



Study and investigation of heavy elements in the soil of Zabol and Birjand cities

Mohsen Farahi

Assistant Professor, Natural Engineering Department, Faculty of Natural Resources, Saravan Higher Education Complex, Saravan, Iran

Extended Abstract

Introduction

One of the most significant environmental challenges today is soil pollution, which is particularly evident in developing countries. This issue has consistently been a focal point of urban and environmental officials. Soil, as a fundamental component of living ecosystems, is essential for sustaining life on Earth. In addition to its crucial role in the continuity of life, soils have a significant impact on evolution and even the formation of life. They serve as a primary source for generating societal wealth and play a vital role in development projects and community health initiatives. Today, the accumulation of heavy metals and soil pollution in agricultural lands is recognized as one of the most vital issues in the field of environmental biology globally. This not only compromises the quality of agricultural products but also jeopardizes the sustainability of agricultural production. The entry of heavy metals into soil ecosystems occurs through human activities, and researchers believe that these pollutant sources may pose long-term risks to human health. This is because prolonged exposure to surface soils containing heavy metals can lead to serious health hazards through inhalation, ingestion, and skin absorption.

Materials and Methods

The study areas in this research include two counties: Birjand in South Khorasan Province and Zabol in Sistan and Baluchestan Province. In this study, a systematic grid sampling method was used for soil sampling. A total of 90 samples were collected, with a distance of 200 meters between each sample on both sides of the road. The sampling depth was 0-25 cm. After sampling, the samples were transferred to the laboratory. Finally, 12 elements (Al, Mn, Fe, Cr, Zn, Ni, Ti, Co, Cd, Cu, As, Pb) were analyzed in the soil samples using the ICP-OES instrument (Varian 710-ES model). Then, three indices, including Muller's accumulation index, contamination factor, cumulative pollution index, and enrichment factor, were used to assess the degree of contamination in the soil samples. The Pearson correlation matrix in R software was also employed to examine the relationships between heavy metals present in the soil samples from the cities of Birjand and Zabol.

Results and Discussion

The levels of metals present in the soil of Birjand (compared to their concentration in the earth's crust) indicated high concentrations of lead, nickel, cadmium, zinc, copper, and chromium, which are related to human activities. According to the results obtained from the analysis of background soil samples, among the measured metals in Zabol city, the highest average concentration was found in aluminum and iron, while the lowest average concentration was observed in nickel. The results of the Pearson correlation analysis for heavy metals in Birjand city showed that copper, zinc, and arsenic had the highest negative correlation with other heavy metals, while the rest of the heavy metals showed a positive correlation with each other. The results of the Pearson correlation matrix for the concentration of heavy metals in the soil of Zabol city also showed that there is mostly a negative correlation between most elements, while in other cases, they exhibited a positive correlation. Based on the accumulation index, it can be stated that the origin of pollution in Birjand city due to chromium and lead is primarily anthropogenic. Additionally, the origin of other elements that fall within the non-polluted range can be attributed to the Earth's crust. On the other hand, in Zabol city, the accumulation index indicates soil pollution with nickel.

Conclusion

Based on the results of the study in the two cities of Zabol and Birjand, it can be concluded that the pollution status of heavy metals in these two cities differs significantly. Considering the correlation between heavy metals in soil samples from the cities of Birjand and Zabol, it was found that in Birjand, copper, zinc, and arsenic had negative

correlations with other heavy metals, while the rest of the heavy metals showed a positive correlation with each other. However, in Zabol city, most elements showed negative correlations. Nevertheless, the strongest positive correlations were observed between titanium and iron, titanium and manganese, arsenic and lead, and manganese and cobalt. These results indicate differences in the pattern of heavy metal pollution between the cities, which may be attributed to local factors such as industrial activities, traffic, and fuel consumption. Overall, this study highlights the need for further actions to control and reduce heavy metal pollution in both cities.

Keywords: Heavy metals, Accumulation coefficient, Pearson coefficient, Soil pollution.

Article Type: Research Article

Acknowledgement

We would like to express our sincere gratitude to the University of Zabol for their financial support in conducting this research.

Conflicts of interest

The authors of this article declare that there are no conflicts of interest regarding the writing and publication of the materials and results of this research.

Data availability statement

The data and results utilized in this research will be made available through correspondence with the corresponding author.

Authors' contribution

Mohsen Farahi: Conceptualization, Methodology, Software, Writing.

*Corresponding Author, E-mail: m.farahi@saravan.ac.ir

Citation: Farahi, M. (2025). Study and investigation of heavy elements in the soil of Zabol and Birjand cities. *Water and Soil Management and Modeling*, 5(1), 123-140.

doi:10.22098/mmws.2024.14753.1432

Received: 27 February 2024., Received in revised form: 07 April 2024, Accepted: 15 April 2024.,
Published online: 21 March 2025

Water and Soil Management and Modeling, Year 2025, Vol. 5, No. 1, pp. 123-140

Publisher: University of Mohaghegh Ardabili

© Author(s)





مطالعه و بررسی عناصر سنگین موجود در خاک شهرستان های زابل و بیرجند

محسن فراهی

استادیار، گروه مهندسی طبیعت، دانشکده منابع طبیعی، مجتمع آموزش عالی سراوان، سراوان، ایران

چکیده

خاک به عنوان عنصر اساسی در اکوسیستم های زنده جهت حفظ حیات در کره زمین ضروری است. یکی از مهم ترین مشکلات محیط زیستی امروزه، آلودگی خاک است به خصوص در کشورهای در حال توسعه بسیار مشهود است. این مشکل همواره یکی از نقاط توجه مسئولین شهری و محیط زیستی بوده است. هدف از این تحقیق بررسی عناصر سنگین موجود در خاک شهرستان های زابل و بیرجند است. به منظور بررسی میزان غلظت فلزات سنگین و نیز وضعیت آلودگی خاک در مناطق مورد مطالعه، از نمونه برداری خاک به روش شبکه ای منظم استفاده شد. تعداد ۹۰ نمونه خاک از دو شهرستان و با نمونه برداری از خاک سطحی (صفر تا ۲۵ سانتی متر) برداشت شد. پس از عملیات نمونه برداری، نمونه ها به آزمایشگاه انتقال یافت و پس از خشک شدن، از الک دو میلی متری عبور داده شد. سپس نمونه ها توسط دستگاه ICP-OES در آزمایشگاه مرکزی دانشگاه سیستان و بلوچستان تحلیل شدند. نتایج حاصل از بررسی همبستگی فلزات سنگین شهر بیرجند توسط ضریب پیرسون در نرم افزار R نشان داد عنصرهای مس، روی و آرسنیک بیشترین همبستگی منفی را با دیگر فلزات سنگین دارند؛ اما سایر فلزات سنگین رابطه مثبت با یکدیگر داشتند. نتایج ماتریس همبستگی پیرسون برای غلظت فلزات سنگین موجود در خاک شهر زابل نیز نشان داد که بین بیشتر عناصر همبستگی منفی وجود دارد و در سایر موارد همگی دارای رابطه همبستگی مثبت هستند. شاخص زمین انباشتگی نشان داد منشأ آلودگی شهر بیرجند با عنصر کروم و سرب بیشترین منابع انسانی دارد. همچنین، منشأ سایر عناصر که در محدوده غیر آلوده قرار داشتند را می توان از پوسته زمین دانست. از طرفی در شهر زابل شاخص زمین انباشتگی نشان از آلوده بودن خاک منطقه به نیکل است؛ لذا می توان نتیجه گرفت که این دو شهر در الگوی آلودگی فلزات سنگین متفاوت هستند و منشأ آن به عوامل محلی، مانند فعالیت های صنعتی، ترافیک و مصرف سوخت باز می گردد و نیازمند اقدامات بیشتر جهت کنترل و کاهش آلودگی فلزات سنگین در هر دو منطقه است.

واژه های کلیدی: فلزات سنگین، ضریب انباشتگی، ضریب پیرسون، آلودگی خاک.

نوع مقاله: پژوهشی

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: m.farahi@saravan.ac.ir

استناد: فراهی، محسن (۱۴۰۴). مطالعه و بررسی عناصر سنگین موجود در خاک شهرستان های زابل و بیرجند. مدل سازی و مدیریت آب و خاک، ۱۴۰-۱۲۳ (۱)، ۱۴۰-۱۲۳.

doi:10.22098/mmws.2024.14753.1432



تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۲/۰۸، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۱/۱۹، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۱/۲۷، تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۱/۰۱

مدل سازی و مدیریت آب و خاک، سال ۱۴۰۴، دوره ۵، شماره ۱، صفحه ۱۲۳ تا ۱۴۰

© نویسندگان

ناشر: دانشگاه محقق اردبیلی

۱- مقدمه

یکی از مهم‌ترین مشکلات محیط‌زیستی امروزه، آلودگی خاک است به‌خصوص در کشورهای در حال توسعه بسیار مشهود است. این مشکل همواره یکی از نقاط توجه مسئولین شهری و محیط‌زیستی بوده است (Zhang et al., 2020). خاک به‌عنوان عنصر اساسی در اکوسیستم‌های زنده جهت حفظ حیات در کره زمین ضروری است. در حال حاضر، آلودگی‌های صنعتی به‌عنوان عامل اصلی تخریب محیط‌زیست شناخته می‌شوند. تحقیقات فراوان نشان داده‌اند که مناطق اطراف فعالیت‌های صنعتی از آلودگی قابل‌توجهی در آب، خاک و هوا برخوردارند؛ بنابراین، فعالیت‌های صنعتی می‌توانند از طریق هوای تنفسی، آب مصرفی و خاک بر سلامت ساکنین نزدیک تأثیرگذار باشند و منجر به بروز بیماری‌ها و عوارض ناخواسته شوند (Skaldina et al., 2018). فعالیت‌های انسانی و دفع پسماندهای صنعتی در دهه‌های اخیر، آلودگی خاک به فلزات سنگین را به‌طور چشمگیری افزایش داده است (Ghemari et al., 2017; Zhang et al., 2015).

امروزه تراکم عناصر سنگین و آلودگی خاک‌ها به‌عنوان یکی از مسائل حیاتی در حوزه محیط‌زیست در سطح جهان شناخته می‌شود که علاوه بر کاهش کیفیت محصولات کشاورزی، پایداری تولیدات را به نیز خطر می‌اندازد (Blaster et al., 2000; Keshavarzi and Kumar, 2019; Nael et al., 2010; Taghipour et al., 2011). ورود عناصر سنگین به اکوسیستم‌های خاکی از طریق فعالیت‌های انسانی صورت می‌گیرد و محققان اعتقاد دارند که این منابع آلاینده در طولانی مدت ممکن است برای سلامت انسان خطرناک باشند، چرا که قرار گرفتن در معرض خاک‌های سطحی که حاوی فلزات سنگین است، در طولانی مدت ممکن است منجر به آسیب‌های جدی برای سلامت انسان از طریق تنفس، بلع، و جذب پوستی گردد (Ghanavati et al., 2019). خاک‌های آلوده، بر رشد ریشه و برگ گیاه تأثیر می‌گذارند و همچنین، از طریق زنجیره غذایی بر بقاء بیولوژیکی و سلامت انسانی تأثیر منفی دارند (Ali et al., 2013; Jaishankar et al., 2014).

آلودگی خاک به فلزات سنگین زمانی اتفاق می‌افتد که غلظت برخی از این فلزات بیش از حد معمول در منطقه باشد (Congeevaram et al., 2007; Dao et al., 2014). عوامل طبیعی مانند مواد مادری و فرآیندهای خاک‌سازی، و نیز عوامل انسانی از جمله انتشارات صنعتی، ترافیک، سوزاندن زغال‌سنگ و سوخت، دفع زباله و ساخت‌وسازها نقش اساسی در تعیین فراوانی نسبی غلظت فلزات سنگین در خاک ایفا می‌کنند (Li et al., 2018; Han et al., 2017). به‌عبارت دیگر، آلودگی خاک به

فلزات سنگین نتیجه‌ای از روند رو به رشد صنعتی شدن است (Wong et al., 2006). خاک به‌عنوان محل تجمع برای آلودگی فلزات سنگین در اکوسیستم عمل می‌کند. از این رو، به‌عنوان یک شاخص مهم برای اندازه‌گیری در معرض قرار گرفتن به فلزات سنگین در محیط‌های شهری به‌عنوان شاخصی مهم برای اندازه‌گیری حائز اهمیت است (Wong et al., 2006). تعدادی از فلزات از جمله سرب، کادمیم، روی و کروم که بیش‌تر به نام فلزات شهری شناخته می‌شوند و به‌عنوان تهدید مستقیم برای آلودگی احتمالی اکوسیستم‌ها مطرح هستند (Rose and Shea, 2007). برای ارزیابی آلودگی فلزات سنگین در رسوبات و خاک، روش‌های متعددی ارائه شده است (Kowalska et al., 2018) و شاخص‌های آلودگی به‌طور گسترده برای ارزیابی جامع میزان آلودگی و تعیین نقش آلودگی‌های زمین‌زاد و انسان‌زاد به‌کار گرفته می‌شوند (Kesler et al., 2015). تحقیقات فراوانی در زمینه ورود فلزات سنگین به محیط خاک در مناطق مختلف انجام شده است. (Ebrahimi et al., 2020) آلودگی فلزات سنگین در خاک‌های منطقه شوراب واقع در جنوب کاشمر را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آنان نشان داده است که عوامل زمین‌زاد نقش اساسی در این آلودگی دارند، ولی عوامل انسان‌زاد مانند معدن‌کاری نیز در این موضوع دخالت داشته‌اند. (Jamshidi et al., 2020) به تأثیر فلزات سنگین و منشأ آن‌ها در شرق شهرستان ازنا پرداخته و نتیجه گرفته‌اند که منشأ فلزات سنگین در این منطقه وابستگی خاصی به عوامل انسانی ندارد و بیش‌تر تحت تأثیر خصوصیات خاک و سنگ‌های منطقه قرار دارند. (Fazel Valipour, 2022) تحقیقی انجام داده است که به بررسی آلودگی فلزات سنگین و منشأ آن‌ها در خاک جنوب غرب کاشمر در استان خراسان رضوی می‌پردازد. نتایج این تحقیق نشان داده است که بین فلزات سنگین مورد بررسی از جمله Cu, Mo, Mn, Cd, Th, Sr, Co, Pb و As بیش‌ترین و کم‌ترین میانگین غلظت به‌ترتیب به Mn و Cd تعلق دارد؛ همچنین، مقادیر حداقل و حداکثر عامل غنی‌سازی به‌ترتیب مربوط به مولیبدن و سرب است. در مطالعه دیگر (Ghasemzadeh et al., 2021) به ارزیابی آلودگی و منشأ برخی عناصر سنگین در خاک‌های کشاورزی جنوب سبزوار پرداخته‌اند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که غلظت کادمیوم با میانگین ۷/۲ میلی‌گرم در کیلوگرم از استانداردهای WHO و USEPA بالاتر بوده و غلظت سرب با میانگین ۱۸/۸ میلی‌گرم در کیلوگرم از استاندارد USEPA بالاتر می‌آید. تحلیل همبستگی نشان می‌دهد که نیکل همبستگی مثبت و معناداری با کروم دارد و همچنین، همبستگی مثبت معنادار بین سرب و کادمیوم و همبستگی مثبت و معنادار

سمی در خاک‌های سطحی بخش مرکزی شهرستان بندرعباس مورد بررسی قرار دادند؛ نتایج این تحقیق نشان داد که ریسک بوم‌شناسی میانگین به‌ترتیب نشان‌دهنده ریسک متوسط و زیاد برای فلزات مس و کادمیم است. در یک تحقیق دیگر، Doležalová Weissmannová et al. (2019) با بررسی آلودگی فلزات سنگین در خاک‌های شهری استان استاراوا جمهوری چک، نتیجه گرفتند که خاک‌های شهری از حد متوسط تا خاک‌های بسیار آلوده به فلزات سنگین آلوده‌اند. در یک مطالعه دیگر، Zhuo et al. (2020) تحلیل منبع و ارزیابی ریسک فلزات سنگین را در ریژاو چین انجام دادند و نتایج آن‌ها نشان داد که بسیاری از انواع فلزات سنگین در مناطق توسعه‌یافته به شدت تجمع یافته‌اند.

در حال حاضر، مشکل آلودگی هوا و خاک به‌ویژه در استان‌های جنوب شرقی، شرق و مرکزی کشور مشاهده می‌شود. افزایش فعالیت‌های صنعتی، تعداد وسایل نقلیه در جاده‌ها و جمعیت در شهرهای بزرگ باعث آلودگی هوا در محیط شهری می‌شود و در نهایت، سلامت انسان را تحت تأثیر قرار می‌دهند و مقدار بیش از حد فلزات سنگین، حیات زیستی را تهدید خواهد کرد (Safiur Rahman et al., 2021). با توجه به مطالب گفته شده، مطالعه فلزات سنگین در شهرستان‌های زابل و بیرجند در شرق کشور و میزان آلودگی خاک به عناصر سنگین در این مناطق حائز اهمیت می‌باشد که در این تحقیق به مطالعه غلظت عناصر (آرسنیک، آلومینیوم، کادمیم، منگنز، آهن، کروم، مس، نیکل، سرب، کبالت، تیتانیوم و روی) در خاک شهرستان‌های زابل و بیرجند پرداخته شده است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مناطق مورد مطالعه

مناطق مورد مطالعه در این پژوهش شامل دو شهرستان بیرجند در استان خراسان جنوبی و شهرستان زابل در استان سیستان و بلوچستان است که در ادامه به تفکیک مشخصات هر یک از آن‌ها بیان شده است.

بیرجند: شهرستان بیرجند با داشتن طول جغرافیایی ۵۷ تا ۶۱ درجه شرقی، عرض جغرافیایی ۳۰ تا ۳۵ درجه شمالی و ارتفاع ۱۴۷۰ متر از سطح دریا و جمعیتی بالغ بر ۴۰۰ هزار نفر، در شرق ایران واقع شده و از جنوب و جنوب‌غربی و شرق به کویر لوت و از شمال و غرب به کوهستان محدود می‌شود (شکل ۱). این شهرستان هم‌مرز با استان‌های خراسان شمالی، یزد، کرمان، سیستان و بلوچستان و کشور افغانستان است. بیرجند دارای آب و هوای نیمه بیابانی با زمستان‌های سرد و تابستان‌های گرم و خشک است. بارش سالانه در این شهرستان ۱۵۲ میلی‌متر و

بین مس و روی وجود دارد. این مطالعه نشان داد که عناصر کادمیم، مس و نیکل در محدوده آلودگی شدید قرار دارند (Palumbo et al., 2000; Rodríguez Martín et al., 2013). مواد مادری، به توجه به شرایط تشکیل و نوع خاک، مقادیر گوناگونی از عناصر سنگین را در خود جای داده‌اند. فرایندهای خاک‌سازی نیز در طی تشکیل خاک می‌توانند باعث تخلیه یا غنی‌شدن افق‌ها در مواجهه با برخی از عناصر سنگین شوند (Nael et al., 2010).

منابع انسانی که عناصر سنگین تولید می‌کنند، شامل فعالیت‌های کشاورزی با استفاده از کودهای شیمیایی و سموم می‌شوند که بسته به منبع تولید، حاوی مقادیر متفاوتی از سرب، کادمیم، مس، آرسنیک و جیوه هستند (Caillaud et al., 2009; Chen et al., 2005; Hu et al., 2017; Huang et al., 2015). منابع دیگری که موجب افزایش عناصر سنگین در خاک می‌شوند، شامل فعالیت‌های صنعتی و شهری، مانند استخراج معادن، کارخانه‌ها و احتراق سوخت‌های فسیلی هستند (Huang et al., 2015; Hans, 2006; Taghipour et al., 2011). گسترش شهرنشینی نیز باعث تنش در اکوسیستم خاک می‌شود، به‌ویژه آلودگی عناصر سنگین در خاک‌های کشاورزی به دلیل تأثیرات مخرب بر امنیت مواد غذایی توجه دانشمندان در سراسر جهان را به خود جلب کرده است (Dogra et al., 2020; Kumar et al., 2019; Liu et al., 2017; USEPA, 1983).

در مطالعه‌ای (Haghparast and Torshizian, 2019) به بررسی میزان غلظت فلزات سنگین و آلودگی در رسوبات منطقه افیولیتی آلمه‌جوق در شمال شرق ایران پرداختند. این تحقیق، بررسی همبستگی فلزات سنگین با استفاده از ضریب پیرسون، تحلیل خوشه‌ای و تحلیل مؤلفه اصلی را انجام داد که نتایج نشان داد دو منشأ مختلف برای توزیع ژئوشیمیایی فلزات سنگین در رسوبات منطقه وجود دارد. مجموعه افیولیتی، تأثیر بسیاری از عناصر از جمله کبالت، نیکل و کروم را در این رسوبات کنترل می‌کند، در حالی که مجموعه آذرآواری و آتش‌فشانی، تأثیر بیش‌تری بر عناصر آهن، مولیبدن، وانادیوم، مس، آرسنیک، سرب، پتاسیم و کادمیم دارد. ارزیابی عامل غنی‌شدگی نشان داد که غنی‌شدگی نیکل بسیار شدید است و ضریب آلودگی نیز نشان داد که نیکل بالاترین آلودگی را در این منطقه دارد. (Safari et al., 2021) نیز به مطالعه شدت آلودگی عناصر سنگین در خاک‌های سطحی شهرستان شهرکرد پرداختند. بر اساس شاخص‌های مورد بررسی بیان نمودند که خاک شهرستان شهرکرد در مقایسه با خاک برخی شهرهای جهان، غلظت عناصری نظیر کروم، نیکل و وانادیوم بیش‌تری دارد. (Moghtaderi et al., 2019) آلودگی و ریسک سلامت، به همراه بررسی شاخص ریسک بوم‌شناسی فلزات بالقوه

نمونه‌برداری انتخاب شد. در هر نقطه، هنگام نمونه‌برداری، از نمونه‌های خاک به فاصله ۲۰۰ متر در جهات مختلف برداشت شد و سپس نمونه‌ها با هم مخلوط شدند تا نمونه کاملی از نقطه نمونه‌برداری حاصل شود. به طور کلی در شهرستان زابل از ۳۰ نقطه در کف تالاب هامون صابری و پوزک، ۱۵ نقطه از اراضی کشاورزی، در شمال و شمال غربی که در مسیر بادهای ۱۲۰ روزه هستند و همچنین، در شهرستان بیرجند نیز ۴۵ نمونه خاک از اطراف شهر جهت تحلیل و تعیین ترکیب عناصر شیمیایی نمونه خاک جمع‌آوری شد و جهت تحلیل، به آزمایشگاه منتقل شدند (Wang et al., 2005). جهت انجام تحلیل آماری، سه نمونه از خاک در هر شبکه برداشت شدند و سپس ۱۰ گرم از هر نمونه خاک که از مناطق مختلف منطقه سیستان، بخش‌های مختلف تالاب هامون و شهرستان بیرجند جمع‌آوری شده بود، به آزمایشگاه فرستاده شد.

در نهایت ۱۲ عنصر Al, Mn, Fe, Cr, Zn, Ni, Ti, Co, Cd, Cu, As و Pb در اسید توسط دستگاه^۱ ICP-OES مدل Varian 710-ES در آزمایشگاه مرکزی دانشگاه سیستان و بلوچستان (شکل ۳) مورد تحلیل قرار گرفت (Cao et al., 2008, Sakan et al., 2009). جدول ۱، حد تشخیص اندازه‌گیری فلزات مختلف توسط دستگاه ICP-OES را نشان می‌دهد.

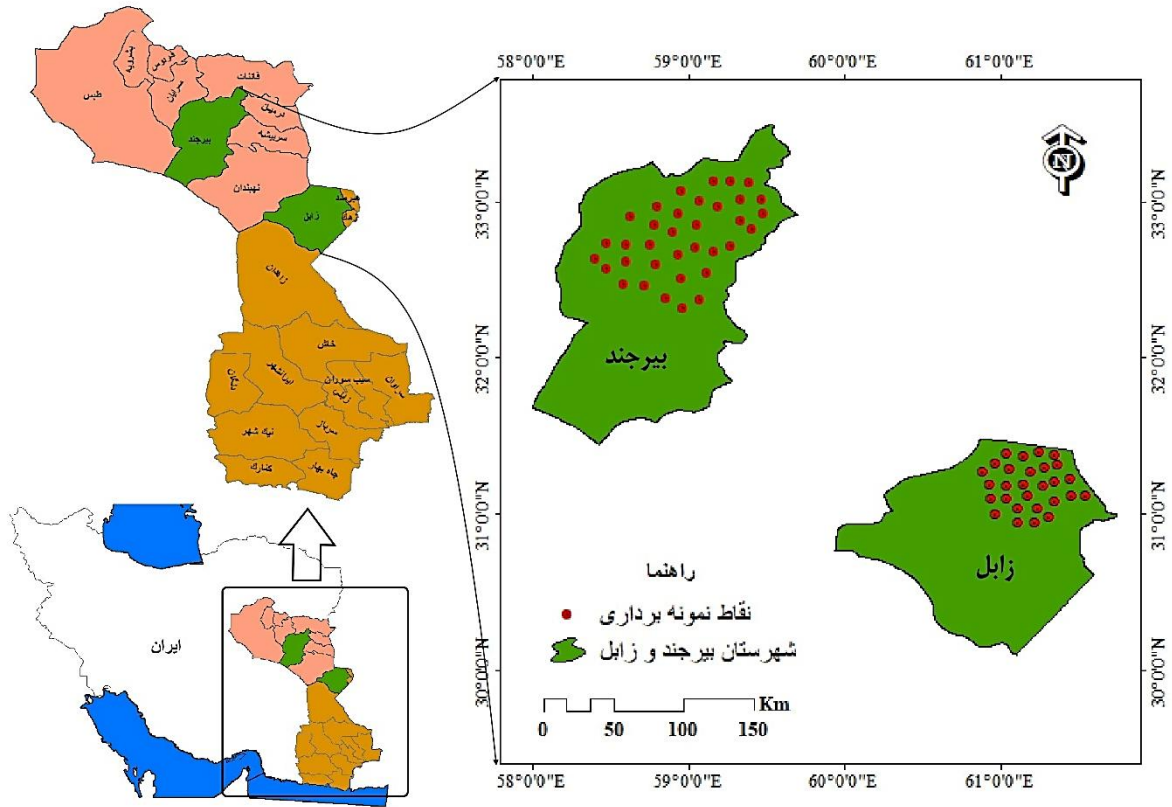
میانگین کمینه و بیشینه دمای سالیانه آن به ترتیب هشت و ۲۴ درجه سانتی‌گراد است (Ahmadi et al., 2015).

زابل: منطقه سیستان در شمال استان سیستان و بلوچستان واقع شده و از شمال و شرق با افغانستان، از غرب با استان خراسان جنوبی و از جنوب با شهرستان زاهدان مرز مشترک دارد. این منطقه در محدوده ۶۱ درجه ۱۵ دقیقه تا ۶۱ درجه و ۵۱ دقیقه طول شرقی و ۳۰ درجه و ۴۸ دقیقه تا ۳۱ درجه و ۲۶ دقیقه عرض شمالی قرار دارد (Heydari Nasab et al., 2019). جمعیت این منطقه حدود ۳۰۰ هزار نفر است و مساحت آن در حدود ۱۵۱۹۷ کیلومتر مربع است (شکل ۱). منطقه سیستان شامل بیش از ۹۰۰ روستا و پنج شهرستان زهک، زابل، هامون، نیمروز و هیرمند است. این منطقه با تبخیر زیاد و رطوبت کمی مواجه است و متوسط رطوبت سالیانه آن ۲۸ درصد، تبخیر آن پنج متر در سال و متوسط بارندگی آن ۴۷ میلی‌متر است.

۲-۲- روش نمونه‌برداری

در این تحقیق جهت نمونه‌برداری از خاک تعداد ۹۰ نمونه در دو شهرستان از مناطق مختلف (نمونه‌برداری از پوسته زمین، عمق ۰-۲۵ سانتی‌متر) برداشت شد (شکل ۲). بدین منظور ابتدا با استفاده از روش شبکه‌ای، به صورت تصادفی سه تا پنج نقطه برای

¹ Inductivity Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی شهرستان بیرجند و زابل
Figure 1- Geographical location of Birjand and Zabol cities.



شکل ۲- انجام بازدید میدانی و نمونه برداری خاک
Figure 2- Field visit and soil sampling.

شاخص، میزان فلزات سنگین در نمونه‌های خاک با میزان فلزات سنگین در نمونه‌های خاک مرجع مقایسه می‌شود (Triandiza et al., 2021).

۱-۳-۲- شاخص زمین‌انباشت مولر (Igeo)

شاخص زمین‌انباشتگی مولر، یکی از شاخص‌های متداول شدت آلودگی به فلزات سنگین در خاک‌ها و غبار جاده‌های شهری است. این شاخص در اواخر دهه ۱۹۶۰ تدوین شده و از آن زمان تاکنون، به‌طور گسترده‌ای برای مطالعه و ارزیابی آلودگی فلزات سنگین در خاک‌ها و غبار جاده‌های شهری استفاده شده است (Wei et al., 2010). شاخص Igeo^۱، با توجه به نسبت غلظت هر عنصر در نمونه مورد بررسی به غلظت زمینه‌ای^۲ آن عنصر در پوسته زمین، شدت آلودگی به عناصر سمی را با استفاده از (رابطه ۱) محاسبه می‌نماید (Rehman et al., 2020).

$$I_{geo} = \text{Log}_2 \left(\frac{C_n}{1.5 B_n} \right) \quad (1)$$

در این رابطه، C_n غلظت اندازه‌گیری شده عنصر در نمونه و B_n غلظت زمینه‌ای همان عنصر در پوسته زمین است. ضریب ۱/۵ نیز برای کاهش تغییرات احتمالی در غلظت‌های زمینه‌ای ناشی از فعالیت‌های زمین‌شناسی، به کار می‌رود. با توجه به رابطه فوق، هفت رده برای بیان شدت آلودگی در نظر گرفته می‌شود که از رده غیر آلوده تا آلودگی بسیار شدید، طبقه‌بندی می‌شود. این طبقه‌بندی در جدول ۲ ارائه شده است (Liu et al., 2020).

جدول ۲- طبقه‌بندی سطوح آلودگی بر اساس شاخص Igeo

Table 2-Classification of pollution levels based on Igeo index

عامل زمین‌انباشت	میزان آلودگی
$X \leq 0$	غیر آلوده
$0 < X < 1$	غیر آلوده تا آلودگی متوسط
$1 < X < 2$	آلودگی متوسط
$2 < X < 3$	آلودگی متوسط تا شدید
$3 < X < 4$	آلودگی شدید
$4 < X < 5$	آلودگی شدید تا بسیار شدید
$5 < X$	آلودگی بسیار شدید

۲-۳-۲- شاخص غنی‌شدگی (EF^۳)

برای تعیین منشأ طبیعی بودن یا انسانی بودن گردوغبار شهرستان‌های زابل و بیرجند از عامل غنی‌شدگی استفاده شد. در این روش از نسبت غلظت عنصر نمونه مورد بررسی به غلظت عنصر مرجع (شیل جهانی) استفاده می‌شود (Zoller et al., 1974). جدول ۳، نیز طبقات مختلف عامل غنی‌شدگی را نشان



شکل ۳- دستگاه ICP-OES مورد استفاده

Figure 3- The employed ICP-OES device.

جدول ۱- حد تشخیص اندازه‌گیری فلزات مختلف توسط دستگاه ICP-OES (میکروگرم بر لیتر)

Table 1- Detection limits of measuring different metals by ICP-OES instrument ($\mu\text{g/L}$)

عنصر	حد تشخیص (LOD)	عنصر	حد تشخیص (LOD)
Fe	3	Cr	3
Ni	4	Cd	0.3
Al	1	Mn	0.4
As	40	Pb	7
Co	2	Zn	0.7
Cu	0.2		

۲-۳-۲- ارزیابی شدت آلودگی نمونه‌های خاک

شاخص زمین‌انباشتگی مولر به‌عنوان یک شاخص کمی در ارزیابی آلودگی خاک و رسوبات استفاده می‌شود. این شاخص به شکل لگاریتمی از نسبت غلظت فلزات سنگین در نمونه‌های خاک به غلظت مرجع آن‌ها به‌دست می‌آید؛ بنابراین، این شاخص قادر است به‌صورت کمی میزان آلودگی خاک را ارزیابی کند (Wei et al., 2010). شاخص آلودگی نیز با توجه به میزان غلظت فلزات سنگین در نمونه‌های خاک و مقایسه آن با میزان غلظت مرجع آن‌ها، میزان آلودگی خاک را ارزیابی می‌کند. در این شاخص، بیش‌ترین مقدار مجاز فلزات سنگین در نمونه‌های خاک مشخص شده و به‌عنوان مرجع برای مقایسه با غلظت فلزات سنگین در نمونه‌های دیگر به کار گرفته می‌شود (Sellami et al., 2022). همچنین، شاخص غنی‌شدگی نیز به‌عنوان یک شاخص برای اندازه‌گیری میزان آلودگی خاک و محتوای فلزات سنگین در خاک به کار می‌رود. در این

3 Enrichment factor

¹ Geo-Accumulation Index

² Background concentration

شاخص IPI، میانگینی از نسبت غلظت چند عنصر به غلظت زمینه‌ای همان عناصر در نمونه مورد بررسی را فراهم می‌آورد، که مطابق (رابطه‌های ۴ و ۵) تعیین می‌شود (Soltani-Gerdefaramarzi et al., 2021).

$$IPI = \frac{(PI_1 + PI_2 + \dots + PI_i + \dots + PI_n)}{n} \quad (4)$$

$$PI_i = \frac{C_i}{B_i} \quad (5)$$

که در آن: C_i غلظت عنصر A_i در نمونه مورد بررسی، B_i غلظت زمینه‌ای عنصر A_i در پوسته زمین (شیل جهانی) است. نهایتاً کمیت شاخص IPI به صورت میانگین مقادیر PI برای تمامی عناصر اندازه‌گیری شد. طبقه‌بندی سطوح آلودگی IPI در جدول ۵ نشان داده شده است (Chen et al., 2007).

جدول ۵- طبقه‌بندی سطوح آلودگی بر اساس شاخص IPI

شاخص آلودگی IPI	میزان آلودگی
$X < 1$	آلودگی کم
$1 < X < 2$	آلودگی متوسط
$2 < X < 5$	آلودگی زیاد
$5 < X$	آلودگی شدید

۳- نتایج و بحث

۳-۱- مقادیر فلزات منتخب در خاک شهرستان بیرجند

میزان فلزات موجود در خاک (غلظت در پوسته زمین) شهر بیرجند جدول ۶ نشان داد در اکثر عناصر بررسی شده مقدار میانگین نمونه‌های پوسته زمین زیاد است که با نتایج Farid Mojtabedi et al. (2020) مطابقت دارد. (Jiang et al., 2018) نیز غلظت عناصر آلومینیوم و آهن موجود در پوسته زمین را بالا گزارش نمودند و بالا بودن غلظت فلزات سرب، نیکل، کادمیوم، روی، مس و کروم را مربوط به فعالیت‌های انسانی دانستند. با توجه به تحقیقات مختلف بالا بودن غلظت عناصری مانند آلومینیوم، آهن، روی و سرب در نمونه‌های خاک می‌تواند هم مربوط به فراوانی بالای این عناصر در پوسته زمین باشد و هم مربوط به فعالیت‌های صنعتی، معدنی، سوزاندن سوخت‌های فسیلی، ترافیک و سایر فعالیت‌های انسانی باشد (Othman et al., 2019).

۳-۲- مقادیر فلزات منتخب در خاک شهرستان زابل

مقادیر میانگین غلظت عناصر مورد مطالعه در نمونه‌های خاک جمع‌آوری شده از شهر زابل بر حسب میکروگرم بر مترمکعب همراه پارامترهای آماری شامل حداقل، میانگین، حداکثر و میانه در جدول ۶ ارائه شده است. با توجه به نتایج به دست آمده از تحلیل

می‌دهد (Zhang et al., 2002). فلز منبأ آلومینیوم انتخاب شد که غلظت آن در پوسته زمین ۸۲۰۰۰ پی‌پی‌ام^۱ یا ۸/۲ درصد است.

$$EF = \frac{(E/R)_{\text{Sample}}}{(E/R)_{\text{Background}}} \quad (2)$$

E_{Sampler} غلظت عنصر اندازه‌گیری شده نمونه، R_{Sampler} غلظت عنصر رفرنس اندازه‌گیری شده (در این مطالعه Al)، $E_{\text{Background}}$ غلظت عنصر اندازه‌گیری شده در محیط منبأ، $R_{\text{Background}}$ غلظت عنصر رفرنس اندازه‌گیری شده (در این مطالعه Al).

جدول ۳- طبقات مختلف عامل غنی‌شدگی

Table 3- Different classes of enrichment factors

فاکتور غنی‌شدگی	میزان غنی‌شدگی
$EF < 2$	کم
$2 \leq X < 5$	متوسط
$5 \leq X < 20$	قابل توجه
$20 \leq X < 40$	خیلی زیاد
$EF \geq 40$	به شدت زیاد

اگر نسبت عنصر مورد نظر کم‌تر از یک باشد عنصر مورد نظر منشأ طبیعی و در صورتی که بین یک تا ده باشد عنصر هم منشأ طبیعی و هم منشأ مصنوعی خواهد داشت و در صورتی که این نسبت بیش‌تر از ۱۰ باشد منشأ آلودگی عنصر مورد نظر عوامل انسانی است (Williams et al., 2020). مقادیر EF یک تا پنج نشان‌دهنده این است که منابع انسانی سهم معناداری در میزان آن عنصر ندارند (Zarasvandi et al., 2023).

۳-۳-۲- ضریب آلودگی (CF2)

از ضریب آلودگی (CF) برای بیان میزان آلودگی رسوبات به غلظت فلزات سنگین استفاده می‌شود. شاخص فوق از (رابطه ۳) با تقسیم غلظت عنصر در نمونه برداشت شده به غلظت همان عنصر در نمونه زمینه به دست می‌آید (Abraham and Parker, 2008; Adomako et al., 2008).

$$CF = \frac{C_{\text{Sample}}}{C_{\text{Background}}} \quad (3)$$

در رابطه فوق، CF ضریب آلودگی، C_{Sample} غلظت عنصر مورد بررسی و $C_{\text{Background}}$ غلظت عنصر در شیل جهانی است.

جدول ۴- طبقه‌بندی ضریب آلودگی (Hakanson, 1980)

Table 4- Classification of pollution index (Hakanson, 1980)

مقدار آلودگی رسوب	پایین	متوسط	قابل توجه	بالا
CF	$1 >$	1-3	3-6	$6 <$

۴-۳-۲- شاخص آلودگی تجمعی (IPI³)

² Contamination Factor

³ Integrated Pollution Index

¹ Part Per Million

باشد. این عناصر به‌وسیله فرآیند فرسایش رهاسازی شده و توسط باد همراه با ذرات گردوخاک انتشار یافته و به مناطق اطراف انتقال می‌یابند، نیز منبع انتشار این فلزات سنگین می‌تواند ناشی از فعالیت وسایل نقلیه موتوری و سایر فعالیت‌های انسانی مانند مصرف انواع کودها و آفت‌کش‌ها و یا منابع نقطه‌ای مانند فعالیت‌های فلزی و رنگی و یا ساختار ژئوشیمیایی در خاک‌های آن منطقه باشد (Chen et al., 2005). نتایج تحقیق Asvad et al. (2020) در زابل نشان داد عناصر منتخب شامل آلومینیوم، منیزیم و آهن بالاترین فراوانی را در پوسته زمین دارند و غلظت فلز آرسنیک در نمونه‌های پوسته زمین کم‌تر از سایر فلزات موجود در خاک منطقه است که با یافته‌های تحقیق حاضر مطابقت دارد.

نمونه‌های پوسته زمین در بین فلزات اندازه‌گیری شده در شهرستان زابل بالاترین میانگین غلظت مربوط به آلومینیوم و آهن و پایین‌ترین میانگین غلظت مربوط به روی می‌باشد. غلظت آرسنیک و روی در نمونه‌های زمینه (غلظت در پوسته زمین) کم‌تر از غلظت دیگر عناصر بود. نتایج نشان می‌دهد که غلظت بالای این عناصر مربوط به منابع انسانی و حاصل انتقال از سایر مناطق دور دست است که این مهم با نتایج (Asvad et al., 2020) در شهر زابل مطابقت دارد. در بین عناصر مطالعه شده در شهرستان زابل بیش‌ترین غلظت مربوط به آلومینیوم و آهن است که این دو عنصر دارای فراوانی بالایی در پوسته زمین هستند. Yaroshevsky (2016) همچنین، بالا بودن مقدار تیتانیوم نیز می‌تواند به غلظت این عنصر در خاک این مناطق ارتباط داشته

جدول ۶- محتوای فلزات سنگین در نمونه‌های خاک شهرستان زابل و بیرجند

Table 6- Heavy metal content in soil samples from Zabol and Birjand city

عناصر (میکروگرم بر متر مکعب)	حداقل	میانگین	حداکثر	میان
Fe	زابل	3731.25	49900.00	35101.10
	بیرجند	53.30	72631.40	29730.10
Co	زابل	10.70	15.30	10.70
	بیرجند	0.00	19.50	11.11
Mn	زابل	541.23	694.80	520.70
	بیرجند	0.07	1129	619.40
Ni	زابل	52.80	91.70	46.20
	بیرجند	0.00	163.01	44.08
Cu	زابل	72.25	123.80	69.71
	بیرجند	0.00	173.55	35.09
Zn	زابل	0.41	1.14	0.33
	بیرجند	0.99	82.56	0.44
Cr	زابل	73.91	129.10	69.50
	بیرجند	0.00	152.19	62.19
Pb	زابل	18.38	191.59	5.19
	بیرجند	0.00	71.18	9.88
As	زابل	0.34	5.69	0.00
	بیرجند	2.28	27.39	13.94
Cd	زابل	1.40	12.52	0.00
	بیرجند	0.00	12.33	0.00
Ti	زابل	7463.81	10000.00	7020.21
	بیرجند	10.67	14256.31	7946.01
Al	زابل	40408.91	53040.00	40470.00
	بیرجند	0.01	53389.00	27301.00

۳-۳- ارزیابی همبستگی پیرسون

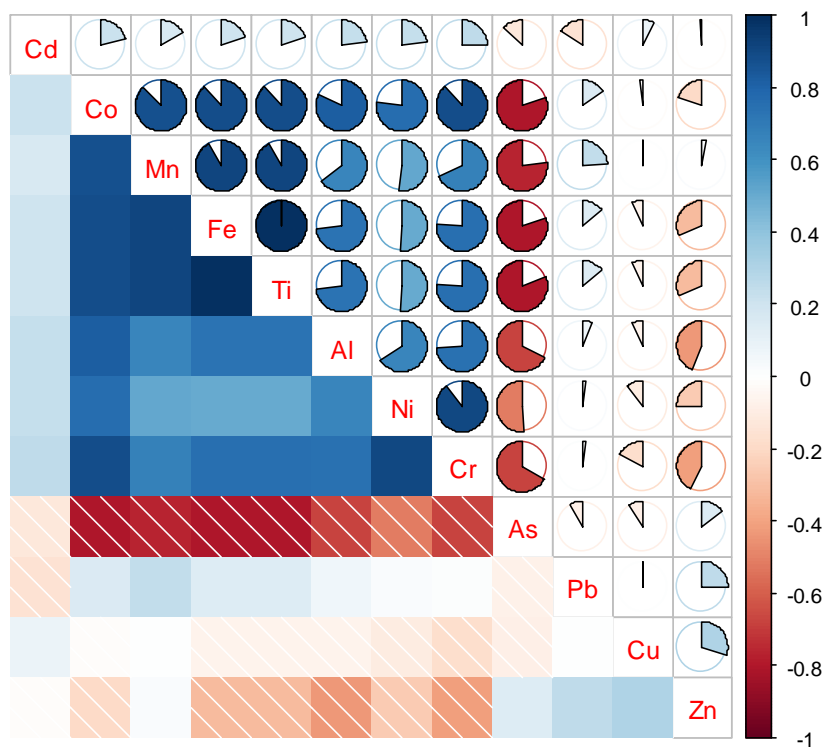
بر اساس جدول ۸، نتایج ماتریس همبستگی پیرسون برای غلظت فلزات سنگین موجود در خاک شهر زابل نیز نشان داد که بین بیش تر عناصر همبستگی منفی وجود دارد، در سایر موارد همگی دارای رابطه همبستگی مثبت هستند. قوی ترین همبستگی مثبت به ترتیب بین تیتانیوم و آهن (۰/۹۷)، تیتانیوم و منگنز (۰/۸۳)، آرسنیک و سرب (۰/۸۱) و منگنز و کبالت (۰/۷۶) است؛ بدین معنی که با افزایش غلظت هر کدام از موارد اشاره شده به طور معناداری غلظت سایر فلزات سنگین نیز افزایش پیدا می کند. شکل ۴، همبستگی فلزات سنگین موجود در خاک شهر زابل را به صورت گرافیکی نشان می دهد.

روابط بین فلزات سنگین موجود در نمونه های خاک شهر بیرجند با استفاده از ماتریس همبستگی پیرسون در نرم افزار R بررسی شد (جدول ۷). با توجه به مقادیر ضریب همبستگی پیرسون، مس، روی و آرسنیک بیش ترین همبستگی منفی را با دیگر فلزات سنگین از خود نشان دادند. سایر فلزات سنگین رابطه مثبت با یکدیگر داشتند. با بررسی ارتباط عناصر مورد بررسی مشخص شد که فلزات منگنز و آهن (۰/۹۱)، کروم و نیکل (۰/۹۰)، تیتانیوم و آهن (۰/۹۸) نیز تیتانیوم و منگنز (۰/۹۱) همبستگی مثبت شدید داشته که این همبستگی های معنادار و نسبتاً قوی نشان می دهد این فلزات از منابع مشابه حاصل شده و عمدتاً از فعالیت های انسان سرچشمه گرفته اند (شکل ۳).

جدول ۷- ماتریس همبستگی پیرسون فلزات سنگین موجود در خاک شهرستان بیرجند

Table 7- Pearson correlation matrix of heavy metals in the soil of Birjand city

	Al	Fe	Co	Mn	Ni	Cu	Zn	Cr	Pb	As	Cd	Ti
Al	1.00											
Fe	0.73	1.00										
Co	0.82	0.88	1.00									
Mn	0.65	0.91	0.88	1.00								
Ni	0.65	0.50	0.77	0.52	1.00							
Cu	-0.07	-0.07	-0.01	0.00	-0.11	1.00						
Zn	-0.43	-0.31	-0.20	0.03	-0.25	0.30	1.00					
Cr	0.74	0.76	0.89	0.68	0.90	-0.17	-0.42	1.00				
Pb	0.06	0.14	0.16	0.24	0.03	0.01	0.26	0.02	1.00			
As	-0.68	-0.81	-0.81	-0.77	-0.51	-0.09	0.14	-0.67	-0.08	1.00		
Cd	0.23	0.20	0.21	0.17	0.23	0.08	-0.02	0.25	-0.16	-0.13	1.00	
Ti	0.73	0.98	0.88	0.91	0.50	-0.07	-0.31	0.76	0.14	-0.81	0.20	1.00



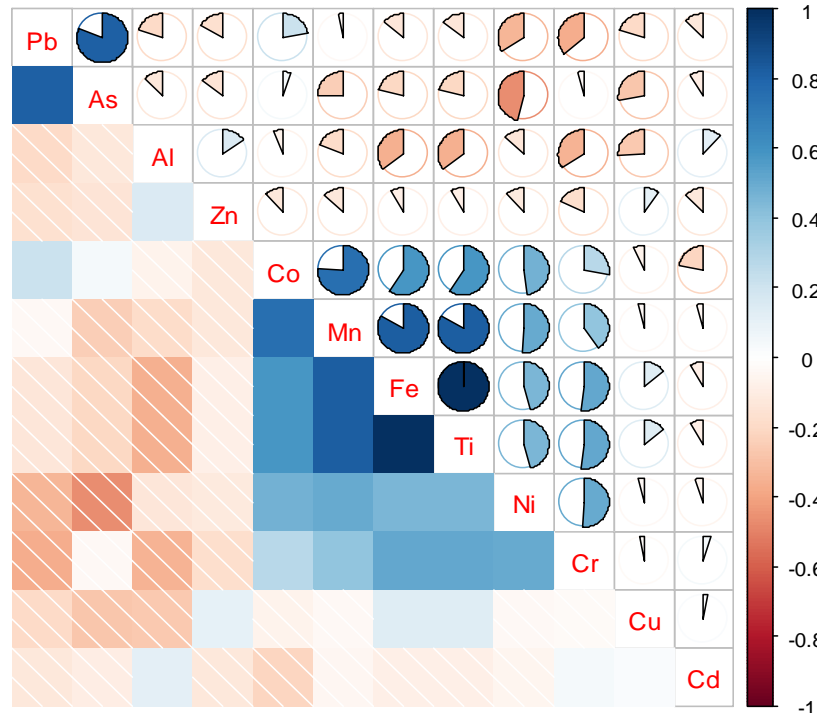
شکل ۴- شکل گرافیکی ماتریس همبستگی پیرسون برای غلظت فلزات سنگین شهر بیرجند

Figure 4- Graphical representation of the Pearson correlation matrix for the concentration of heavy metals in Birjand city

جدول ۸- ماتریس همبستگی پیرسون فلزات سنگین موجود در خاک شهرستان زابل

Table 8- Pearson correlation matrix of heavy metals in the soil of Zabol city

	Al	Fe	Co	Mn	Ni	Cu	Zn	Cr	Pb	As	Cd	Ti
Al	1.00											
Fe	-0.35	1.00										
Co	-0.06	0.59	1.00									
Mn	-0.18	0.83	0.76	1.00								
Ni	-0.13	0.46	0.48	0.51	1.00							
Cu	-0.26	0.14	-0.06	-0.04	-0.03	1.00						
Zn	0.15	-0.09	-0.12	-0.13	-0.11	0.10	1.00					
Cr	-0.35	0.52	0.28	0.40	0.51	-0.02	-0.17	1.00				
Pb	-0.20	-0.14	0.22	-0.03	-0.34	-0.20	-0.16	-0.36	1.00			
As	-0.12	-0.20	0.05	-0.25	-0.47	-0.27	-0.14	-0.04	0.81	1.00		
Cd	0.11	-0.09	-0.22	-0.05	-0.06	0.02	-0.12	0.05	-0.13	-0.09	1.00	
Ti	-0.35	0.97	0.59	0.83	0.46	0.14	-0.09	0.52	-0.14	-0.20	-0.09	1.00



شکل ۵- شکل گرافیکی ماتریس همبستگی پیرسون برای غلظت فلزات سنگین شهر زابل

Figure 5- Graphical representation of Pearson's correlation matrix for the concentration of heavy metals in Zabol city

قرار داشتند را می‌توان از پوسته زمین دانست. نتایج شاخص زمین‌انباشتی در شهرستان زابل نشان داد که همه عناصر به جز کادمیم و نیکل در نمونه خاک داخل شهر در محدوده غیر آلوده ($I_{geo} \leq 0$) بوده و عناصر کادمیم و نیکل در محدوده غیر آلوده تا آلودگی متوسط ($1 < I_{geo} < 2$) قرار دارد.

نتایج این بخش با مطالعات Haghparast and Torshzian (2019) که شاخص زمین‌انباشتی نشان از آلوده بودن خاک منطقه به نیکل است همخوانی دارد. نتایج بررسی شاخص CF جدول ۹ در نمونه‌های خاک شهر بیرجند نشان داد عناصر آهن، کبالت، منگنز، مس، سرب، آرسنیک، کادمیم و آلومینیوم در نمونه‌های جمع‌آوری شده در سطح آلودگی پایین ($CF < 1$) قرار دارند. این شاخص برای نیکل، با مقدار $3/8$ آلودگی در حد قابل توجه داشت، عناصر روی، کروم و تیتانیوم با آلودگی بین یک تا سه دارای آلودگی متوسط بودند. نتایج بررسی شاخص CF در نمونه‌های خاک شهر زابل نیز نشان داد مشابه شهر بیرجند عناصر آهن، کبالت، منگنز، مس، سرب، آرسنیک، کادمیم و آلومینیوم در نمونه‌های جمع‌آوری شده در سطح آلودگی پایین ($CF < 1$) قرار دارند. عنصر نیکل با آلودگی قابل توجه و عنصر کروم با آلودگی متوسط ارزیابی شده است.

۴- ارزیابی شدت آلودگی عناصر منتخب در خاک مناطق مورد مطالعه با استفاده از شاخص‌های مربوطه

جهت ارزیابی و تعیین شدت آلودگی در محیط‌زیست معیارها و شاخص‌های مختلفی وجود دارد. می‌توان با استفاده از معیارها و شاخص‌های مختلف، میزان آلودگی در خاک را ارزیابی و شدت آن را تعیین کرد. در این تحقیق، با استفاده از شاخص‌های مختلف از جمله شاخص زمین‌انباشتی مولر (I_{geo})، ضریب آلودگی (CF) و شاخص غنی‌شدگی (EF) میزان آلودگی خاک ارزیابی شده است. شاخص زمین‌انباشتی برای هر یک از فلزات در خاک مناطق مورد مطالعه محاسبه شد که نتیجه آن در جدول ۹ نشان داده شده است. نتایج شاخص زمین‌انباشتی در شهر بیرجند نشان داد که عناصر کبالت، آهن، منگنز، مس، کادمیم و تیتانیوم در محدوده غیر آلوده قرار دارند ($I_{geo} \leq 0$) و عناصر نیکل، روی، آرسنیک و آلومینیوم در محدوده غیر آلوده تا آلودگی متوسط ($0 < I_{geo} < 1$) قرار دارد. عناصر کروم و سرب نیز در محدوده با آلودگی متوسط ($1 < I_{geo} < 2$) قرار دارند. نتایج نشان‌دهنده آلودگی خاک شهرستان بیرجند با عنصر کروم و سرب می‌باشد که با توجه به شاخص زمین‌انباشتی می‌توان بیان نمود که منشأ این عناصر در شهر بیرجند بیش‌تر منابع انسانی می‌باشد. همچنین، منشأ سایر عناصر که در محدوده غیر آلوده

پایین آلودگی قرار داشت. بالا بودن مقدار آلودگی خاک این منطقه با سرب احتمالاً مربوط به فعالیت‌های انسانی و مصرف سوخت‌های فسیلی است (Fei et al., 2023). نتایج بررسی شاخص PI در نمونه‌های خاک شهرستان زابل نیز نشان داد عنصر سرب در سطح شدید آلودگی قرار دارد. همچنین، این شاخص برای عنصر نیکل سطح آلودگی زیاد و برای کروم متوسط بوده و برای سایر نمونه‌ها، سطح آلودگی پایین را نشان داد. Abdollahi و همکاران (۲۰۲۱)، بر اساس شاخص آلودگی (PI) در شهر زاهدان، میزان آلودگی سرب را زیاد بیان نموده‌اند. پایین بودن آلودگی سایر فلزات در این تحقیق با نتایج Asvad و همکاران (۲۰۲۳) برای شهر زابل مطابقت دارد و از دلایل آن می‌توان عدم وجود تاسیسات صنعتی و کارخانجات در منطقه مورد مطالعه را نام برد.

همچنین، با توجه به جدول، می‌توان نتیجه گرفت که عامل غنی‌شدگی برای برخی از عناصر سنگین در نمونه خاک زابل نیز بالاست و این نشان می‌دهد که آلودگی محیطی در این منطقه وجود داشته و بسیار شدیدتر از شهر بیرجند است. عناصر نیکل (Ni) دارای عامل غنی‌شدگی قابل توجه ۱۳/۸۳ و کروم (Cr) ۵/۵۷ است که نشان می‌دهد نیکل و کروم در شهر زابل به صورت قابل توجه‌ای غنی‌شدگی دارند. همچنین، عناصر آهن، مس و تیتانیوم عامل غنی‌شدگی متوسط به دست آمد. تحقیقات Behrooz et al (2017) در زابل نشان داد که منابع انسانی در مقایسه با پوسته زمین سهم بیش‌تری در غنی‌شدگی فلزاتی مانند سرب، کروم و نیکل دارند. نتایج بررسی شاخص PI در نمونه‌های خاک شهرستان بیرجند نشان داد عناصر نیکل و روی در نمونه‌های جمع‌آوری شده در سطح آلودگی زیاد بوده و سرب دارای آلودگی شدید است. این شاخص برای سایر عناصر مورد مطالعه در سطح

جدول ۹- میانگین شاخص‌های ارزیابی شدت آلودگی عناصر منتخب در خاک مناطق مورد مطالعه

Table 9- The average indices for assessing the contamination intensity of selected elements in the soil of the studied areas.

شاخص	Al	Ti	Cd	As	Pb	Cr	Zn	Cu	Ni	Mn	Co	Fe
Igeo	0.91	-0.35	-0.3	0.8	1.32	1.19	0.26	-0.5	0.29	-2.01	-0.8	-0.62
	-0.49	-0.05	0.1	-0.97	-1.4	-0.16	-2.43	-0.36	0.39	-1.81	-0.85	-0.35
EF	3.98	2.16	0.51	0.34	4.41	4.75	1.55	12.98	0.08	0.68	1.98	1.98
	4.52	1.91	0.2	0.48	5.57	0.02	2.45	13.83	0.08	0.73	2.25	2.25
CF	0.29	1.17	0.54	0.07	0.09	1.29	1.39	0.45	3.8	0.02	0.2	0.58
	0.49	0.95	0.41	0.008	0.14	1.64	0.004	0.54	3.08	0.01	0.16	0.5
PI	0.3	0.14	0.54	0.7	6.4	0.12	4.89	0.45	3.82	0.6	0.2	0.7
	0.22	0.11	0.51	0.006	8.4	1.64	0.02	0.41	4.07	0.63	0.21	0.62

مشترک آن‌ها باشد. با توجه به نتایج تحقیق در خصوص آلودگی خاک در شهرهای بیرجند و زابل، می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از معیارها و شاخص‌های مانند زمین‌انباشتگی مولر (Igeo)، ضریب آلودگی (CF)، شاخص آلودگی (PI) و شاخص غنی‌شدگی (EF)، می‌تواند به ارزیابی و تعیین شدت آلودگی در محیط‌زیست کمک کند. در شهر بیرجند، برخی از فلزات سنگین مانند کروم و سرب با سطوح آلودگی متوسط تا شدیدتری مواجه هستند که احتمالاً ناشی از فعالیت‌های انسانی است. از سوی دیگر، در شهر زابل، اکثر فلزات سنگین در محدوده‌های غیر آلوده تا متوسط قرار دارند، با این حال سرب، نیکل و کروم با سطوح آلودگی قابل توجه که نشان‌دهنده تأثیرات بیش‌تری از فعالیت‌های انسانی در آلودگی فلزات سنگین است. این نتایج نشان می‌دهد که تفاوت‌های میان شهرها در الگوی آلودگی فلزات سنگین وجود دارد که ممکن است

۵- نتیجه‌گیری کلی

با توجه به نتایج مطالعه در دو شهرستان زابل و بیرجند، می‌توان نتیجه گرفت که وضعیت آلودگی به فلزات سنگین در این دو منطقه قابل توجه بوده و با توجه به ارتباط میان فلزات سنگین در نمونه‌های خاک بیرجند و زابل، مشخص شد که در بیرجند، مس، روی و آرسنیک با دیگر فلزات سنگین همبستگی منفی داشتند، در حالی که سایر فلزات سنگین رابطه‌ای مثبت با یکدیگر داشتند. در عین حال، در زابل، بیش‌تر عناصر دارای همبستگی منفی بودند، با این وجود، روابط مثبت قوی‌ترین همبستگی را بین تیتانیوم و آهن، تیتانیوم و منگنز، آرسنیک و سرب و منگنز و کبالت نشان دادند. این موارد نشان می‌دهد که افزایش غلظت یک فلز سنگین می‌تواند باعث افزایش غلظت سایر فلزات سنگین نیز شود و این ممکن است ناشی از فعالیت‌های انسانی و یا منابع

در شرق شهرستان ازنآ، استان لرستان. یافته‌های نوین زمین‌شناسی کاربردی، ۱۴، ۲۹-۴۴. doi: 10.22084/nfag.2020.21037.1403

آسود، سیدرضا، اسماعیلی ساری، عباس. و بهرامی‌فر، نادر (۱۳۹۹). مقایسه و ارزیابی ریسک سلامت عناصر منتخب در گردوغبار داخل و خارج منازل در اهواز، زابل و منطقه پارس جنوبی. رساله دکتری، دانشگاه تربیت مدرس. ۹۴ ص.

حق پرست، محجوب، ترشیزیان، حبیب‌الله، و دبیری، رحیم (۱۳۹۸). ارزیابی میزان غلظت فلزات سنگین و میزان آلودگی در رسوبات منطقه افیولیتی آلمه جوق. علوم و تکنولوژی محیط‌زیست، ۲۱(۴)، ۹۱-۱۰۵. doi: 10.22034/jest.1970.14653

صفاری، مهرنوش، جعفریان، عبدالرضا، گنجویان، محمدعلی، و اسماعیلی، جواد (۱۴۰۰). بررسی شدت آلودگی عناصر سنگین در خاک‌های سطحی (منطقه مورد مطالعه: شهرستان شهرکرد). کواترنری ایران، ۷(۳)، ۱۰۰۶-۱۰۲۳. doi: 10.1001.1.24237108.1400.7.2.9.7

عبداللهی، س.، عظیم‌زاده، ح. ر.، اختصاصی، م. ر.، و مصلح‌آرانی، ا. (۱۴۰۰). بررسی تغییرات کمی، سنجه‌های آلودگی و توزیع غلظت فلزهای سنگین Pb و Cd در غبار ریزشی (مطالعه موردی: شهر زاهدان). علوم محیطی. ۱۹(۱)، ۱-۱۸. doi: 10.29252/envs.29142

فریدمجتهدی، نیما، نگاه، سمانه، عزیزی، قاسم، و خوش اخلاق، فرامرز (۱۳۹۹). واکاوی الگوی بادهای غالب فصل گرم در دشت‌های ایران مرکزی. هواشناسی و علوم جو. ۳(۱)، ۴۵-۶۲. doi: 10.22034/JMAS.2020.130881

قاسم‌زاده، آرزو، کریمی، علیرضا، ضیایی، عاطفه، و فتوت، امیر (۱۴۰۰). ارزیابی آلودگی و منشأ برخی عناصر سنگین در خاک‌های کشاورزی جنوب سبزوار، شمال شرق ایران. مدیریت خاک و تولید پایدار، ۱۱(۱)، ۱-۲۶. doi: 10.22069/EJSMS.2021.17932.1943

ولی‌پور، محمدابراهیم (۱۴۰۱). بررسی آلودگی فلزات سنگین و منشأ آن‌ها در خاک منطقه جعفرآباد (جنوب غرب کاشمر). استان خراسان رضوی. یافته‌های نوین زمین‌شناسی کاربردی، ۱۶(۳۲)، ۱۳۸-۱۲۵. doi: 10.22084/nfag.2021.24975.1484

References

Abdollahi, S., Azimzadeh, H., Ekhtesasi, M. & Mosleh-Arani, A. (2021). Evaluation of quantitative changes, pollution indexes and distribution of heavy metals Pb and Cd in the dust falling (case study: Zahedan city). *Environmental Sciences*, 19(1), 1-18. [In Persian]

Abraham, G. M. S. & Parker, R. J. (2008). Assessment of heavy metal enrichment factors and the degree contamination in marine sediments from Tamaki. Estuary, Auckland, New Zealand. *Environmental Monitoring and*

به عوامل محلی مانند فعالیت‌های صنعتی، ترافیک و مصرف سوخت باز می‌گردد. لذا می‌توان نتیجه گرفت که این دو شهر نیازمند اقدامات بیش‌تر جهت کنترل و کاهش آلودگی فلزات سنگین در هر دو منطقه است. این مطالعه به طور کلی نیازمند اقدامات بیش‌تر جهت کنترل و کاهش آلودگی فلزات سنگین در هر دو شهرستان است. با توجه تاثیر منفی عناصر سنگین بر سلامت انسان نتایج این پژوهش می‌تواند به‌عنوان انگیزه‌ای برای اقدامات پیشگیرانه و کنترلی جدی در این مناطق برای حفظ سلامتی افراد و ساکنین آن در نظر گرفته شود.

سپاسگزاری

بدینوسیله از حمایت مالی دانشگاه زابل در انجام این تحقیق تشکر و قدردانی می‌شود.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تضاد منافی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

دسترسی به داده‌ها

داده‌ها و نتایج استفاده شده در این تحقیق از طریق مکاتبه با نویسنده مسؤل در اختیار قرار خواهد گرفت.

مشارکت نویسندگان

محسن فراهی: مفهوم‌سازی، انجام تحلیل‌های نرم‌افزاری، تحلیل نتایج، نگارش مقاله.

منابع

احمدی، زهره، دوستان، رضا، و مقیدی، عباس (۱۳۹۴). تحلیل همبندی گردوغبار نیمه گرم سال در استان خراسان جنوبی. *جغرافیای طبیعی*، ۸، ۴۱-۶۱. doi: 10.1001.1.20085656.1394.8.29.3.4

جمشیدی، امین، ساریخانی، رامین، کرمی، گلناز، قاسمی دهنوی، آرتیمس (۱۳۹۹). بررسی آلودگی فلزات سنگین و منشأ آن‌ها *Assessment*, 136, 227- 238. doi: 10.1007/s10661-007-9678-2

Adomako, D., Nyarko, B. J. B., Dampare, S. B., Serfor Armah, Y., Osa, S., Fianko, J. R., & Akaho, E. H. (2008). Determination of toxic elements in waters and sediments from River Subin in the Ashanti Region of Ghana. *Environmental Monitoring and Assessment*, 141, 165- 175. doi: 10.1007/s10661-007-9885-x

Ahmadi, Z., Dostan, R., & Mofidi, A. (2015). Synoptic analysis of semi-warm year dust in South Khorasan Province. *Natural Geography*, 8(29), 41-61. [In Persian]

- Ali, H., Khan, E., & Sajad, M.A. (2013). Phytoremediation of heavy metals-concepts and applications. *Chemosphere*, 91(7), 869-81. doi: 10.1016/j.chemosphere.2013.01.075
- Asvad, S.R., Esmaili-Sari, A., Bahramifar, N., Behrooz, R.D., Paschalidou, A.K., & Kaskaoutis, D.G. (2023). Heavy metals contamination status and health risk assessment of indoor and outdoor dust in Ahvaz and Zabol cities, Iran. *Atmospheric Pollution Research*, 14(4), 101727. [In Persian]
- Asvad, S. R., Esmaili Sari, A., & Bahramifar, N. (2020). Comparison and health risk assessment of selected elements in indoor and outdoor dust in Ahvaz, Zabol and South Pars region. PhD Thesis, Tarbiat Modares University. 94 p. [In Persian]
- Behrooz, R.D., Esmaili-Sari, A., Bahramifar, N., Kaskaoutis, D.G., Saeb, K., & Rajaei, F. (2017). Trace-element concentrations and water-soluble ions in size-segregated dust-borne and soil samples in Sistan, southeast Iran. *Aeolian Research*, 25, 87-105
- Blaster, P., Zimmermann, S., Luster, J., & Shoty, W. (2000). Critical examination of trace element enrichments and depletions in soils: As, Cr, Cu, Ni, Pb, & Zn in Swiss forest soils. *Science of the Total Environment*, 249, 257-280. doi: 10.1016/s0048-9697(99)00522-7
- Caillaud, J., Proust, D., Philippe, S., Fontaine, C., & Fialin, M. (2009). Trace metal distribution from a serpentinite weathering at the scales of the weathering profile and its related weathering microsystems and clay minerals. *Geoderma*, 149, 199-208.
- Cao, J.J., Chow, J.C., Watson, J.G., Wu, F., Han, Y.M., Jin, Z.D., Shen, Z.X., & An, Z.S., 2008. Size-differentiated source profiles for fugitive dust in the Chinese Loess Plateau. *Atmospheric Environment*, 42(10), pp. 2261-2275.
- Chen, C.W., Kao, C.M., Chen, C.F., & Dong, C.D., (2007). Distribution and accumulation of heavy metals in the sediments of Kaohsiung Harbor, Taiwan. *Chemosphere*, 66(8), 1431-1440. doi: 10.1016/j.chemosphere.2006.09.030
- Chen, T.B., Zheng, Y.M., Lei, M., Huang, Z.C.h., Wu, H.T., Chen, H., Fan, K.K., Yu, K., Wu, X., & Tian, Q.Z. (2005). Assessment of heavy metal pollution in surface soils of urban parks in Beijing, China. *Chemosphere*. 60: 542-551. doi: 10.1016/j.chemosphere.2004.12.072
- Congeevaram, S., Dhanarani, S., Park, J., Dexilin, M., & Thamaraiselvi, K. (2007). Biosorption of chromium and nickel by heavy metal resistant fungal and bacterial isolates. *Hazard Materials*, 146(1), 270-7. doi: 10.1016/j.jhazmat.2006.12.017
- Dao, L., Morrison, L., Zhang, H., & Zhang, C. (2014). Influences of traffic on Pb, Cu and Zn concentrations in roadside soils of an urban park in Dublin, Ireland. *Environmental Geochemistry and Health*, 36, 333-343. doi: 10.1007/s10653-013-9553-8
- Dogra, N., Sharma, M., Sharma, A., Keshavarzi, A., Minakshi Bhardwaj, R., Thukral, A.K. & Kumar, V. (2020). Pollution assessment and spatial distribution of roadside agricultural soils: a case study from India. *Environmental Health Research*. 30, 146-159. doi: 10.1080/09603123.2019.1578865
- Doležalová Weissmannová, H., Mihočová, S., Chovanec, P., & Pavlovský, J. (2019). Potential ecological risk and human health risk assessment of heavy metal pollution in industrial affected soils by coal mining and metallurgy in Ostrava, Czech Republic. *International Journal of Environmental research and Public Health*, 16(22), 4495. doi: 10.3390/ijerph16224495
- Ebrahimi, A., Ahmadizadeh, S.R., & Rashki, A.R. 2020. Variation of PM10 and its relationship with Dust and Climate in Birjand, Iran. *Desert*, 27(1), pp.97-114. [In Persian]
- Farid Mojtahedi, N., Negah, S., Azizi, Q., & KhoshaKahlaq, F. (2020). Analyzing the pattern of prevailing winds in the warm season in the plains of central Iran. *Journal of Meteorology and Atmospheric Sciences*, 3(1), 45-62. [In Persian]
- Fazel Valipour, M. E. (2022). Investigating heavy metal contamination and their origin in the soil of Jafarabad region (southwest of Kashmir). Razavi Khorasan province. *New findings of applied geology*, 16(32), 125-138. [In Persian]
- Fei, X., Lou, Z., Xiao, R., Lv, X., & Christakos, G., 2023. Contamination and health risk assessment of heavy metal pollution in soils developed from different soil parent materials. *Exposure and Health*, 15(2), pp.395-408.
- Ghanavati, N., Nazarpour, A., & De Vivo, B. (2019). Ecological and human health risk assessment of toxic metals in street dusts and surface soils in Ahvaz, Iran. *Environmental Geochemistry and Health*, 41(2), 875-891. [In Persian]
- Ghemari, C., Waterlot, C., Ayari, A., Leclercq, J., Douay, F., & Nasri-Ammar K. (2017). Assessment of heavy metals in soil and terrestrial isopod *Porcellio laevis* in Tunisian industrialized areas. *Environmental Earth Sciences*, 76(17), 623.
- Hakanson, L. (1980). An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach. *Water Research*, 14(8), 975-1001
- Han, W., Gao, G., Geng, J., Li, Y., & Wang, Y. (2018). Ecological and health risks assessment and spatial distribution of residual heavy metals in the soil of an e-waste circular economy park in Tianjin, China. *Chemosphere*, 197, 325-35. doi: 10.1016/j.chemosphere.2018.01.043
- Hans, W. P. (2006). Assessing and managing nutrient-enhanced eutrophication in estuarine and coastal waters: Interactive effects of human and

- climatic perturbations. *Ecological Engineering*, 26, 40-5.
- Haqparast, M., Tarshizian, H., & Dabiri, R. (2019). Evaluation of the concentration of heavy metals and the level of pollution in the sediments of the Alame Jouk ophiolitic region. *Journal of Environmental Science and Technology*, 21(4), 91-105. [In Persian]
- Heydari Nasab, M., Karam, A., Negaresh, H., & Pahlavanravi, A. (2019). Morphometric Analysis of Sand Dunes and the Speed of Their Displacement in Sistan Plain. *The Journal of Geographical Research on Desert Areas*, 7(1), 149-164. [In Persian]
- Hu, W.Y., Zhang, Y., Huang, B., & Teng, Y. (2017). Soil environmental quality in greenhouse vegetable production systems in eastern China: current status and management strategies. *Chemosphere*, 170, 183-195. doi: 10.1016/j.chemosphere.2016.12.047
- Huang, Y., Li, T.Q., Wu, C.X., He, Z.L., Japenga, J., Deng, M., & Yang, X. (2015). An integrated approach to assess heavy metal source apportionment in peri-urban agricultural soils. *Journal of Hazardous Materials*, 299, 540-549. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2015.07.041
- Jaishankar, M., Tseten, T., Anbalagan, N., Mathew, B. B., & Beeregowda, K. N. (2014). Toxicity, mechanism and health effects of some heavy metals. *Interdisciplinary Toxicology*, 7(2), 60-72. DOI: 10.2478/intox-2014-0009
- Jamshidi, A., Sarikhani, R., Karami, G., & Ghasemi Dehnavi, A. (2020). Investigation of heavy metal pollution and their origin in the east of Azna city, Lorestan province. *New Findings in Applied Geology*, 14(28), 29-44. [In Persian]
- Jiang, Y., Shi, L., Guang, A.L., Mu, Z., Zhan, H., & Wu, Y. (2018). Contamination levels and human health risk assessment of toxic heavy metals in street dust in an industrial city in Northwest China. *Environmental Geochemistry and Health*, 40(5), 2007-2020. doi: 10.1007/s10653-017-0028-1
- Keshavarzi, A., & Kumar, V. (2019). Ecological risk assessment and source apportionment of heavy metal contamination in agricultural soils of Northeastern Iran. *Environmental Health Research*, 29, 544-560. doi: 10.1080/09603123.2018.1555638
- Kesler, S. E., Simon, A. C., & Simon, A. F. (2015) Mineral resources, economics and the environment. Cambridge University Press.
- Kowalska, J. B., Mazurek, R., Gasiorek, 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. DOI: 10.1007/s10653-018-0106-z
- Kumar, V., Pandita, S., Sharma, A., Bakshi, P., Sharma, P., Karouzas, I., Bhardwaj, R., Thukral, A.K., & Cerda, A. (2019). Ecological and human health risk appraisal of metal (loid)s in agricultural soils: a review. *Geology, Ecology, and Landscapes*, 5(3), 173-185
- Li, H. H., Chen, L. J., Yu, L., Guo, Z. B., Shan, C. Q., Lin, J. Q., & Cheng, Z. (2017). Pollution characteristics and risk assessment of human exposure to oral bioaccessibility of heavy metals via urban street dusts from different functional areas in Chengdu, China. *Science of the Total Environment*, 586, 1076-1084. doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.02.092
- Liu, M., Xu, Y., Nawab, J., Rahman, Z., Khan, S., Idress, M., Ali, A., Ahmad, R., Khan, S.A., Khan, A., & Khan, M.Q., 2020. Contamination features, geo-accumulation, enrichments and human health risks of toxic heavy metal (oids) from fish consumption collected along Swat river, Pakistan. *Environmental Technology & Innovation*, 17, p.100554.
- Liu, S.H., Zeng, G.M., Niu, Q.Y., Liu, Y., Zhou, L., Jiang, L.H., Tan, X.F., Xu, P., Zhang, C., & Cheng, M. (2017). Bioremediation mechanisms of combined pollution of PAHs and heavy metals by bacteria and fungi: A mini-review. *Bioresource Technology*, 224, 25-33. doi: 10.1016/j.biortech.2016.11.095
- Moghtaderi, T., Mahmoud, Sh., Shaker, A., & Masihabadi, M. H. (2019). Contamination evaluation, health and ecological risk index assessment of potential toxic elements in the surface soils (Case study: Central Part of BandarAbbas County). *Journal of Soil and Water Resources Protection*, 8(4), 51-65. [In Persian]
- Nael, M., Jalalian, A., Khademi, H., Kalbasi, M., Sotohian, F., & Schulin, R. (2010). Effect of Geopedological Conditions on Content and Distribution of Selected Major and Trace Elements in Forest Soils of Fuman-Masule Region. *Journal of Water and Soil Science*. 14: 71-86. [In Persian]
- Othman, M., Latif, M.T., & Matsumi, Y. 2019. The exposure of children to PM2.5 and dust in indoor and outdoor school classrooms in Kuala Lumpur City Centre. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 170, pp.739-749. doi: 10.1016/j.ecoenv.2018.12.042
- Palumbo, B., Angelone, M., Bellanca, A., Dazzi, C., Hauser, S., Neri, R., & Wilson, J. (2000). Influence of inheritance and pedogenesis on heavy metal distribution in soils of Sicily, Italy. *Geoderma*, 95, 247-266.
- Ghasemzadeh, A., Karimi, A., Ziyae, A., & Fatut, A. (2021). Assessment of pollution and origin of some heavy elements in agricultural soils of south Sabzevar, northeast of Iran. *Journal of Electronic Soil Management and Sustainable Production*, 11(1), 1-26. [In Persian]
- Rodríguez Martín, J.A., Ramos Miras, J.J., Boluda, R. & Gil, C. (2013). Spatial relations of heavy metals in arable and greenhouse soils of a Mediterranean environment region (Spain), *Geoderma*, 200, 180-188.

- Rose, S., & Shea, J. A. (2007). Environmental geochemistry of trace metal pollution in urban watersheds. *Developments in Environmental Science*, 5, 99-131.
- Safari, M., Jafarian, A., Ganjovian, M. A., & Ismahili, J. (2021). Investigating the severity of heavy element pollution in surface soils (Study area: Shahrekord city). *Iranian Quaternary Journal*, 7(3), 1006-1023. [In Persian]
- Safiur Rahman, S., Kumar, P., Ullah, M., Yeasmin Jolly, N., Akhter, Sh, Kabir, J., Bilkis, B., & Abdus, S. (2021). Elemental analysis in surface soil and dust of roadside academic institutions in Dhaka city, Bangladesh and their impact on human health. *Environmental Chemistry and Ecotoxicology* 3 - 197-208.
- Sakan, S. M., Dordevic, D. S., Manojlovic, D. D. and Predrag, P. S., (2009). Assessment of heavy metal pollutants accumulation in the Tisza river sediments. *Journal of Environmental Management*, 90: 3382-3390. doi: 10.1016/j.jenvman.2009.05.013
- Sellami, S., Zeghouan, O., Dhahri, F., Mechi, L., Moussaoui, Y., & Kebabi, B. (2022). Assessment of heavy metal pollution in urban and peri-urban soil of Setif city (High Plains, eastern Algeria). *Environmental Monitoring and Assessment*, 194(2), p. 126. doi: 10.1007/s10661-022-09781-4
- Skaldina, O., Peräniemi, S., & Sorvari, J. (2018). Ants and their nests as indicators for industrial heavy metal contamination. *Environmental Pollution*. 240, 574-81. doi: 10.1016/j.envpol.2018.04.134
- Soltani-Gerdefaramarzi, S., Ghasemi, M., & Gheysouri, M. (2021). Pollution, human health risk assessment and spatial distribution of toxic metals in urban soil of Yazd City, Iran. *Environmental Geochemistry and Health*. 43(9), 3469-3484. [In Persian]
- Taghipour, M., Ayoubi, S., & Khademi, H. (2011). Contribution of lithologic and anthropogenic factors to surface soil heavy metals in western Iran using multivariate geostatistical analyses. *Soil and Sediment Contamination*, 20, 921-937.
- Triandiza, T., Rugebregt, M.J., & Opier, R.D.A. (2021). May. Prediction of sediment quality based on the concentration of heavy metals Cu, Zn, and Ni in Jakarta Bay using the index analysis approach. *In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 777(1), 012031.
- USEPA. (1983). Office of Solid Waste and Emergency Response, *Hazardous Waste Land Treatment*.
- Wang, X., Sato, T., Xing, B., Tamamura, S., & Tao, S. (2005). Source identification, size distribution and indicator screening of airborne trace metals in Kanazawa, Japan. *Journal of Aerosol Science*, 36(2), 197-210.
- Wei, B., Jiang, F., Li, X., & Mu, S. (2010). Heavy metal induced ecological risk in the city of Urumqi, NW China. *Environmental Monitoring and Assessment*. 160, 33-45. doi: 10.1007/s10661-008-0655-1
- Williams, J.A., & Antoine, J. (2020). Evaluation of the elemental pollution status of Jamaican surface sediments using enrichment factor, geoaccumulation index, ecological risk and potential ecological risk index. *Marine Pollution Bulletin*, 157, p.111288. doi: 10.1016/j.marpolbul.2020.111288
- Wong, C. S. C., Li, X., & Thornton, I. (2006) Urban environmental geochemistry of trace metals. *Environmental Pollution*. 142:1- 16. doi: 10.1016/j.envpol.2005.09.004
- Yaroshevsky, A. A. (2016). Abundances of chemical elements in the Earth's crust. *Geochemistry International*, 44(1), 48-55.
- Zarasvandi, A., Akbarnejad, M., Rezaei, M., Azadi, R., & Rastmanesh, F. (2023). Environmental geochemistry and source of heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in the dust street samples of Mahshahr city. *Advanced Applied Geology*, 13(1), pp.199-223.
- Zhang, C., Yang, Y., Li, W., Zhang, C., Zhang, R., Mei, Y., & Liu, Y. (2015). Spatial distribution and ecological risk assessment of trace metals in urban soils in Wuhan, central China. *Environmental Monitoring and Assessment*, 187, 1-16. doi: 10.1007/s10661-015-4762-5
- Zhang, J., Qu, Q., & Chen, X. B. (2022). Assessing the sustainable safety practices based on human behavior factors: an application to Chinese petrochemical industry. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(29), 44618-44637. DOI: 10.1007/s11356-022-18909-5
- Zhang, X.P., Deng, W., & Yang, X. M. (2002). The background concentrations of soil trace elements and their relationships to parent materials and vegetation in Xizang (Tibet). *Journal of Asian Earth Sciences*, 21, 67-174.
- Zhuo, H., Wang, X., Liu, H., Fu, S., Song, H., & Ren, L. (2020). Source analysis and risk assessment of heavy metals in development zones: a case study in Rizhao, China. *Environmental Geochemistry and Health*, 42(1), 135-146. doi: 10.1007/s10653-019-00313-7
- Zoller, W. H., Gladney, E. S., & Duce, R. A. (1974). Atmospheric concentrations and sources of trace metals at the South Pole. *Science*, 183(4121), 198-200. doi: 10.1126/science.183.4121.198