



Assessment of Pollution in the Central Soils of Khuzestan Province with Potentially Toxic Elements (PTEs) and their Origins

N. Sahraei¹, A. Landi², S. Hojati^{3*}, E. Pasolli⁴

Received: 19-02-2023

Revised: 19-03-2023

Accepted: 10-04-2023

Available Online: 11-04-2023

How to cite this article:

Sahraei, N., Landi, A., Hojati, S., & Pasolli, E. (2023). Assessment of pollution in the central soils of Khuzestan province with potentially toxic elements (PTEs) and their origins. *Journal of Water and Soil*, 37(3), 457-471. (In Persian with English abstract).
<https://doi.org/10.22067/JSW.2023.81161.1254>

Introduction

In recent years, soil contamination with potentially toxic elements (PTEs) has become a major problem in most parts of the world. PTEs are naturally generated from the pedogenesis in the soil and are formed mainly by rock weathering. Nevertheless, the natural content of metals, i.e., Cr, Zn, Ni, Pb, Cd, used to be low in the soil, but due to anthropogenic activities such as industrial emissions, atmospheric transportation, sewage irrigation, and application of pesticides and fertilizers, there is an increase in the content of PTEs. PTEs in soil are one of the most important environmental pollutants due to their toxicity, durability, easy absorption by plants and long half-life. Therefore, the assessment of soil health is very important for the sustainable development of agriculture and the rehabilitation of soils contaminated with PTEs. The present study was conducted to quantify PTEs pollution for soil environmental assessment using a flexible approach based on multivariate analysis and using pollution indicators in a part of the central lands of Khuzestan province.

Materials and Methods

For this purpose, in February 2021, 200 surface soil samples (0-10 cm) were taken using stratified random sampling. The collected soil samples were cleaned by removing plant materials and other pebbles, and air dried, powdered, and sieved by using a 2 mm sieve size. The interest in soil's physical and chemical properties i.e., pH was determined with a digital pH meter. Soil textural particles were measured by the hydrometer method, soil organic carbon (SOC) content was estimated by following Walkley and Black method, bulk density (BD) was measured by the Clod method, and total metal content was determined using the aqua-regia solution digestion method and analyzed using Inductively Coupled Plasma-Optical Emission spectrometry (ICP-OES). The level of Pb, Ni, Zn, Cr pollution was estimated based on environmental indicators including contamination factor (CF), enrichment factor (EF), geo-accumulation index (Igeo), pollution index of individual metals (PI), and modified pollution index of individual metals (MPI). Multivariate statistical methods including correlation analysis, cluster analysis (CA), and principal component analysis (PCA) were used to find the source of metals in the soil. All statistical methods were performed using SPSS (26 version) software.

Results and Discussion

Measurement of soil pH showed that the soil of the studied area tends to alkalinity. Also, the soil texture in this area is loam. The results showed that the SOC in these soil samples is 0.71%, and the range of EC (between 0.18 and 60.5 dS/m) indicates the distribution of saline and non-saline soils in the studied area. The total average concentration of Zn, Ni, Cr, and Pb were 60.26, 50.96, 50.38, and 12.67 mg/kg, respectively. The order of average for heavy metals was Zn > Ni > Cr > Pb. The highest amount of standard deviation and concentration changes were

1, 2 and 3- Ph.D. Student, Professor and Associate Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Kuzestan, Iran, respectively.

(*- Corresponding Author Email: s.hojati@scu.ac.ir)

4- Associate Professor, Department of Agricultural Sciences, University of Naples Federico II, Naples, Italy

DOI: [10.22067/JSW.2023.81161.1254](https://doi.org/10.22067/JSW.2023.81161.1254)

observed in Zn and Pb elements. These two elements also showed a high degree of variation coefficient in the studied area, which can indicate the high impact of human activities on the content of these elements. The results obtained from the application of multivariate statistics showed that there is a positive correlation between the elements such as Zn, Ni, and Pb in the study area, indicating that these metals probably have the same source. Whereas the absence of correlation of Cr with these elements indicates a separate source for this element compared to Pb, Zn, and Ni. There was also a strong relationship among these elements based on the PCA and CA classification. Based on the multivariate statistical analysis the source of pollution for the metals studied was mainly from both anthropogenic and geogenic activities. The results showed that the soil samples taken from the study area are in the low pollution category based on the individual element indices of CF and Igeo, but in the moderate pollution class based on the EF index. In addition, the evaluation based on the cumulative and multi-element indices of PI and MPI showed that 100% of samples have high pollution.

Conclusion

The present study concludes that the average values of Zn, Ni, Cr, and Pb were found to be below the guidelines set by the IEPA (Iran Environmental Protection Agency) as well as the Earth's crust values. The results indicate existing relationships among the studied variables, revealing that the heavy metals Zn, Ni, and Zn share the same source in the study area. Additionally, it was observed that the source of Cr is primarily geogenic in nature. These findings highlight the significance of utilizing multivariate statistical methods and pollution indicators in tandem, as they prove to be valuable tools for evaluating and quantitatively determining the potential pollution risk.

Keywords: Cr, Enrichment factor, Multivariate statistics, Ni, Pb, Zn

مقاله پژوهشی

جلد ۳۷، شماره ۳، مرداد- شهریور ۱۴۰۲، ص. ۴۷۱-۴۵۷

منشأیابی و ارزیابی آلودگی خاک‌های مرکزی استان خوزستان به برخی فلزات با پتانسیل آلاینده‌گی

نسیم صحرایی^۱ - احمد لندی^۲ - سعید حجتی^{۳*} - ادواردو پاسولی^۴

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۳۰

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۱۲/۲۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۱/۲۱

چکیده

فلزات با پتانسیل آلاینده‌گی از مهم‌ترین آلاینده‌های محیطی هستند که در تمام جوامع صنعتی یافت می‌شوند از این‌رو ارزیابی وضعیت آلودگی خاک برای توسعه پایدار کشاورزی و احیا خاک‌های آلوده به فلزات با پتانسیل آلاینده‌گی امری ضروری است. مطالعه حاضر با هدف کمی‌سازی آلودگی فلزات سرب، نیکل، کروم و روی برای ارزیابی زیست‌محیطی خاک با استفاده از شاخص‌های آلودگی و یک رویکرد انعطاف‌پذیر، بر اساس تحلیل چند متغیره در بخشی از اراضی مرکزی استان خوزستان انجام شد. به‌منظور برآورد میزان آلودگی خاک، ۲۰۰ نمونه از خاک سطحی (عمق صفر تا ۱۰ سانتی‌متری) تهیه گردید. پس از نمونه‌برداری و آماده‌سازی خاک‌ها، غلظت عناصر (روی، نیکل، سرب و کروم) با روش تیزآب سلطانی و دستگاه ICP-OES اندازه‌گیری و با استفاده از شاخص‌های زیست‌محیطی و تحلیل‌های مختلف آماری، میزان آلودگی در منطقه ارزیابی شد. نتایج نشان داد که میانگین غلظت فلزات مورد مطالعه روی، نیکل، کروم و سرب به ترتیب ۶۰/۲۶، ۵۰/۹۶، ۵۰/۳۸ و ۱۲/۶۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود. مطابق نتایج تجزیه و تحلیل همبستگی پیرسون تمامی فلزات به جز کروم از همبستگی بالایی با یکدیگر برخوردار بودند، که نشان دهنده منابع مشابه برای این فلزات در منطقه می‌باشد. به‌علاوه بر اساس نتایج تجزیه و تحلیل آماری چند متغیره هر دو عامل انسان‌زاد و زمین‌زاد، منشأ فلزات مورد بررسی در منطقه مورد مطالعه تشخیص داده شد. همچنین نتایج ارزیابی فاکتور آلودگی و شاخص زمین‌انباشتی نشان داد که فلزات روی، نیکل، کروم و سرب به‌صورت منفرد، آلودگی در خاک سطحی منطقه ندارند و شاخص غنی‌شدگی نیز سطح آلودگی متوسط را در منطقه نشان می‌دهد، این در حالی است که نتایج به دست آمده از شاخص‌های آلودگی اصلاح شده و جامع آلودگی نمره بیانگر شدت بالای آلودگی تجمعی این فلزات در منطقه می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: تحلیل چند متغیره، روی، سرب، شاخص غنی‌شدگی، کروم، نیکل

مقدمه

گردد. به‌طور کلی فلزات با پتانسیل آلاینده‌گی با رسوب در خاک و جذب توسط پوشش گیاهی بر حاصلخیزی، توسعه گیاهان و بهره‌وری خاک تأثیر می‌گذارند. همچنین قرار گرفتن انسان در معرض این فلزات باعث اختلالات حاد و مزمن قلب و عروق و ابتلا به سرطان‌های مختلف می‌گردد (Huang et al., 2018).

تغییرات مکانی محتویات این فلزات در خاک سطحی ممکن است

در سال‌های اخیر، آلودگی خاک به فلزات با پتانسیل آلاینده‌گی به یک مشکل اساسی در بسیاری از نقاط جهان تبدیل شده است. وجود این فلزات در خاک به دلیل سمیت، ماندگاری، جذب آسان توسط گیاهان و نیمه‌عمر طولانی می‌تواند عملکرد طبیعی خاک‌ها را از بین برده و باعث ایجاد تنش در محصولات زراعی و جلوگیری از رشد آن‌ها

۱، ۲ و ۳- به ترتیب دانشجوی دکتری، استاد و دانشیار گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، خوزستان، ایران
(Email: s.hojati@scu.ac.ir)
* نویسنده مسئول:

۴- دانشیار گروه علوم کشاورزی، دانشگاه فدريكو دوم ناپل، ناپل، ایتالیا

این راستا ایلپو و همکاران (Ielpo et al., 2017) برای یافتن منبع فلزات در خاک‌های کشاورزی منطقه جنوب ایتالیا از معادلات چند متغیره استفاده کردند و نتیجه گرفتند که استفاده از سموم دفع آفات دلیل اصلی آلودگی فلزات با پتانسیل آلاینده‌ی زیاد در خاک‌های این منطقه است. سونگ و همکاران (Song et al., 2018) نیز در مطالعه‌ی ای از روش‌های چند متغیره و شاخص‌های آلودگی در خاک‌های کشاورزی چین استفاده کردند بر اساس نتایج مطالعه آن‌ها منابع طبیعی و استفاده از سموم شیمیایی و دفع آفات عامل اصلی ورود فلزات با پتانسیل آلودگی زیاد مانند آرسنیک و کروم در اراضی کشاورزی منطقه مورد مطالعه آنان بودند. همچنین حتی (Hojati, 2017) در خاک‌های منتخب شمال استان خوزستان در مطالعه‌ای که به منظور ارزیابی آلودگی و توزیع منبع فلزات آرسنیک، سرب و مس با استفاده از شاخص‌های آلودگی و تحلیل مؤلفه‌های اصلی^۵ (PCA) انجام داد به این نتیجه رسید که منشأ فلزات مس و سرب با غنی‌سازی متوسط تا زیاد در این منطقه، هر دو عامل منابع طبیعی و انسانی می‌باشد، این در حالی است که منشأ آرسنیک در این خاک‌ها عمدتاً تحت تأثیر منشأ لیتوژنیک قرار می‌گیرد. در مطالعه دیگری که توسط ال و ابل و همکاران (Al-Wabel et al., 2017) به منظور یافتن منبع و میزان آلودگی فلزات در زمین‌های کشاورزی عربستان سعودی و با استفاده از تکنیک‌های چند متغیره و شاخص‌های مختلف آلودگی صورت گرفت، فعالیت‌های انسانی مانند استفاده از مواد شیمیایی از قبیل سموم دفع آفات و کود، منبع اصلی آلودگی این فلزات در اراضی کشاورزی معرفی شدند.

استان خوزستان در جنوب غربی ایران، یکی از مراکز مهم کشاورزی و صنعتی در کشور می‌باشد. کشاورزی گسترده و کاربرد سموم و آفت‌کش‌های شیمیایی، استفاده از کمپوست و لجن فاضلاب از یک سو و تعدد صنایع مستقر در منطقه از جمله صنایع مرتبط با فولاد، نفت و همچنین پدیده غالب گرد و غبار از سوی دیگر، اهمیت زیست‌محیطی و لزوم بررسی میزان آلودگی فلزات با پتانسیل آلاینده‌ی زیاد را در خاک‌های این منطقه دوچندان می‌کند. از این رو، پژوهش حاضر با هدف ارزیابی آلودگی خاک به عناصر روی، نیکل، کروم و سرب، با استفاده از شاخص‌های مختلف زیست‌محیطی و بهره‌مندی از روش‌های آماری چند متغیره به منظور شناسایی منابع احتمالی آلودگی و تعیین توزیع مکانی غلظت این عناصر در قسمتی از اراضی مرکزی استان خوزستان انجام گرفت.

تحت تأثیر مواد مادری خاک یا منابع انسانی باشد، به عبارت دیگر علاوه بر اینکه این فلزات به‌طور طبیعی در خاک وجود دارند، در اثر فعالیت‌های انسانی نیز به مقدار زیادی به خاک افزوده می‌شوند. فرسایش خاک و هوادهی سنگ‌ها در دوره‌های مختلف زمین‌شناسی، منابع طبیعی این دسته فلزات در خاک هستند (Stafilov et al., 2010). با این حال در بیشتر مناطق صنعتی و شهری، سهم فعالیت‌های انسانی در آلودگی خاک به فلزات با پتانسیل آلاینده‌ی بیشتر از منابع طبیعی است (Adimalla and Wang, 2018). رشد سریع جمعیت و گسترش صنعت و کشاورزی در جهان، باعث تشدید پتانسیل آلاینده‌ی این فلزات در نتیجه فعالیت‌هایی مانند بهره‌برداری از معادن، پردازش و ذوب فلزات، تولید مواد شیمیایی و دارویی، گازهای گلخانه‌ای تولید شده توسط کارخانه‌ها و وسایل نقلیه، افزایش مصرف سموم و آفت‌کش‌ها، دفن زباله‌ها، رسوب گرد و غبار و ذرات معلق در هوا و آبیاری مزارع با آب‌های نامتعارف شده است (Adimalla, 2020).

با توجه به اینکه توزیع مکانی فلزات با پتانسیل آلاینده‌ی در خاک تا حد زیادی تحت تأثیر تغییرات سنگ مادر، خصوصیات محیطی و فرآیندهای خاک‌شناسی قرار می‌گیرد (Rezapour et al., 2014)، تنها تعیین غلظت این فلزات در خاک، میزان آلودگی و اثرات تخریبی آن‌ها را در محیط را نشان نخواهد داد و کارایی لازم برای ارزیابی و مدیریت وضعیت آلودگی در خاک را ندارد. به این منظور پژوهشگران به منظور بررسی آلودگی و خطرات زیست‌محیطی ناشی از غلظت فلزات با پتانسیل آلاینده‌ی از شاخص‌های آلودگی مانند فاکتور آلودگی^۱ (CF)، فاکتور غنی‌شدگی^۲ (EF)، شاخص زمین انباشتگی^۳ (Igeo) و شاخص خطر زیست‌محیطی^۴ (RI) استفاده کرده‌اند (Ahmed et al., 2016; Kumar et al., 2018; Tian et al., 2017). برخی از محققان بیان داشته‌اند که شاخص‌های EF و Igeo مهم‌ترین شاخص‌های تک‌عنصری جهت ارزیابی نسبی فلزات با پتانسیل آلاینده‌ی در خاک‌های آلوده و بدون آلودگی هستند (Kumar et al., 2018; Sakram et al., 2015)، این در حالی است که شاخص‌های چند عنصری مانند شاخص آلودگی نمره^۵ (PI) و شاخص آلودگی اصلاح شده^۶ (MPI) می‌توانند اثرات هم‌افزایی فلزات مختلف را در نظر بگیرند.

یکی دیگر از راه‌های ارزیابی و مدیریت وضعیت آلودگی در یک منطقه تشخیص نوع و منشأ فلزات با پتانسیل آلاینده‌ی در خاک می‌باشد. در چند دهه اخیر، توسعه رویکردهای آماری چند متغیره مبتنی بر GIS، تحقیقات را در مورد آلودگی خاک و اثرات آن بر سلامت انسان را متحول کرده است. این رویکردهای چند متغیره به‌طور گسترده‌ای جهت تقسیم منابع و توزیع فلزات آلاینده مورد توجه قرار محققان گرفته اند (Barakat et al., 2019; Keshavarzi and Kumar, 2019).

5- Pollution index of individual metals

6- Modified pollution index of individual metals

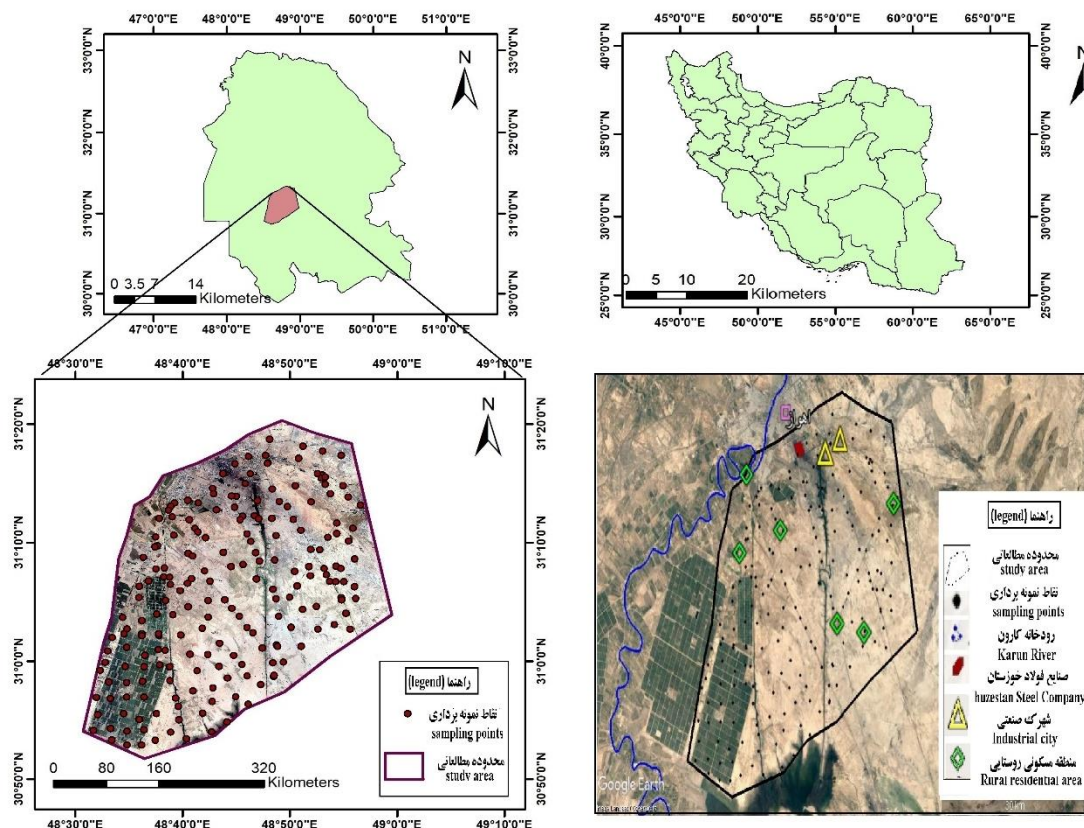
7- Principal Component Analysis (PCA)

1- Contamination Factor

2- Enrichment Factor

3- Geoaccumulation Index

4- Potential ecological risk



شکل ۱- موقعیت نقاط نمونه‌برداری در منطقه مورد مطالعه
Figure 1- Study area location and distribution of the soil samples

نمونه‌برداری به گونه‌ای تهیه شد که نشان دهنده تمامی خاک‌های اصلی و کاربری اراضی منطقه باشد. نمونه‌ها پس از جداسازی مواد گیاهی و سنگریزه‌ها، هوا خشک و از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شدند. سپس توزیع اندازه آن‌ها به روش هیدرومتری (Gee and Boudier, 1986)، مقدار کربن آلی خاک به روش والکی و بلک (Walkley and Black, 1934)، pH در گل اشباع به وسیله pH سنج رقومی (Thomas, 1996)، EC در عصاره گل اشباع به وسیله دستگاه هدایت سنج الکتریکی و جرم مخصوص ظاهری به روش کلوخه (Black and Hartge, 1986) اندازه‌گیری گردید.

اندازه‌گیری غلظت فلزات با پتانسیل آلايندگي

غلظت فلزات مورد مطالعه شامل عناصر سرب، نیکل، کروم و روی با استفاده از دستگاه ICP-OES مدل Varian 710-ES برآورد شدند. عصاره‌گیری برای تعیین غلظت این فلزات از نمونه‌های خاک با استفاده از روش انحلال با تیزآب سلطانی انجام گردید. به این منظور با استفاده از اسید کلریدریک (۳۷ درصد) و اسید نیتریک (۶۵ درصد) نمونه‌ها

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در جنوب غربی ایران با وسعت حدود ۱۵۵ هزار هکتار حد وسط عرض جغرافیایی "۳۰°۵۲'۳۰" تا "۳۱°۲۰'۲۰" شمالی و "۴۸°۵۸'۱۰" تا "۴۸°۳۰'۰۱" طول شرقی، در شرق رودخانه کارون و در ۱۵ کیلومتری جنوب شهر اهواز واقع شده است (شکل ۱). متوسط دمای سالانه ۳۱/۲ درجه سانتی‌گراد و میانگین بارش در منطقه ۲۱۳ میلی‌متر است. ارتفاع منطقه مورد مطالعه بین ۴ تا ۱۲۳ متر از سطح دریای آزاد می‌باشد. کشاورزی آبی، مراتع فقیر و سطوح توسعه یافته شهری، روستایی و صنعتی کاربری‌های غالب در منطقه هستند. زمین‌نمای غالب منطقه، دشت رسوبی سیلابی با مواد مادری آبرفتی می‌باشد (Abyaat et al., 2017).

مطالعات میدانی و تجزیه و تحلیل آزمایشگاهی

در این مطالعه تعداد ۲۰۰ نمونه خاک سطحی از عمق صفر تا ۱۰ سانتی‌متری به روش تصادفی طبقه‌بندی شده جمع‌آوری شدند. نقاط

هضم و پس از به حجم‌رسانی با آب مقطر، قرائت غلظت فلزات انجام شد (Black and Hartge, 1986).

ارزیابی تعیین سطح آلودگی فلزات مورد بررسی

در این پژوهش برای تعیین شدت و سطح آلودگی خاک به فلزات مورد بررسی از فاکتور آلودگی (CF)، فاکتور غنی‌شدگی (EF)، شاخص زمین‌انباشتگی (Igeo)، شاخص جامع آلودگی نمره (PI) و شاخص آلودگی اصلاح شده (MPI) استفاده گردید.

فاکتور آلودگی (CF)

فاکتور آلودگی (CFmetal) یک شاخص ساده و تک مقیاس است که به منظور تعیین آلودگی خاک به فلزات دارای پتانسیل آلودگی استفاده می‌شود. بر اساس این فاکتور مقدار فلزات در نمونه‌ها نسبت به مقدار طبیعی آن سنجیده می‌شود و میزان آلودگی خاک تعیین می‌گردد. این فاکتور با استفاده از رابطه ۱ محاسبه می‌شود:

$$\text{CFmetal} = \frac{\text{Cmetal}}{\text{Cbackground}} \quad \text{رابطه ۱}$$

در رابطه (۱)، Cmetal غلظت عنصر در سطح خاک و Cbackground غلظت عنصر در زمینه می‌باشد. در این پژوهش میانگین غلظت هر عنصر در پوسته زمین به عنوان غلظت زمینه‌ای (طبیعی) در نظر گرفته شد. بر اساس این شاخص، خاک‌ها از نظر درجه آلودگی به فلزات دارای پتانسیل آلودگی به چهار کلاس: آلودگی کم: $CF < 1$ ، آلودگی متوسط: $1 < CF < 3$ ، آلودگی زیاد: $3 < CF < 6$ و آلودگی خیلی زیاد: $CF \geq 6$ گروه‌بندی می‌شوند (Hakanson, 1980).

فاکتور غنی‌شدگی (EF)

فاکتور غنی‌شدگی (EF)، سطح آلودگی فلزات در خاک را نشان می‌دهد و شاخصی برای ارزیابی میزان تأثیر فعالیت‌های انسانی بر آلودگی خاک توسط فلزات دارای پتانسیل آلودگی و جدا کردن منابع طبیعی و انسانی این فلزات می‌باشد. فاکتور غنی‌شدگی (EF) بر اساس رابطه ۲ محاسبه گردید.

$$\text{EF} = \frac{(\text{Cx/R})_{\text{sample}}}{(\text{Cx/R})_{\text{Reference}}} \quad \text{رابطه ۲}$$

در رابطه (۲)، Cx غلظت فلز مربوطه و R غلظت فلز مبناست. عبارت Sample مقادیر خاکی هر یک از متغیرهای موجود و عبارت Reference نیز به مقادیر متناظر این متغیرها در خاک‌های آلوده نشده اشاره دارد. در این تحقیق، غلظت فلزات مورد مطالعه با توجه به غلظت آهن نرمال شدند. علت انتخاب آهن به عنوان عنصر مبنای این است که تصور می‌شود غلظت آن در خاک، مستقل از غلظت فلزات دیگر بوده و در نتیجه از آن‌ها تأثیر نمی‌پذیرد. درجه آلودگی فلزات سنگین، بر اساس فاکتور غنی‌سازی در ۳ سطح تعریف می‌شود: $EF < 1/5$ به منشأ عمدتاً پوسته یا هوازدگی طبیعی اشاره دارد، درحالی‌که $1/5$

$EF > 10$ نشان‌دهنده آلودگی انسانی است و $EF > 10$ به معنای غنی‌سازی قابل توجه است (Ye et al., 2011). بر این اساس درجه آلودگی خاک‌ها به فلزات دارای پتانسیل آلودگی را می‌توان به پنج دسته طبقه‌بندی کرد. کلاس آلودگی کم $EF < 2$ ، کلاس آلودگی متوسط ($2 < EF < 5$)، کلاس آلودگی زیاد ($5 < EF < 20$)، کلاس آلودگی بسیار زیاد ($20 < EF < 40$) و کلاس آلودگی به شدت زیاد $EF \geq 40$ (Bhuiyan et al., 2010).

شاخص زمین‌انباشتگی

شاخص زمین‌انباشتگی (Igeo) یکی دیگر از رویکردهای معمول در ارزیابی میزان آلودگی خاک توسط فلزات دارای پتانسیل آلودگی می‌باشد که در سال ۱۹۶۹ توسط آقای مولر ارائه شده است. روش محاسبه آن مطابق با رابطه ۳ است:

$$\text{Igeo} = \log_2 \left(\frac{\text{Cn}}{1.5\text{Bn}} \right) \quad \text{رابطه ۳}$$

در رابطه (۳)، Igeo شاخص تجمع و یا شدت آلودگی در خاک، Cn میزان غلظت عنصر مورد نظر در نمونه خاک و Bn میزان غلظت همان عنصر در محیط مرجع (شیل) می‌باشد. ضریب $1/5$ ضریب تصحیح تأثیر لیتوژنیکی مقدار غلظت زمینه می‌باشد. این شاخص درجه آلودگی به فلزات دارای پتانسیل آلودگی را در قالب ۷ کلاس، بر اساس مقادیر کمی برآورده شده، ارزیابی می‌نماید. $Igeo \leq 0$ غیر آلوده؛ $0 < Igeo \leq 1$ کمی آلوده تا کمی آلوده؛ $1 < Igeo \leq 2$ کمی آلوده؛ $2 < Igeo \leq 3$ کمی آلوده تا خیلی آلوده؛ $3 < Igeo \leq 4$ خیلی آلوده؛ $4 < Igeo \leq 5$ خیلی آلوده تا به شدت آلوده و $Igeo > 5$ به شدت آلوده (Loska et al., 2004).

شاخص جامع آلودگی نمره و شاخص آلودگی اصلاح شده

شاخص PI برای اندازه‌گیری کیفیت خاک مهم است. برتری که این شاخص نسبت به شاخص‌های دیگر دارد این است که این شاخص، ریسک آلودگی تمام فلزاتی که در منطقه مورد مطالعه قرار می‌گیرند را نشان می‌دهد. شاخص نمره مطابق رابطه ۴ محاسبه می‌شود:

$$\text{PI nemerow} = \sqrt{\frac{\text{CFav}^2 + \text{CFmax}^2}{2}} \quad \text{رابطه ۴}$$

که در رابطه (۴)، CFmax و CFav به ترتیب میانگین و حداکثر مقدار CF هستند. بر اساس این شاخص میزان آلودگی خاک‌ها به فلزات دارای پتانسیل آلودگی را می‌توان در یکی از کلاس‌های زیر طبقه‌بندی نمود: $PI < 0/7$ ، $0/7 < PI < 1$ ، $1 < PI < 2$ ، $2 < PI < 3$ و $PI \geq 3$ که به ترتیب نشان‌دهنده عدم آلودگی، کمی آلوده، به طور متوسط آلوده، بسیار آلوده و آلودگی شدید می‌باشد (Keshavarzi and Kumar, 2019).

شاخص آلودگی اصلاح شده (MPI) دیگر شاخص چند عنصری است که مبتنی بر فاکتور غنی‌شدگی است که توسط و همکاران (Brady et al., 2015) پیشنهاد گردید این شاخص از معادله ۵ محاسبه می‌شود:

فلزات در نمونه‌های خاک سطحی برای کلیه عناصر مورد بررسی کم‌تر از محدوده دستورالعمل سازمان حفاظت محیط‌زیست ایران و مقادیر پوسته زمین بود (Mirsal, 2008). میانگین غلظت فلزات روند نزولی روی < نیکل < کروم < سرب را نشان داد. بیشترین مقدار انحراف معیار و تغییرات غلظت در عناصر روی و سرب مشاهده شد. (Yongming et al., 2006) بیان داشتند ضریب تغییرات فلزات با پتانسیل آلاینده‌گی متأثر از منابع طبیعی تقریباً کم است، این در حالی است که این ضریب در فلزات سنگین ناشی از فعالیت‌های انسانی زیاد است، در نتیجه ضریب تغییرپذیری بالای عناصر سرب و روی را می‌توان نشان‌دهنده تأثیر زیاد فعالیت‌های انسانی بر محتوای این عناصر در منطقه دانست. غلظت سرب در نمونه‌های بررسی شده بین ۰/۸ تا ۱۰۰/۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم متغیر بود، مقدار بسیار بالای ضریب تغییرات برای فلز سرب ($CV > 70$) بیانگر توزیع ناهمگن آن در مکان‌های مختلف منطقه می‌باشد (Zhang et al., 2015). منابع طبیعی سرب در خاک مربوط به ترکیب مواد مادری خاک از جمله کانی‌های رسی، مواد آلی، اکسیدهای منگنز و هیدروکسیدهای آهن و آلومینیوم است، این در حالی است که عمدتاً منابع انسانی سرب شامل معادن فلزات، باتری‌های فرسوده، رنگ‌های قدیمی با پایه سرب، ترافیک و فاضلاب‌ها می‌باشد (Salminen et al., 2005). با توجه به اینکه بیشترین آلودگی سرب در محدوده شمالی منطقه و در نزدیکی فعالیت‌های صنعتی از جمله صنایع فولاد خوزستان و همچنین در مسیر جاده‌ها به دلیل تردد ماشین‌آلات منطقه مشاهده گردید، می‌توان بیان کرد فعالیت‌های انسانی نقش مهمی در افزایش میزان سرب در خاک‌های منطقه دارا می‌باشند. بر اساس نتایج جدول ۲، غلظت روی در نمونه‌های مورد بررسی بین ۳۴/۵ تا ۲۹۴/۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم با میانگین ۶۰/۲۶ بود. پراکنش آلودگی روی در شمال منطقه مطالعه و در مجاورت مناطق صنعتی به خصوص صنایع فولاد خوزستان، بیشتر از سایر نقاط بود. (Salminen et al., 2005) بیان داشتند که میزان روی در خاک با ماهیت سنگ مادری، بافت خاک، ماده آلی و اسیدیته خاک در ارتباط است، همچنین منابع انسانی روی شامل فعالیت‌های صنعتی مانند معدن‌کاری، پرداخت فولاد و زغال سنگ است. میانگین غلظت نیکل در منطقه مورد بررسی ۵۰/۹۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم و ضریب تغییرات این فلز ۳۱ درصد بود. نیکل نسبت به سرب و روی دارای تغییرات غلظت کمتری در منطقه بود و بیشترین غلظت نیکل نیز در نزدیکی مناطق صنعتی دیده شد.

$$\text{MPI} = \sqrt{\frac{\text{EF}_{\text{Fav}}^2 + \text{EF}_{\text{max}}^2}{2}} \quad \text{رابطه ۵:}$$

که در آن EF_{Fav} و EF_{max} مقادیر متوسط و حداکثر EF هستند. این شاخص ۵ کلاس آلودگی را نشان می‌دهد: $\text{MPI} < 1$ ، $1 < \text{MPI} < 2$ ، $2 < \text{MPI} < 3$ ، $3 < \text{MPI} < 5$ ، $5 < \text{MPI} < 10$ و $\text{MPI} > 10$ که به ترتیب نشان‌دهنده عدم آلودگی، آلودگی کم، آلودگی متوسط، آلودگی متوسط تا زیاد، آلودگی زیاد و آلودگی شدید است (Keshavarzi and Kumar, 2019).

منابع فلزات سنگین

برای یافتن منبع فلزات در خاک از روش‌های آماری چند متغیره مانند آنالیز همبستگی پیرسون^۱، تحلیل خوشه‌ای^۲ (CA) و تحلیل مؤلفه‌های اصلی^۳ (PCA) استفاده شد. تحلیل خوشه‌ای با استفاده از روش Wards و فاصله اقلیدسی به‌عنوان معیار تشابه انجام و نتایج در قالب دندروگرام ارائه شد. همچنین تجزیه مؤلفه‌های اصلی با استفاده از چرخش واریماکس^۴ و با در نظر گرفتن مقادیر ویژه بزرگ‌تر از واحد برای شناسایی مؤلفه‌های اصلی انجام شد. کلیه روش‌های آماری در محیط نرم‌افزار SPSS نسخه شماره ۲۶ بررسی شدند (Kumar et al., 2016).

بحث و نتیجه‌گیری

توصیف آماری

خلاصه آمار توصیفی برخی ویژگی‌های خاک در جدول ۱ ارائه شده است. مطابق با نتایج به‌دست آمده خاک‌های منطقه مورد مطالعه با مقدار میانگین کربن آلی ۰/۷۱ در زمره خاک‌های فقیر از لحاظ ماده آلی محسوب می‌گردند. از سوی دیگر دامنه تغییرات pH خاک‌های منطقه در محدوده خنثی تا کمی قلیایی است (۷/۱-۹) و دامنه هدایت الکتریکی در خاک‌های منطقه (بین ۰/۴۱ تا ۳۰۶/۵ دسی‌زیمنس بر متر) نشان‌دهنده توزیع خاک‌های شور و غیر شور در منطقه می‌باشد. بافت غالب خاک‌های منطقه مورد بررسی، لوم است. بر اساس طبقه‌بندی (Wilding, 1985) در منطقه مورد مطالعه میزان ضریب تغییرات شن، رس، کربن آلی و هدایت الکتریکی خاک در کلاس تغییرپذیری بالا، طبقه‌بندی می‌گردند. ضریب تغییرپذیری بالا در برخی از این ویژگی‌ها می‌تواند ناشی از تغییر کاربری اراضی، هوازگی و فرسایش، فعالیت‌هایی مانند عملیات حفاری و یا دیگر عوامل تغییردهنده شرایط خاک باشد (Amuno et al., 2013).

در جدول ۲ خلاصه آمار توصیفی فلزات با پتانسیل آلاینده‌گی در منطقه مورد مطالعه آورده شده است. بر این اساس، میانگین غلظت این

جدول ۱- آمار توصیفی ویژگی‌های خاک (عمق خاک ۰-۱۰ سانتی‌متر)

Table 1- Descriptive statistics of the soil properties (0-10 cm soil depth) (N = 200)

ویژگی‌های خاک Soil properties	حداقل Min	حداکثر Max	میانگین Mean	انحراف معیار Std.dev	چولگی Skewness	کشیدگی Kurtosis	ضریب تغییرات CV(%)
درصد شن Sand (%)	9.00	98.00	34.17	13.32	1.59	4.19	38.98
درصد سیلت Silt (%)	1.00	75.00	45.00	12.80	-0.17	0.18	28.40
درصد رس Clay (%)	1.00	51.00	20.82	10.80	0.27	-0.64	52.00
درصد کربن آلی Soil Organic C (%)	0.24	1.70	0.71	0.37	7.59	85.41	52.00
جرم مخصوص ظاهری Bulk Density (gr/cm ³)	0.98	1.76	1.24	0.11	1.06	3.48	8.62
رسانایی الکتریکی Electrical Conductivity (dS/m)	0.41	306.00	13.53	32.86	6.90	51.51	242.86
واکنش خاک pH	7.10	9.00	7.84	0.32	0.57	0.55	4.08

همبستگی بین فلزات سنگین و ویژگی‌های خاک

نتایج همبستگی پیرسون بین ویژگی‌های خاک و عناصر مورد بررسی در جدول ۳ ارائه شده است. روابط بین ویژگی‌های خاک و فلزات در خاک، اطلاعات مهمی درباره منابع این عناصر و مسیرهای آن‌ها در محیط‌زیست ارائه می‌دهد (Dragović *et al.*, 2008). نتایج به‌دست آمده بیانگر همبستگی منفی کروم با رس و pH در سطح آماری ۰/۰۵ نشان می‌باشد، همچنین فلز نیکل همبستگی منفی با ذرات شن و همبستگی مثبت با سیلت در سطح آماری ۰/۰۱ داشت. (Suresh *et al.*, 2012) در مطالعه‌ای مشابه علت همبستگی مثبت نیکل با سیلت را در نوع کاتیون‌های موجود در سطح این ذره و مقدار فلزات در خاک دانستند.

پژوهش‌های مختلف نشان می‌دهد آلودگی نیکل در خاک به‌طور کلی ناشی از مواد شیمیایی کشاورزی یا رسوب ناشی از فعالیت‌های صنعتی است (Maas *et al.*, 2010). کمترین مقدار ضریب تغییرات در منطقه مربوط به فلز کروم (۸/۷۹ درصد) بود در نتیجه می‌توان گفت فلز کروم توزیع همگنی در منطقه مورد مطالعه دارد. (Baltas *et al.*, 2020) در مطالعه‌ای بر روی خاک‌های استان سینوب ترکیه گزارش دادند عدم وجود تغییرات زیاد یک عنصر در یک منطقه بیانگر محدود بودن عوامل دخیل در تغییر غلظت این فلز در منطقه می‌باشد و می‌توان بیان کرد که غلظت این فلز بیشتر تحت تأثیر منابع زمین‌زاد است. همچنین ضریب تغییرات بالای برخی از ویژگی‌های خاک و تغییرات زیاد این ویژگی‌ها در خاک منطقه را نیز، می‌توان دلیل دیگر عدم یکنواختی توزیع فلزات با پتانسیل آلاینده‌گی در منطقه دانست (Cerqueira *et al.*, 2012 Arenas-Lago *et al.*, 2014).

جدول ۲- آمار توصیفی عناصر در منطقه مورد مطالعاتی (بر حسب میلی‌گرم بر کیلوگرم)

Table 2- Descriptive statistics of studied elements (mg/kg)

عنصر Element	حداقل Minimum	حداکثر Maximum	میانگین Mean	انحراف معیار Standard deviation	چولگی Skewness	کشیدگی Kurtosis	ضریب تغییرات CV (%)	میانگین پوسته زمین Earth's crust average
روی (Zn)	34.5	294.3	60/26	25.43	5.97	44.40	42.00	75
کروم (Cr)	2.5	86.40	50.38	4.48	2.31	10.50	8.79	100
نیکل (Ni)	40.60	75.00	50.96	12.67	-0.17	0.60	31.00	80
سرب (Pb)	0.80	100.50	7.08	15.85	4.40	23.45	182.45	14

CV: Coefficient of variability

جدول ۱- همبستگی بین ویژگی‌های خاک و فلزات سنگین
Table 3- Pearson's correlation analysis of soil properties and heavy metal concentration

جرم مخصوص ظاهری (BD)	کربن آلی (SOC)	رس (Clay)	سیلت (Silt)	شن (Sand)	رسانایی الکتریکی (EC)	واکنش خاک (pH)	سرب (Pb)	نیکل (Ni)	کروم (Cr)	روی (Zn)
روى (Zn)										1
کروم (Cr)									0.07	1
نیکل (Ni)								0.242**	0.059	1
سرب (Pb)							0.394**	0.193	0.395**	1
واکنش خاک (pH)						1	0.007	-0.151*	-0.069	-0.022
رسانایی الکتریکی (EC)					1	0.177*	-0.031	0.048	-0.085	-0.006
شن (Sand)				1	-0.080	-0.261**	-0.011	-0.267**	0.091	-0.045
سیلت (Silt)			1	-0.595**	0.345**	-0.364**	0.108	0.267**	0.058	-0.019
رس (Clay)		1	-0.375**	-0.466**	0.052	0.072	-0.127	0.006	-0.156*	0.068
کربن آلی (SOC)	1	-0.131	0.189	-0.043	0.047	-0.159	-0.113	-0.058	0.015	-0.127
جرم مخصوص ظاهری (BD)	0.174*	-0.071	0.040	0.051	0.053	-0.031	-0.045	0.149*	-0.121	-0.075

** و * به ترتیب معنی‌داری در سطح احتمال ۱ و ۵ درصد.

* and ** indicates significant at $P < 0.05$ and at $P < 0.01$, respectively. SOC: Soil Organic C; EC: Electrical Conductivity

اختصاص داد و بارگذاری مثبت بالا با سیلت و بارگذاری متوسط با نیکل نشان داد. مؤلفه سوم دارای بارگذاری مثبت بر روی شن و کروم بود و ۱۶/۶۴ درصد از واریانس کل را توضیح داد و مؤلفه چهارم با ۱۱/۲۵ درصد از واریانس کل، دارای حداکثر بارگذاری روی جرم مخصوص ظاهری بود. مؤلفه اول شامل عناصر روی، سرب و نیکل را با توجه به اینکه غلظت‌های بالای این عناصر در نزدیکی مناطق صنعتی در مقایسه با سایر نقاط دیده می‌شود، می‌توان به عنوان مؤلفه تحت تأثیر عملکرد انسانی دانست. این در حالی است که رودریگز و همکاران (Rodríguez *et al.*, 2008) بیان داشتند مواد مادری و فرآیندهای پدوژنیک عوامل اصلی در میزان و توزیع نیکل و کروم در خاک هستند، از این رو با توجه به اینکه فلز نیکل دارای بارگذاری مثبت و متوسط در هر دو مؤلفه اول و مؤلفه دوم داشت و توزیع غلظت یکنواخت‌تری نسبت به روی و سرب در منطقه داشت، می‌توان بیان داشت فلز نیکل تحت تأثیر عملکرد هر دو عامل زمین‌زاد و انسان‌زاد می‌باشد. در همین راستا هرمزی و همکاران (Hormozi Nejad *et al.*, 2017) نیز در مطالعه ای مشابه در خاک‌های اطراف صنایع فولاد خوزستان گزارش دادند فلزات آهن و نیکل تحت تأثیر عملکرد هر دو عامل طبیعی و انسانی، فلزات روی، سرب و منگنز تحت تأثیر عامل انسان‌زاد و فلز کروم هم احتمالاً دارای منشأ طبیعی در این منطقه است. نتایج به دست آمده از تجزیه و تحلیل خوشه‌ای (CA) همانند نتایج تجزیه مؤلفه‌های اصلی (PCA) بود و آن را تایید می‌کند (شکل ۲). این نتایج دو خوشه اصلی را

در سطح آماری ۰/۰۱ همبستگی معنی‌داری بین عناصر روی-سرب، روی-نیکل و سرب-نیکل مشاهده شد. اما فلز کروم، همبستگی مثبت معنی‌داری با دیگر عناصر نشان نداد. بر اساس مطالعه (Thollkappian *et al.*, 2018) ضریب همبستگی مثبت بین فلزات سنگین در خاک ممکن است نشان‌دهنده منبع مشترک و یا قرار گرفتن در معرض پدیده‌های ژئوشیمیایی مشابه در طی زمان باشد. همچنین (Damian *et al.*, 2012) بیان داشتند همبستگی ضعیف بین فلزات دارای پتانسیل آلاینده‌ی، بیشتر مربوط به مواد سازنده خاک می‌باشد.

تجزیه و تحلیل آماری چند متغیره ویژگی‌های خاک

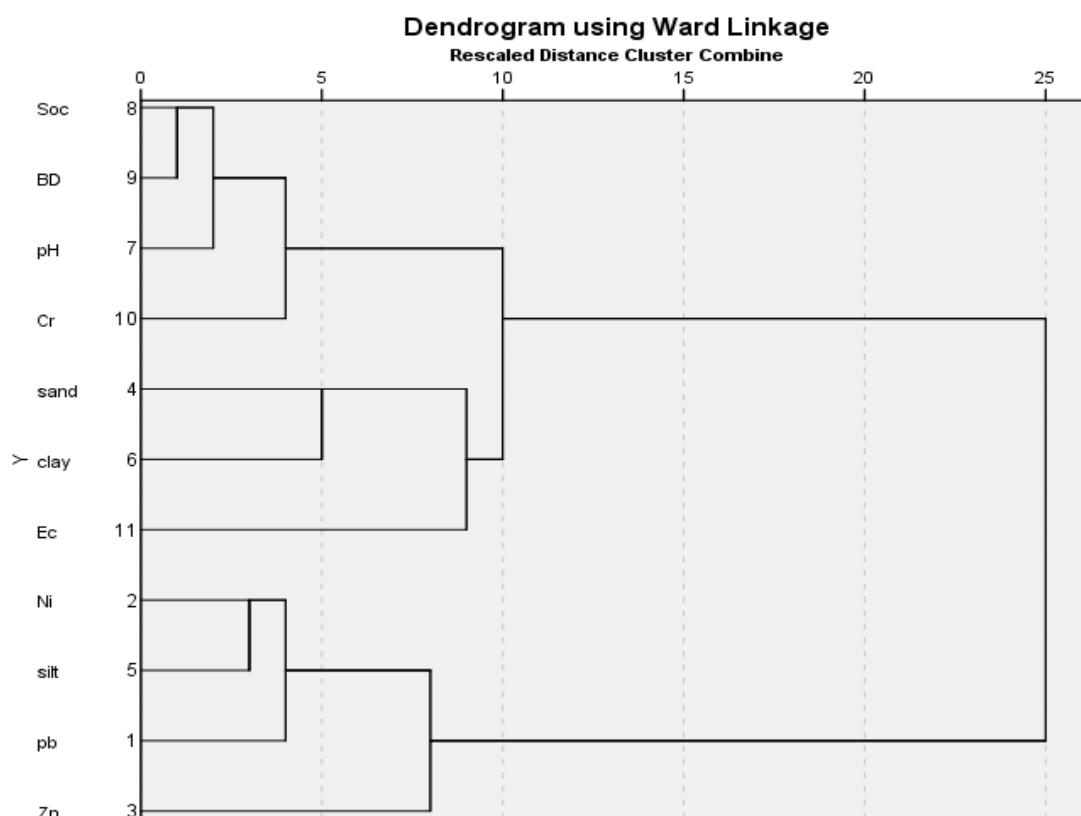
تجزیه مؤلفه‌های اصلی (PCA) از روش‌های آماری چند متغیره است که برای ارزیابی میزان آلودگی فلزات و شناسایی منبع احتمالی فلزات مورد بررسی در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفت (جدول ۴). واریانس، ۷۲٪ از کل واریانس موجود را در نمونه‌های خاک با مقادیر ویژه بیشتر از یک را به خود اختصاص می‌دهند. در چرخش واریانس مقادیر عامل‌های با فاکتور وزنی بیش‌تر از ۰/۷۱ قابل توجه و مقادیر کمتر از ۰/۳۱ ضعیف در نظر گرفته می‌شوند (Yinxian *et al.*, 2011). بر همین اساس، مؤلفه اول با ۲۳/۴۸ درصد از واریانس کل، دارای عامل وزنی مثبت و همبستگی بالا با عناصر روی، سرب و همبستگی متوسط با نیکل داشت. مؤلفه دوم ۲۰/۷۶ درصد از کل واریانس را به خود

عنصری به صورت حداقل، حداکثر و میانگین نمایش داده شده است. با توجه به این داده‌ها، میانگین فاکتور آلودگی (CF) در همه نمونه‌ها کمتر از ۱ و در محدوده آلودگی کم می‌باشد. از نظر شاخص CF تنها ۱/۵ درصد از نمونه‌ها آلودگی شدید و ۱۰ درصد دارای آلودگی متوسط به عنصر روی بودند و در سایر نمونه‌ها آلودگی مشاهده نگردید. همچنین ۲ درصد از نمونه‌های خاک از نظر عنصر سرب دارای آلودگی شدید و ۸ درصد دارای آلودگی متوسط بودند. با توجه به طبقه‌بندی این شاخص ۱۰۰ درصد نمونه‌های خاک از نظر عناصر کروم و نیکل در طبقه با آلودگی کم قرار دارند. علاوه بر این، متوسط مقدار شاخص غنی‌شدگی (EF) برای فلزات سرب (۱/۹۳)، نیکل (۲/۶۱)، روی (۳/۵۰) و کروم (۲/۰۷) به دست آمد، این نشان می‌دهد که در منطقه مورد مطالعه میانگین تغییر فاکتور غنی‌شدگی دارای روند: سرب > کروم > نیکل > روی می‌باشد. با توجه به میانگین این شاخص، سطح غنی‌شدگی برای عناصر روی، کروم و نیکل متوسط و برای فلز سرب کم می‌باشد.

نشان می‌دهد که فلز کروم، pH، کربن آلی، شن، رس، جرم مخصوص ظاهری و EC در یک خوشه و عناصر روی، سرب، نیکل و سیلت خوشه دیگر را تشکیل می‌دهند. خوشه اول شامل ویژگی‌هایی است که عمدتاً متأثر از مواد مادری و فرآیندهای خاک‌سازی می‌باشند، در نتیجه می‌توان بیان کرد فلز کروم در منطقه دارای منشأ زمین‌زاد می‌باشد و فلزات روی و سرب با توجه به نحوه پراکنش و افزایش در مجاورت مناطق صنعتی و جاده‌های پر حمل‌ونقل در منطقه، بیشتر تحت تأثیر عامل انسان‌زاد می‌باشند. که این نتایج به‌خوبی با تحلیل همبستگی پیرسون مطابقت دارند.

ارزیابی آلودگی فلزات سنگین

در این مطالعه از شاخص‌های ژئوشیمیایی تک عنصری CF، EF، Igeo و شاخص‌های ترکیبی PI و MPI برای درجه‌بندی سطوح آلودگی خاک‌های منطقه استفاده شد. در جدول ۵ مقدار شاخص‌های تک



شکل ۲- تحلیل خوشه‌ای ویژگی‌های مختلف خاک در منطقه مورد مطالعه

Figure 2- Cluster analysis of different soil properties in the study area

جدول ۴- تجزیه مؤلفه‌های اصلی در نمونه‌های خاک سطحی

Table 4- Principal component analysis of the surface soil properties (0-10 cm soil depth)

	روی (Zn)	کروم (Cr)	نیکل (Ni)	سرب (Pb)	اسیدیته (pH)	رسانایی الکتریکی (EC)	شن (Sand)	سیلت (Silt)	رس (Clay)	کربن آلی (SOC)	جرم مخصوص ظاهری (BD)
مؤلفه اول PC1	0.714	0.134	0.604	0.836	0.034	0.035	-0.097	0.119	-0.031	-0.175	0.019
مؤلفه دوم PC2	-0.101	0.145	0.343	0.081	-0.641	0.051	-0.626	0.877	-0.225	0.391	0.044
مؤلفه سوم PC3	-0.080	0.402	-0.161	0.160	0.023	0.315	0.724	0.028	-0.966	0.281	0.170
مؤلفه چهارم PC4	-0.093	-0.599	0.251	-0.133	0.188	0.117	-0.033	0.029	0.073	0.311	0.792

Results of principal components analysis in the soils studied

نتایج تجزیه مؤلفه‌های اصلی در خاک‌های مورد بررسی

مؤلفه‌های اصلی (Principal components)	مؤلفه اول PC1	مؤلفه دوم PC2	مؤلفه سوم PC3	مؤلفه چهارم PC4
مقادیر بردار ویژه >1 (Eigen value >1)	2.580	2.131	1.637	1.230
واریانس (Variance)	23.484	20.760	16.639	11.247
درصد تجمعی (Cumulative variance)	23.484	44.246	11.247	72.132

تشخیص داده شدند، بیشترین میزان زمین انباشتگی نیز در نزدیکی شهرک‌های صنعتی و به خصوص صنایع فولاد خوزستان دیده شد. به‌طورمیانگین شاخص زمین انباشتگی روند سرب <کروم >روی > نیکل را نشان داد. مقایسه میانگین شاخص زمین انباشتگی موجود در **جدول ۵** با طبقه‌بندی مولر نشان می‌دهد خاک منطقه نسبت به فلزهای مورد مطالعه کاملاً غیر آلوده است.

ارزیابی آلودگی فلزات سنگین بر اساس دو شاخص ترکیبی (PI) و (MPI) در **جدول ۶** ارائه شده است. بر اساس مقدار عددی میانگین شاخص‌های (PI) و (MPI) کلاس آلودگی شدید را در خاک‌های منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهند؛ که بیانگر شدت بالای آلودگی تجمعی این فلزات در منطقه می‌باشد.

با این حال مقدار میانگین فاکتور غنی‌شدگی کلیه عناصر مورد مطالعه در منطقه بیشتر از ۱/۵ بود که این امر نشان‌دهنده سهم زیاد فعالیت‌های انسانی در آلودگی محیطی است (Rashed, 2010). غنی‌شدگی فلزات مورد بررسی در برخی نمونه‌های خاک سطحی را می‌توان به فعالیت‌های انسانی از جمله فعالیت‌های صنعتی در منطقه، حمل‌ونقل و ترافیک و کاربرد سموم دفع آفات، کود و غیره مربوط دانست. محاسبه و بررسی شاخص زمین انباشتگی نشان داد که بیشتر نمونه‌های جمع‌آوری شده از منطقه مورد نظر در کلاس غیر آلوده قرار دارند و تنها ۲ درصد از نمونه‌های خاک از نظر عنصر روی و نیکل، کمی آلوده بودند، همچنین در ۱۰ درصد از نمونه‌های خاک انباشتگی متوسط فلز سرب دیده شد و بقیه نمونه‌ها فاقد انباشتگی عناصر با پتانسیل آلاینده‌گی

جدول ۵- آمار توصیفی برخی شاخص‌های آلودگی فلزات سنگین در منطقه مورد مطالعه

Table 5- Descriptive statistics of some indices of heavy metal pollution in the study area

عنصر	شاخص آلودگی (CF)			شاخص غنی‌شدگی (EF)			شاخص زمین انباشت (Igeo)		
	حداقل	حداکثر	میانگین	حداقل	حداکثر	میانگین	حداقل	حداکثر	میانگین
	Minimum	Maximum	Mean	Minimum	Maximum	Mean	Minimum	Maximum	Mean
روی (Zn)	0.49	4.21	0.86	1.81	18.90	3.50	-1.11	1.41	-0.76
کروم (Cr)	0.02	0.86	0.50	0.10	4.16	2.07	-5.75	-0.64	-1.51
نیکل (Ni)	0.50	0.94	0.64	1.86	4.64	2.61	-0.74	0.14	-0.42
سرب (Pb)	0.02	7.18	0.50	0.09	21.87	1.93	-6.05	2.33	-2.48

جدول ۶- مقادیر شاخص‌های شاخص جامع آلودگی نمره (PI) و شاخص آلودگی اصلاح شده (MPI)

Table 6- The values of Nemerow Comprehensive Pollution Index (PI) and Modified Pollution Index (MPI)

شاخص جامع آلودگی نمره (PI)				
شاخص جامع آلودگی نمره (PI)	سرب (Pb)	نیکل (Ni)	کروم (Cr)	روی (Zn)
9.59	5.09	0.77	0.71	2.99
شاخص آلودگی اصلاح شده (MPI)				
شاخص کلی آلودگی اصلاح شده (MPI)	سرب (Pb)	نیکل (Ni)	کروم (Cr)	روی (Zn)
42.83	22.86	3.77	3.29	12.91

مرکزی استان خوزستان انجام گرفت. بر اساس نتایج، متوسط غلظت کل عناصر سرب، کروم، نیکل و روی، در خاک‌های منطقه مورد مطالعه، کمتر از دستورالعمل سازمان حفاظت محیط‌زیست ایران و میانگین متوسط پوسته زمین مشاهده گردید. همچنین نتایج ماتریس ضریب همبستگی پیرسون نشان داد که فلزات سرب، نیکل و روی همبستگی مثبتی با یکدیگر داشته و همچنین غلظت فلز نیکل با محتوای سیلت خاک همبستگی مثبتی دارد. از نتایج CA و PCA، مشخص شد که هر دو عامل طبیعی و انسانی سهم بالایی در توزیع غلظت فلزات مورد بررسی در خاک‌های سطحی منطقه دارند. بررسی شاخص‌های آلودگی نشان داد که خاک‌های منطقه مورد مطالعه بر اساس شاخص‌های تک عنصری CF و Igeo در کلاس آلودگی کم و بر اساس شاخص EF در کلاس غنی‌شدگی متوسط قرار می‌گیرند. این در حالی است که نتایج شاخص‌های تجمعی و یکپارچه PI و MPI حاکی از آلودگی شدید نمونه‌های خاک منطقه به عناصر انتخابی بود. این نتایج نشان داد استفاده هم‌زمان از روش‌های آماری چند متغیره و شاخص‌های آلودگی می‌تواند به منظور ارزیابی کمی و تعیین پتانسیل آلودگی مفید باشد.

سپاسگزاری

هزینه‌های اجرای این پژوهش توسط معاونت پژوهشی، فناوری و ارتباط با جامعه دانشگاه شهید چمران اهواز (پژوهانه شماره SCU.AS1401.50) پرداخت شده است.

در همین راستا تحقیقات (Jiang et al., 2014) و (Zheng et al., 2015) نیز نشان داد که شاخص‌های ترکیبی از جمله شاخص آلودگی نمره به دلیل جامع بودن و عدم تمرکز بر آلودگی یک عنصر خاص، در پهنه‌بندی و ارزیابی شدت آلودگی و بررسی کیفیت اراضی از کارایی بالاتری برخوردار هستند. (Siyahati Ardakani et al., 2019) نیز در منطقه صنعتی اردکان با هدف ارزیابی اثر توسعه صنایع فولاد بر تجمع برخی عناصر کمیاب، به مقایسه عملکرد شاخص‌های تک عنصری و ترکیبی پرداختند و نتیجه گرفتند که شاخص‌های ترکیبی از جمله شاخص بار آلودگی در ارزیابی آلودگی و کیفیت خاک منطقه از کارایی بالاتری برخوردار بود. به‌طور کلی بررسی شاخص‌های آلودگی نشان داد که خاک‌های سطحی منطقه مورد مطالعه بر اساس شاخص‌های تک عنصری (CF و Igeo) به فلزات روی، نیکل، کروم و سرب، آلوده نیستند اما غنی‌شدگی متوسط این عناصر در خاک سطحی منطقه وجود دارد، با این حال نتایج به دست آمده از شاخص‌های ترکیبی آلودگی اصلاح شده و جامع آلودگی نمره بیانگر شدت بالای آلودگی تجمعی این فلزات در منطقه می‌باشد.

نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با هدف ارزیابی آلودگی خاک به عناصر روی، نیکل، کروم و سرب با استفاده از شاخص‌های مختلف زیست‌محیطی و بهره‌مندی از روش‌های آماری چند متغیره جهت شناسایی منابع احتمالی آلودگی و تعیین توزیع مکانی غلظت این عناصر در قسمتی از اراضی

منابع

- Abyat, A., Azhdari, A., Jodaki, M., and Darvishi Khatoni, J. (2017). Study and separation of Quaternary sedimentary environments in Khuzestan plain. *Advanced Applied Geology*, 7(3): 49-64. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22055/aag.2017.21931.1702>.
- Al-Wabel, M.I., Sallam, A.E.A.S., Usman, A.R., Ahmad, M., El-Naggar, A.H., El-Saeid, M.H., and Al-Romian, F.A. (2017). Trace metal levels, sources, and ecological risk assessment in a densely agricultural area from Saudi Arabia. *Environmental Monitoring and Assessment*, 189(6): 252. <https://doi.org/10.1007/s10661-017-5919-1>.
- Adimalla, N. (2020). Heavy metals pollution assessment and its associated human health risk evaluation of urban soils from Indian cities: a review. *Environmental Geochemistry and Health*, 42(1): 173-190.
- Adimalla, N., and Wang, H. (2018). Distribution, contamination, and health risk assessment of heavy metals in surface soils from northern Telangana, India. *Arabian Journal of Geosciences*, 11: 684. <https://doi.org/10.1007/s12517-018-4028-y>.
- Ahmed, F., Fakhruddin, A.N.M., Imam, M.D., Khan, N., Khan, T.A., Rahman, M.M., and Abdullah, A.T.M. (2016).

- Spatial distribution and source identification of heavy metal pollution in roadside surface soil: a study of Dhaka Aricha highway, Bangladesh. *Ecological Processes* 5:2.
6. Amuno, S.A. (2013). Potential ecological risk of heavy metal distribution in cemetery soils. *Water, Air and Soil Pollution* 224 (2):1435.
 7. Arenas-Lago, D., Vega, F.A., Silva, L.F.O., and Andrade, M.L. (2014). Copper distribution in surface and subsurface soil horizons. *Environmental Science and Pollution Research*, 21:10997–11008.
 8. Baltas, H., Sirin, M., Gokbayrak, E., and Ozcelik, A.E. (2020). A case study on pollution and a human health risk assessment of heavy metals in agricultural soils around Sinop province, Turkey. *Chemosphere*, 241: 125015. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.125015>.
 9. Barakat, A., Ennaji, W., Krimissa, S., and Bouzaid, M. (2019). Heavy metal contamination and ecological-health risk evaluation in peri-urban wastewater-irrigated soils of BeniMellal city (Morocco). *International Journal of Environmental Health Research*. <https://doi.org/10.1080/09603123.2019.1595540>.
 10. Bhuiyan, M.A.H., Parvez, L., Islam, M., Dampare, S.B., and Suzuki, S. (2010). Heavy metal pollution of coal mine-affected agricultural soils in the northern part of Bangladesh. *Journal of Hazardous Materials*, 173:384–392.
 11. Black, G., and Hartge, K. (1986). Bulk density. *Methods of Soil Analysis. Part 1 Physical and Mineralogical Properties, Including Statistics of Measurement and Sampling*.
 12. Brady, J.P., Ayoko, G.A., Martens, W.N., and Goonetilleke, A. (2015). Development of a hybrid pollution index for heavy metals in marine and estuarine sediments. *Environmental Monitoring and Assessment*, 187(5): 306.
 13. Cerqueira, B., Vega, F.A., Silva, L.F., and Andrade, L. (2012). Effects of vegetation on chemical and mineralogical characteristics of soils developed on a decantation bank from a copper mine. *Science of the Total Environment*, 421:220–229.
 14. Damian, F., Damian, G., Lăcătușu, R., Macovei, G., Iepure, G., Năprădean, I., Chira, R., Kollar, L., Rață, L., and Zaharia, D.C. (2008). Soils from the Baia Mare zone and the heavy metals pollution. *Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences*, 3(1): 85-98.
 15. Dragović, S., Mihailović, N., and Gajić, B. (2008). Heavy metals in soils: distribution, relationship with soil characteristics and radionuclides and multivariate assessment of contamination sources. *Chemosphere*, 72 (3): 491–495.
 16. Gee, G.W. and Bauder, J.W. (1986). Particle size analysis, In A. Klute (Ed), *Methods of Soil Analysis. Part I, American Statistical Association and Soil Science Society of America (ASA) Monograph*.
 17. 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).
 18. Hojati, S. (2017). Pollution assessment and source apportionment of arsenic, lead and copper in selected soils of Khuzestan Province, southwestern Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 10:528. <https://doi.org/10.1007/s12517-017-3316-2>.
 19. Hormozi Nejad, F., Rastmanesh, F., and Zarasvandi, A. (2017). Contamination assessment of heavy metals in the soils around Khouzestan Steel Company (KSC) (Ni, Mn, Pb, Fe, Zn, Cr). *Journal of Economic Geology*, 8(2):429-415. (In Persian with English abstract).
 20. Huang, Y., Chen, Q., Deng, M., Japenga, J., Li, T., Yang, X., and He, Z. (2018). Heavy metal pollution and health risk assessment of agricultural soils in a typical peri-urban area in Southeast China. *Journal of Environmental Management*, 207:159–168.
 21. Ielpo, P., Leardi, R., Pappagallo, G., and Uricchio, V.F. (2017). Tools based on multivariate statistical analysis for classification of soil and groundwater in Apulian agricultural sites. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(16):13967–13978.
 22. Jiang, X., Lu, W., Zhao, H., Yang, Q., and Yang, Z. (2014). Potential ecological risk assessment and prediction of soil heavy-metal pollution around coal gangue dump. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 14(6):1599-610.
 23. Keshavarzi, A., and Kumar, V. (2019). Ecological risk assessment and source apportionment of heavy metal contamination in agricultural soils of northeastern Iran. *International Journal of Environmental Health Research*, 29(5): 1–17. <https://doi.org/10.1080/09603123.2018.1555638>.
 24. Kumar, V., Sharma, A., and Thukral, A.K. (2016). Assessment of soil enzyme activities based on soil samples from the Beas river bed, India using multivariate techniques. *Malaysian Journal of Soil Science*, 20:135–145.
 25. Kumar, V., Sharma, A., Bhardwaj, R. M., and Thukral, A. K. (2018). Temporal distribution, source apportionment, and pollution assessment of metals in the sediments of Beas River, India. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 24(8): 2162–2181.
 26. Loska, K., Wiechula, D., and Korus, I. (2004). Metal contamination of farming soils affected by industry. *Environment International*, 30 (2):159–165.
 27. Maas, S., Schei, R., Benslama, M., Crini, N., Lucot, E., Brahmia, Z., and Giraudoux, P. (2010). Spatial distribution of heavy metal concentrations in urban, suburban and agricultural soils in a Mediterranean city of Algeria. *Environmental Pollution*, 158: 2294– 2301.

28. Mirsal, I.A. (2008). Soil pollution: origin, monitoring and remediation. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-70777-6>
29. Nemerow, N.L. (1991). Stream, lake, estuary, and ocean pollution. New York (USA): John Wiley and Sons, Inc.
30. Qingjie, G., Jun, D., Yunchuan, X., Qingfei, W., and Liqiang, Y. (2008). Calculating pollution indices by heavy metals in ecological geochemistry assessment and a case study in parks of Beijing. *Journal of China University of Geosciences*, 19(3):230–241.
31. Rashed, M.N. (2010). Monitoring of contaminated toxic and heavy metals, from mine tailings through age accumulation, in soil and some wild plants at Southeast Egypt. *Journal of Hazardous Materials*, 178(1–3):739–746.
32. Rezapour, S., Golmohammad, H., and Ramezanpour, H. (2014). Impact of parent rock and topography aspect on the distribution of soil trace metals in natural ecosystems. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 11(7): 2075–2086.
33. Rodriguez, R., and Redman, R. (2008). More than 400 million years of evolution and some plants still can't make it on their own: plant stress tolerance via fungal symbiosis. *Journal of Experimental Botany*. 59: 1109–1114. <https://doi.org/10.1093/jxb/erm342>.
34. Salminen, R., Batista, M., Bidovec, M., Demetriades, A., DeVivo, B., DeVos, W., Duris, M., and Tarvainen, T. (2005). FOREGS Geochemical Atlas of Europe, Part 1 : Background Information, Geochemical Atlas of Europe Part 2 Interpretation of Geochemical Maps, Additional Tables, EuroGeoSurveys.
35. Sakram, G., Machender, G., Dhakate, R., Saxena, P. R., and Prasad, M. D. (2015). Assessment of trace elements in soils around Zaheerabad Town, Medak District, Andhra Pradesh, India. *Environmental Earth Sciences*, 73: 4511–4524.
36. Siyahati Ardakani, G., Mirsanjari, M., Azimzadeh, H., and Solgi, E. (2019). Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Topsoil Around Major Industries of Ardakan City. *Toloo-e-Behdasht Journal*, 17(6): 95-100. (In Persian with English abstract).
37. Song, T., Su, X., He, J., Liang, Y., and Zhou, T. (2018). Source apportionment and health risk assessment of heavy metals in agricultural soils in Xinglonggang, Northeastern China. *Human and Ecological Risk Assessment*, 24(2): 509–521.
38. Walkley, A. and Black, I.A. 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil science*, 37(1): 29-38.
39. Stafilov, T., Sajin, R., Boev, B., Cvetkovic, J., Mukaetov, D., Andreevski, M., and Lepitkova, S. (2010). Distribution of some elements in surface soil over the Kavadarci region, Republic of Macedonia. *Environmental Earth Sciences*, 61(7):1515–1530.
40. Suresh, G., Sutharsan, P., Ramasamy, V., and Venkatachalapathy, R. (2012). Assessment of spatial distribution and potential ecological risk of the heavy metals in relation to granulometric contents of Veeranam lake sediments, India. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 84: 117–124. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2012.06.027>.
41. Tian, K., Huang, B., Xing, Z., and Hu, W. (2017). Geochemical baseline establishment and ecological risk evaluation of heavy metals in greenhouse soils from Dongtai, China. *Ecological Indicators*, 72: 510–520.
42. Tholkappian, M., Ravisankar, R., Chandrasekaran, A., Jebakumar, J.P.P., Kanagasabapathy, K.V., Prasad, M.V.R., and Satapathy, K.K. (2018). Assessing heavy metal toxicity in sediments of Chennai Coast of Tamil Nadu using Energy Dispersive X-Ray Fluorescence Spectroscopy (EDXRF) with statistical approach. *Toxicology Reports*, 5:173–182.
43. Thomas, G.W. (1996). Soil pH and soil acidity. Methods of soil analysis. Madison (WI): American Society of Agronomy and Soil Science Society of America.
44. Turekian, K., and Wedepohl, K.H. (1961). Distribution of the elements in some major units of the earth's crust. *Geological Society of America Bulletin* 72: 175-192/
45. Wang, Y., Hu, J., Xiong, K., Huang, X., and Duan, S. (2012). Distribution of heavy metals in core sediments from Baihua Lake. *Procedia Environmental Sciences*, 16:51–58.
46. Wilding, L. P. (1985). Spatial variability: its documentation, accomodation and implication to soil surveys. In *Soil spatial variability*, Las Vegas NV, 30 November-1 December 1984.
47. Yalcin, M.G., Battaloglu, R., and Ilhan, S. (2007). Heavy metal sources in Sultan Marsh and its neighborhood, Kayseri, Turkey. *Environmental Geology*, 53(2): 399-415.
48. Ye, C., Li, S., Zhang, Y., and Zhang, Q. (2011). Assessing soil heavy metal pollution in the water-level-fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir, China. *Journal of Hazardous Materials*, 191(3): 366-372.
49. Yinxian, S., Junfeng, J., Zhongfang, Y., Xuyin, Y., Changping, M., Ray, F., and Ayoko, G. (2011). Geochemical behavior assessment and apportionment of heavy metal contaminants in the bottom sediments of lower reach of Changjiang River, *Catena*, 85:73 – 81
50. Yongming, H., Peixuan, D., Junji, C., and Posmentier, E.S. (2006). Multivariate analysis of heavy metal contamination in urban dusts of Xi'an, Central China. *Science of the Total Environment*, 355 (1– 3): 176– 186
51. Zhang, C., Yang, Y., Li, W., Zhang, C., Zhang, R., and Mei, Y. (2015). Spatial distribution and ecological risk assessment of trace metals in urban soils in Wuhan, central China. *Environmental Monitoring and Assessment*,

