۰/۱۴۸ تا ۰/۱۹۳ قرار دارد. بر اساس معیار استاندارد آژانس حفاظت محیط زیست ایالات متحده (USEPA, 2023)، مقادیر HI کمتر از ۱ بیانگر خطر غیر سرطان‌زایی قابل قبول بوده و نیاز به اقدام اصلاحی فوری ندارد. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که بزرگسالان ساکن در منطقه مورد مطالعه از نظر مواجهه با فلزات سنگین موجود در خاک در محدوده ایمن قرار دارند. در مقابل، نتایج برای کودکان (جدول ۱۰) به طور چشمگیری متفاوت و نگران‌کننده بود. مقادیر HI برای کودکان در دامنه ۱/۱۹۹ تا ۱/۵۵۵ قرار داشت که به مراتب از حد مجاز فراتر رفته است. به طور مشخص، تمامی ۱۵ نقطه نمونه‌برداری (۱۰۰ درصد) دارای HI بزرگتر از ۱ بوده و بنابراین در محدوده خطر غیر قابل قبول طبقه‌بندی می‌شوند. این یافته در مقایسه با مطالعات پیشین، نشان‌دهنده وضعیت هشداردهنده‌تری است و ضرورت بازنگری در اولویت‌بندی مناطق پرخطر را آشکار می‌سازد (Zhou et al., 2024). بحرانی‌ترین نقاط به ترتیب شامل نقاط ۱۵، ۹، ۶ و ۱۴ می‌باشند. این یافته با مطالعه Panda & Panda (2022) که نشان دادند کودکان در مناطق صنعتی و کشاورزی ۷ تا ۱۲ برابر بیشتر از بزرگسالان در معرض خطر هستند، همخوانی دارد.

جدول ۱۱. مقادیر شاخص‌های HI و ELCR فلزات سنگین مربوط به رده سنی بزرگسالان و کودکان

نقطه	HI بزرگسالان	HI کودکان	ELCR بزرگسالان	ELCR کودکان
۱	۰/۱۵۷	۱/۲۷۳	$2/51 \times 10^{-2}$	$2/01 \times 10^{-1}$
۲	۰/۱۶۴	۱/۳۳۹	$2/40 \times 10^{-2}$	$1/92 \times 10^{-1}$
۳	۰/۱۴۸	۱/۱۹۹	$2/37 \times 10^{-2}$	$1/89 \times 10^{-1}$
۴	۰/۱۷۱	۱/۳۹۲	$2/58 \times 10^{-2}$	$2/08 \times 10^{-1}$
۵	۰/۱۷۹	۱/۴۵۵	$2/57 \times 10^{-2}$	$2/07 \times 10^{-1}$
۶	۰/۱۸۷	۱/۵۲۱	$2/69 \times 10^{-2}$	$2/18 \times 10^{-1}$
۷	۰/۱۷۴	۱/۴۱۵	$2/51 \times 10^{-2}$	$2/00 \times 10^{-1}$
۸	۰/۱۶۰	۱/۲۹۹	$2/47 \times 10^{-2}$	$1/96 \times 10^{-1}$
۹	۰/۱۹۳	۱/۵۴۲	$2/77 \times 10^{-2}$	$2/26 \times 10^{-1}$
۱۰	۰/۱۵۳	۱/۲۳۸	$2/43 \times 10^{-2}$	$1/95 \times 10^{-1}$
۱۱	۰/۱۶۷	۱/۳۵۵	$2/53 \times 10^{-2}$	$2/03 \times 10^{-1}$
۱۲	۰/۱۶۹	۱/۳۷۲	$2/54 \times 10^{-2}$	$2/04 \times 10^{-1}$
۱۳	۰/۱۵۷	۱/۲۷۳	$2/47 \times 10^{-2}$	$1/96 \times 10^{-1}$
۱۴	۰/۱۸۴	۱/۴۹۵	$2/74 \times 10^{-2}$	$2/23 \times 10^{-1}$
۱۵	۰/۱۹۱	۱/۵۵۵	$2/75 \times 10^{-2}$	$2/25 \times 10^{-1}$

(سبز: اثرات قابل قبول و قرمز: اثرات غیر قابل قبول)

نتایج حاصل از محاسبه ELCR نشان‌دهنده مقادیر چشمگیر و هشداردهنده خطر سرطان‌زایی در منطقه مورد مطالعه می‌باشد. مقادیر ELCR در تمامی ۱۵ نقطه نمونه‌برداری برای بزرگسالان در محدوده $10^{-2} \times 2/37$ تا $10^{-2} \times 2/77$ و برای کودکان در محدوده $10^{-1} \times 1/89$ تا $10^{-1} \times 2/26$ قرار دارد که به ترتیب بیش از ۲۵۵ و ۲۰۰۰ برابر حد مجاز ($10^{-4} \times 1$) می‌باشد. این یافته با پژوهش‌های پیشین نظیر مطالعه Kaviani et al., (2023) در خاک‌های صنعتی ایران و مطالعه Sharafi & Salehi, (2025) که خطرات سرطان‌زایی قابل‌توجهی را در مناطق مشابه گزارش کرده‌اند، همخوانی دارد. نقاط ۹، ۱۵، ۶ و ۱۴ با بالاترین مقادیر ELCR به عنوان بحرانی‌ترین نقاط شناسایی شدند که بیانگر حضور منابع موضعی آلاینده و تجمع فلزات سنگین به‌ویژه کروم و آرسنیک در این مناطق می‌باشد.

نقاط داغ آلودگی

بر اساس نتایج شاخص‌های آلودگی، ریسک اکولوژیک و سلامت، نقاط ۹، ۱۵، ۶ و ۱۴ به عنوان نقاط داغ آلودگی در منطقه مورد مطالعه شناسایی شدند. نقطه ۹ با بیشترین غلظت نیکل، کروم، روی، مس و جیوه و همچنین بالاترین مقادیر شاخص PERI و ELCR برای هر دو گروه سنی، بحرانی‌ترین نقطه محسوب می‌شود. نقطه ۱۵ با غلظت‌های بسیار نزدیک به نقطه ۹ و بالاترین HI برای کودکان در رتبه دوم قرار دارد. نقاط ۶ و ۱۴ نیز با غلظت‌های قابل‌توجه سرب، کادمیوم، آرسنیک و جیوه، به ترتیب در اولویت‌های بعدی اقدامات کنترلی قرار می‌گیرند. الگوی مکانی این نقاط نشان می‌دهد که مناطق نزدیک به خروجی پساب پالایشگاه و مسیر منتهی به رودخانه دجله، بیشترین تجمع آلاینده‌ها را داشته و نیازمند مداخله فوری مدیریتی هستند. پراکندگی نسبتاً یکنواخت کادمیوم در تمام نقاط (I_{geo} مثبت در ۱۰۰٪ نمونه‌ها) نیز بیانگر وجود یک منبع آلاینده فراگیر در سطح منطقه می‌باشد.

نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با به‌کارگیری مجموعه‌ای جامع از شاخص‌های آلودگی، ریسک اکولوژیک و سلامت انسانی، تصویر روشنی از وضعیت آلودگی خاک پیرامون پالایشگاه بایجی عراق ترسیم نمود. یافته‌ها نشان داد که اگرچه سطح آلودگی کلی منطقه در طبقه کم تا متوسط قرار دارد، اما نقاط داغ آلودگی (نقاط ۹، ۱۵، ۶ و ۱۴) در مجاورت مسیر تخلیه پساب صنعتی، غلظت‌های قابل‌توجهی از فلزات سنگین به‌ویژه نیکل، کروم، جیوه و کادمیوم را نشان می‌دهند. در این میان، جیوه و کادمیوم علی‌رغم غلظت پایین‌تر، به دلیل ضریب سمیت بالا، بیش از ۸۲ درصد از خطر اکولوژیک منطقه را به خود اختصاص داده‌اند که ضرورت بازنگری در اولویت‌بندی آلاینده‌ها بر اساس سمیت ذاتی، نه صرفاً غلظت مطلق، را آشکار می‌سازد. از منظر مدیریتی، نگران‌کننده‌ترین یافته، خطر غیرقابل‌قبول سرطان‌زایی برای ساکنان منطقه است؛ به‌گونه‌ای که میانگین ELCR برای بزرگسالان حدود ۲۵۵ برابر و برای کودکان بیش از ۲۰۰۰ برابر حد مجاز استانداردهای بین‌المللی برآورد گردید. همچنین HI برای کودکان در تمامی ۱۵ نقطه نمونه‌برداری از آستانه ایمن فراتر رفته که هشدار جدی برای سلامت جمعیت آسیب‌پذیر کودک محسوب می‌شود. از سوی دیگر، همبستگی قوی میان ماده آلی و رس خاک با غلظت فلزات سنگین نشان می‌دهد که ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک، نقش تعیین‌کننده‌ای در انباشت آلاینده‌ها ایفا می‌کنند و بایستی در طراحی راهکارهای مدیریتی مورد توجه قرار گیرند. بر اساس یافته‌ها، راهبرد مدیریتی پیشنهادی در چهار سطح اولویت‌بندی می‌شود: اولویت نخست، اقدامات فوری در نقاط داغ شامل محدودسازی دسترسی کودکان، پوشاندن خاک آلوده با لایه‌های پاک و اجرای طرح‌های پایدارسازی زیستی؛ اولویت دوم، استقرار سامانه پایش مستمر و فصلی با تأکید بر کروم، نیکل و آرسنیک در تمامی ۱۵ نقطه (با توجه به اینکه HI کودکان در ۱۰۰٪ نقاط بالاتر از یک است)؛ اولویت سوم، انجام مطالعات اپیدمیولوژیک برای ارزیابی آثار بهداشتی مواجهه طولانی‌مدت بر جمعیت کودک و اولویت چهارم، توانمندسازی عمومی و آموزش خانواده‌ها در خصوص شیوه‌های کاهش مواجهه با خاک آلوده.

REFERENCES

- Abdullah, K. M. (2024). Evaluation and study of pollution in the elements in the Baiji refinery after the recent terrorist operations. *Journal for Research in Applied Sciences and Biotechnology*, *3*(1), 60-66.
- Abed, M. F., Altawash, B. S., & Ali, S. M. (2015). Environmental assessment of trace elements concentration and distribution in surface soils at north Baiji City, Iraq. *Iraqi Journal of Science*, *56*(4B), 3176-3187.
- Aguilera, A., Bautista, F., Gutiérrez-Ruiz, M., Cenicerós-Gómez, A. E., Cejudo, R., & Goguitchaichvili, A. (2021). Heavy metal pollution of street dust in the largest city of Mexico, sources and health risk assessment. *Environmental Monitoring and Assessment*, *193*(4), 193. <https://doi.org/10.1007/s10661-021-08993-4>
- Ahmed, R. R., Karaghool, H. A. K., & Hazzaa, M. M. (2025). Calculating pollution indices of heavy metals in surface soil at Baiji refinery. *Edelweiss Applied Science and Technology*, *9*(5), 197-205.
- Alloway, B. J. (Ed.). (2013). *Heavy metals in soils: Trace metals and metalloids in soils and their bioavailability* (3rd ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-4470-7>
- Atiyah, S. S., Saeed, I. O., & Mostefai, N. (2025). Evaluating the efficiency of industrial water treatment unit at Baiji refinery according to international environmental standards. *Tikrit Journal of Pure Science*, *30*(4). [Page numbers not specified]
- Chen, H., Teng, Y., Lu, S., Wang, Y., & Wang, J. (2015). Contamination features and health risk of soil heavy metals in China. *Science of the Total Environment*, *512-513*, 143-153. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.01.025>
- Duodu, G. O., Goonetilleke, A., & Ayoko, G. A. (2016). Comparison of pollution indices for the assessment of heavy metal in Brisbane River sediment. *Environmental Pollution*, *219*, 1077-1091. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.09.008>
- Elbagory, M., EL-Khateeb, N., El-Nahrawy, S., Omara, A. E.-D., Mohamed, I., El-Sharkawy, M., Zayed, A., Goala, M., Gupta, D., Kumar, P., Kumar, P., & Širić, I. (2025). Inclusion of key soil parameters in the modified contamination factor (MCF) model as a tool for assessing heavy metal pollution in agricultural soils. *Scientific Reports*, *15*, 42974. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-27110-w>
- Förstner, U., & Wittmann, G. T. W. (1983). *Metal pollution in the aquatic environment* (2nd ed.). Springer-Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-69386-5>
- Grmasha, R. A., Stenger-Kovács, C., Bedewy, B. A. H., Al-sareji, O. J., Al-Juboori, R. A., Meiczinger, M., & Hashim, K. S. (2023). Ecological and human health risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) in Tigris River near the oil refineries in Iraq. *Environmental Research*, *227*, 115791. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.115791>
- Hakanson, L. (1980). An ecological risk index for aquatic pollution control: A sedimentological approach. *Water Research*, *14*(8), 975-1001. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(80\)90143-8](https://doi.org/10.1016/0043-1354(80)90143-8)
- Islam, M., Al Bakky, A., Saikat, M. S. M., Antu, U. B., Roy, T. K., Akter, R., Ismail, Z., Ibrahim, K. A., & Idris, A. M. (2024). Toxicity factors, ecological and health risk assessments of heavy metal in the urban soil: A case study of an agro-machinery area in a developing country. *Environmental Geochemistry and Health*, *46*(11), 437. <https://doi.org/10.1007/s10653-024-02213-x>
- Jang, S., Shao, K., & Chiu, W. A. (2023). Beyond the cancer slope factor: Broad application of Bayesian and probabilistic approaches for cancer dose-response assessment. *Environment International*, *175*, 107959. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2023.107959>
- Järup, L. (2003). Hazards of heavy metal contamination. *British Medical Bulletin*, *68*(1), 167-182. <https://doi.org/10.1093/bmb/ldg032>
- Järup, L., & Åkesson, A. (2009). Current status of cadmium as an environmental health problem. *Toxicology and Applied Pharmacology*, *238*(3), 201-208. <https://doi.org/10.1016/j.taap.2009.04.020>
- Kabata-Pendias, A. (2011). *Trace elements in soils and plants* (4th ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b10158>
- Kaviani, B., Rahimi, E., & Moradi, M. (2023). Heavy metal contamination and cancer risk assessment in industrial soils of Northern Iran. *Environmental Geochemistry and Health*, *45*(4), 1567-1585. <https://doi.org/10.1007/s10653-022-01434-2>
- Khaleel, A. S., & Khwedim, K. H. (2024). Heavy metal content in the soil of Baiji refinery and surrounding area, controlling its distribution factors. *Iraqi Geological Journal*, *57*(2D), 197-209. <https://doi.org/10.46717/igj.57.2D.16ms-2024-10-26>
- Kowalska, J. B., Mazurek, R., Gąsior, M., & Zaleski, T. (2018). Pollution indices as useful tools for the comprehensive evaluation of the degree of soil contamination--A review. *Environmental Geochemistry and Health*, *40*(6), 2395-2420. <https://doi.org/10.1007/s10653-018-0106-z>
- Kowalska, J., Bąk, M., & Zaleski, T. (2020). Heavy metals content in the soils of the Tatra National Park near Lake Morskie Oko and Kasprowy Wierch---A case study. *Minerals*, *10*(12), 1120. <https://doi.org/10.3390/min10121120>

- Liu, C., Chen, L., Ni, G., Yuan, X., He, S., & Miao, S. (2025). Prediction of heavy metal spatial distribution in soils of typical industrial zones utilizing 3D convolutional neural networks. *Scientific Reports*, *15*, 396. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-84545-3>
- Mahdavi, M., Afyuni, M., & Khajehali, J. (2018). Assessment of heavy metal contamination in agricultural soils of southern Iran. *Environmental Monitoring and Assessment*, *190*(6), 1-14. <https://doi.org/10.1007/s10661-018-6695-2>
- Malvandi, H., Behbodi, R., & Pahlavani, A. (2024). Determination of concentration and risk assessment of toxic metals in the settled dust from school yards of Mashhad metropolis. *Environmental Science and Pollution Research*, *31*(54), 61147-61161. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-35305-3>
- Muhammad, M. Z., Char, A. K., bin Yaso, M. R., & Hassan, Z. (2010). Small and medium enterprises (SMEs) competing in the global business environment: A case of Malaysia. *International Business Research*, *3*(1), 66-75. <https://doi.org/10.5539/ibr.v3n1p66>
- Muller, C. H. (1969). Allelopathy as a factor in ecological process. *Vegetatio*, *18*, 348-357. <https://doi.org/10.1007/BF00332847>
- Mustapha, L. S., Obayomi, O. V., & Obayomi, K. S. (2025). A comprehensive review on potential heavy metals in the environment: Persistence, bioaccumulation, ecotoxicology, and agricultural impacts. *Ecological Frontiers*. <https://doi.org/10.1016/j.ecofro.2025.01.001>
- Nisbet, I. C. T., & LaGoy, P. K. (1992). Toxic equivalency factors (TEFs) for polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs). *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, *16*(3), 290-300. [https://doi.org/10.1016/0273-2300\(92\)90009-X](https://doi.org/10.1016/0273-2300(92)90009-X)
- Numaan, M. M., Kadhem, A. J., Moyel, M. S., et al. (2024). Study the possibility of using the treated industrial wastewater of North Refineries Company, Baiji-Iraq, for irrigation purposes. *Tikrit Journal of Engineering Sciences*, *31*(4), 183-190.
- Pallant, J. (2020). *SPSS survival manual: A step by step guide to data analysis using IBM SPSS* (7th ed.). Open University Press. <https://doi.org/10.4324/9781003117452>
- Panda, P. K., & Panda, P. (2022). Role of heavy metals in the neuropathogenesis of autism and attention-deficit hyperactivity disorder in children: A scoping review. *Research and Reviews in Pediatrics*, *23*(3), 63-67. https://doi.org/10.4103/rrp.rrp_16_22
- Rahi, M. N., Jaeel, A. J., & Abbas, A. J. (2021). Treatment of petroleum refinery effluents and wastewater in Iraq: A mini review. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, *1058*, 012072. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1058/1/012072>
- Rim, K.-T. (2023). Evaluations of carcinogens from comparison of cancer slope factors: meta-analysis and systemic literature reviews. *Molecular & Cellular Toxicology*, *19*(4), 635-656. <https://doi.org/10.1007/s13273-023-00387-6>
- Salazar-Rojas, T., Cejudo-Ruiz, F. R., Gutiérrez-Soto, M. V., & Calvo-Brenes, G. (2023). Assessing heavy metal pollution load index (PLI) in biomonitors and road dust from vehicular emission by magnetic properties modeling. *Environmental Science and Pollution Research*, *30*(39), 91248-91261. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-28758-5>
- Shapiro, S. S., & Wilk, M. B. (1965). An analysis of variance test for normality (complete samples). *Biometrika*, *52*(3-4), 591-611. <https://doi.org/10.1093/biomet/52.3-4.591>
- Sharafi, S., & Salehi, F. (2025). Comprehensive assessment of heavy metal (HMs) contamination and associated health risks in agricultural soils and groundwater proximal to industrial sites. *Scientific Reports*, *15*, 7518. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-92015-7>
- Soodmand, A., Ebrahimi, S., & Kiani, F. (2025). Monitoring and assessment of contamination and ecological risk of heavy metals in Hezarpich surface soils. *International Journal of Environmental Science and Technology*, *22*(2), 773-786. <https://doi.org/10.1007/s13762-024-05852-w>
- Taylor, A. A., Tsuji, J. S., McArdle, M. E., Adams, W. J., & Goodfellow, W. L. (2023). Recommended Reference Values for Risk Assessment of Oral Exposure to Copper. *Risk Analysis: An International Journal*, *43*(2), 211-218. <https://doi.org/10.1111/risa.13906>
- Tchounwou, P. B., Yedjou, C. G., Patlolla, A. K., & Sutton, D. J. (2012). Heavy metals toxicity and the environment. *EXS*, *101*, 133-164. https://doi.org/10.1007/978-3-7643-8340-4_6
- Thompson, C. M., Kirman, C., & Harris, M. A. (2023). Derivation of oral cancer slope factors for hexavalent chromium informed by pharmacokinetic models and in vivo genotoxicity data. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, *145*, 105521. <https://doi.org/10.1016/j.yrtph.2023.105521>
- Tomlinson, D. L., Wilson, J. G., Harris, C. R., & Jeffrey, D. W. (1980). Problems in the assessment of heavy-metal levels in estuaries and the formation of a pollution index. *Helgoländer Meeresuntersuchungen*, *33*(1-4), 566-575. <https://doi.org/10.1007/BF02414780>

- Tóth, G., Hermann, T., Da Silva, M. R., & Montanarella, L. (2016). Heavy metals in agricultural soils of the European Union with implications for food safety. *Environment International*, *88*, 299-309. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2015.12.017>
- Turekian, K. K., & Wedepohl, K. H. (1961). Distribution of the elements in some major units of the earth's crust. *Geological Society of America Bulletin*, *72*(2), 175-192. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1961\)72\[175:DOTEIS\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1961)72[175:DOTEIS]2.0.CO;2)
- U.S. Environmental Protection Agency. (1995). *Integrated Risk Information System (IRIS): Mercuric chloride*, CASRN 7487-94-7. USEPA.
- U.S. Environmental Protection Agency. (1998a). *Integrated Risk Information System (IRIS): Chromium (VI)*, CASRN 18540-29-9. USEPA.
- U.S. Environmental Protection Agency. (1998b). *Integrated Risk Information System (IRIS): Nickel soluble salts*, CASRN 7440-02-0. USEPA.
- U.S. Environmental Protection Agency. (1999). *Integrated Risk Information System (IRIS): Cadmium*, CASRN 7440-43-9. USEPA.
- U.S. Environmental Protection Agency. (2005a). *Integrated Risk Information System (IRIS): Lead and compounds (inorganic)*, CASRN 7439-92-1. USEPA.
- U.S. Environmental Protection Agency. (2005b). *Integrated Risk Information System (IRIS): Zinc and compounds*, CASRN 7440-66-6. USEPA.
- U.S. Environmental Protection Agency. (2007). *Method 3051A (SW-846): Microwave assisted acid digestion of sediments, sludges, soils, and oils* (Revision 1). Washington, DC.
- U.S. Environmental Protection Agency. (2014). *Method 6020B (SW-846): Inductively coupled plasma - mass spectrometry* (Revision 2). Washington, DC.
- U.S. Environmental Protection Agency. (2023). *Regional screening levels (RSLs) for chemical contaminants at superfund sites*. <https://www.epa.gov/risk/regional-screening-levels-rsls>
- U.S. Environmental Protection Agency. (2024). *IRIS toxicological review of hexavalent chromium [Cr(VI)]* (CASRN 18540-29-9). Washington, DC.
- U.S. Environmental Protection Agency. (2025). *IRIS toxicological review of inorganic arsenic (CASRN 7440-38-2) (Final Report, Report No. EPA/635/R-25/005Fa)*. Washington, DC.
- Uyanık, N. A. (2023). An alternative approach for the excess lifetime cancer risk and prediction of radiological parameters. *Open Chemistry*, *21*(1), 20220359. <https://doi.org/10.1515/chem-2022-0359>
- Varol, M. (2011). Assessment of heavy metal contamination in sediments of the Tigris River (Turkey) using pollution indices and multivariate statistical techniques. *Journal of Hazardous Materials*, *195*, 355-364. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.08.051>
- Wang, Y., Xi, B., Li, Y., Dang, Q., Zhang, C., & Zhao, X. (2023). Insight into the fate of metal ions in response to the refined classification and transformation order of dissolved organic matter components during municipal solid waste composting. *Environmental Research*, *229*, 115468. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.115468>
- Weaver, R. W. (2008). *Methods of soil analysis. Part 2*. Soil Science Society of America.
- Wei, B., & Yang, L. (2010). A review of heavy metal contaminations in urban soils, urban road dusts and agricultural soils from China. *Microchemical Journal*, *94*(2), 99-107. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2009.09.014>
- Zar, J. H. (2010). *Biostatistical analysis* (5th ed.). Pearson Prentice Hall.
- Zhang, W., Zhao, P., Pu, T., Bao, W., Qie, H., Tan, X., Ren, M., & Lin, A. (2025). Enhancing heavy metal immobilization in cropping systems via modified clay minerals: A machine learning-assisted meta-analysis. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, *13*(6), 119684. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2025.119684>
- Zhou, Q., Yang, S., Sun, L., Ye, J., Sun, Y., Qin, Q., & Xue, Y. (2024). Evaluating the protective capacity of soil heavy metals regulation limits on human health: A critical analysis concerning risk assessment - Importance of localization. *Journal of Environmental Management*, *361*, 121197. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.121197>