

Pollution indices of heavy metals in agricultural soils irrigated with raw sewage (Meshginshahr, Ardabil)

Ayda Abbasi-Kalo¹ *, Sayeh Karimi Barzili² , Shahin Oustan³ , Hossein Shahab Arkhazlo⁴ 

¹ Assistant Professor, Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohagheh Ardabili, Ardabil, Iran

² Graduated M.Sc. Student, Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohagheh Ardabili, Ardabil, Iran

³ Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Tabriz University, Tabriz, Iran

⁴ Associate Professor, Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohagheh Ardabili, Ardabil, Iran

Extended Abstract

Introduction

As a great reservoir of nutrients and pollutants, soil plays an important role in health and socio-ecological sustainability. Soil pollution increases as a result of the entry of heavy metals from operations such as agriculture, urbanization, and industrialization. Unlike organic pollutants, heavy metals cannot be decomposed and remain in the soil for more than 150 years. The continuous increase in the concentration of heavy metals in the soil due to wrong agricultural operations has had a serious effect on human health. Long-term use of wastewater in land irrigation often increases the amount of heavy metals in the soil. The present research aims to investigate the amount of heavy metals and pollution indicators.

Materials and Methods

The study area is located in agricultural soils irrigated with raw sewage in Barzil village of Meshginshahr city (38° 23' 34" N and 47° 1' 7" E). To perform this research, a regular gridding method with a 250 m dimension was done and 97 surface soil samples (0 to 30 cm) were taken. After transferring to the laboratory, the samples were dried and passed through a 2 mm sieve. The physical and chemical characteristics of the soil including pH, EC, texture, organic carbon, and Calcium Carbonate Equivalent (CCE) are measured. The concentration of heavy metals Copper (Cu), Zinc (Zn), Cadmium (Cd), Nickel (Ni), Chromium (Cr), Lead (Pb), Iron (Fe), and Manganese (Mn) was measured by Aqua Regia digestion method and using Atomic Absorption Spectrometry. The spatial distribution of heavy metals was displayed using the Kriging interpolation method. Pollution indices of Enrichment Factor (EF), Geo-accumulation Index (I_{geo}), Contamination Factor (CF), and Pollution Load Index (PLI) were calculated.

Results and Discussion

The maximum values of pH and electrical conductivity of the soil in some places irrigated with wastewater have reached 7.70 and 4.35, respectively, and their average values have reached 6.69 and 1.45, respectively. The organic carbon of the studied soil samples varies from at least 0.59% to 3.50% an average of 2.14%. The relatively high amount of organic carbon can be attributed to the land use type of garden. Four texture classes of sandy loam (65%), loamy sand (23%), loam (10%), and sand (2%) have been observed. The average concentration of the three metals Zn (85.41 mg Kg⁻¹), Cd (2.42 mg Kg⁻¹), and Pb (17.38 mg Kg⁻¹) was higher than the average of their continental reference values (0.7, 0.2 and 12.50 mg Kg⁻¹, respectively). The higher values rather than continental reference values indicate human intervention and its effect on increasing the concentration of these element contents. It means that irritating sewage caused increasing heavy metal concentration in the study area. The averages of Cu, Ni, Cr, Fe, and Mn were lower than continental references. Pollution indices indicate the state of accumulation of polluting elements in a place compared to the initial values in the parent materials. The EF index of Cd (75.85) is the highest value among the eight metals and 99% of the the study area is classified as a very high enrichment class. The EF of Pb (8.68), Zn (7.42), and Cu (6.14) are in

lower ranks. 56.7 % of study area classified as considerable enrichment by Cu and 46.4 % by Zn. The EF clearly indicates the involvement of human activities in the accumulation of four elements Cd, Pb, Zn, and Cu in the study area. Also, moderate enrichment class is caused by Mn, Cu, Zn, and Cr in 63.9, 42.3, 42.3, and 25.8% of the study area, respectively. The lowest and highest amount of the I_{geo} index is related to Ni (-6.90) and Zn (3.72), respectively. The average of I_{geo} varies as $I_{geo}Cd > I_{geo}Pb > I_{geo}Cu > I_{geo}Zn > I_{geo}Mn > I_{geo}Cr > I_{geo}Fe > I_{geo}Ni$ that introduces Cd as the most pollutant metal. The negative values of I_{geo} indicate the absence of heavy metal pollution and so absence of pollution. The entire study area grouped as non-polluted or clean class according to Ni, Cr, Fe, and Mn but 86.6% of the area grouped as clean considering Cu and Zn. Cd placed 38.1% of the area in the medium pollution class and 59.8% of the area in the severe pollution class. 69.1% of the area was found to be clean and only 28.9% of the area was moderately polluted with Pb. According to this index, Cd is in the extremely polluted class in the whole study area. The lowest (0.01) and highest (19.72) value of CF belongs to Ni and Zn, respectively. The average of this index varies from 0.13 for Ni to 12.09 for Cd. Except for Cd, which placed 98% of the area in a very high pollution class, the rest of the metals had low or moderate pollution classes. Meanwhile, the low pollution classes had higher contributions than the medium pollution classes. 100% of the area was grouped in the low pollution class considering Ni, Cr, Fe, and Mn but according to Zn and Cu 71.1 and 60.8% of the area was placed in the low pollution class, respectively. Medium pollution class was observed only by three metals Pb (73.2%), Cu (39.2%), and Zn (24.7%). PLI values less than 1 indicate ideal conditions where no pollution has occurred. The values of the calculated PLI index were less than 1 in the whole study area indicating the absence of pollution.

Conclusion

Among the four indices, the I_{geo} index has classified a larger extent of the studied area in extremely polluted classes, while the PLI index does not show any pollution in the study area. Because I_{geo} , like the other two indices (EF and CF), is an individual index and considers the concentration of each metal separately, the PLI index is a cumulative index and shows the cumulative effects of all metals. In other words, high concentrations of metals disappear among low concentrations and individual effects of metals are not visible. This may mislead decision makers in dealing with the type and origin of pollution and cause negligent actions. Therefore, it is recommended that considering the harmful effects of each of the metals, individual indicators should be taken seriously.

Keywords: Barzil, Continental reference values, Ni, Pb, Regular gridding, Zn

Article Type: Research Article

*Corresponding Author, E-mail: abbasiayda2014@gmail.com

Citation: Abbasi-Kalo, A., Karimi Barzili, S., Oustan, Sh., & Shahab Arkhazlo, H. (2023). Pollution indices of heavy metals in agricultural soils irrigated with raw sewage (Meshginshahr, Ardabil). *Water and Soil Management and Modeling*, 3(4), 286-306.

DOI: 10.22098/mmws.2023.13370.1332

DOR: 20.1001.1.27832546.1402.3.4.20.4

Received: 23 July 2023, Received in revised form: 28 August 2023, Accepted: 28 August 2023, Published online: 28 August 2023

Water and Soil Management and Modeling, Year 2023, Vol. 3, No. 4, pp. 286-306

Publisher: University of Mohaghegh Ardabili

© Author(s)





شاخص‌های آلاینده‌ی فلزات سنگین در خاک‌های کشاورزی آبیاری شده با فاضلاب خام (مشگین‌شهر، اردبیل)

آیدا عباسی کلو^۱، سایه کریمی بارزلی^۲، شاهین اوستان^۳، حسین شهاب آرخازلو^۴

^۱ استادیار، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران
^۲ دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران
^۳ استاد، گروه خاک‌شناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران
^۴ دانشیار، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

چکیده

خاک به‌عنوان مخزن مهم مواد غذایی و آلاینده، نقش مهمی در سلامت و پایداری اجتماعی-بوم‌شناختی ایفا می‌کند. افزایش آلودگی خاک ناشی از ورود فلزات سنگین است که در نتیجه عملیاتی نظیر کشاورزی، شهرسازی و صنعتی شدن رخ می‌دهد. هدف پژوهش حاضر، بررسی میزان فلزات سنگین و شاخص‌های آلودگی در خاک‌های آبیاری شده با فاضلاب خام در روستای بارزلی از توابع شهرستان مشگین‌شهر است. بدین‌منظور در منطقه مطالعاتی شبکه‌بندی منظم با ابعاد ۲۵۰ متر انجام و ۹۷ نمونه سطحی خاک (صفر تا ۳۰ سانتی‌متر) برداشت شد. نمونه‌ها بعد از انتقال به آزمایشگاه خشک شده و از الک دو میلی‌متری عبور داده شدند. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک از جمله pH، EC، بافت، کربن آلی، کربنات کلسیم معادل خاک به روش‌های استاندارد و غلظت فلزات سنگین Cu، Zn، Cd، Ni، Cr، Pb، Fe و Mn توسط طیف‌سنج جذب اتمی اندازه‌گیری شدند. شاخص‌های آلودگی شامل عوامل غنی‌شدگی، شاخص زمین‌انباشت، عامل آلودگی و شاخص بار آلودگی محاسبه شدند. میانگین غلظت سه فلز Zn، Cd و Pb از میانگین مرجع قاره‌ای آن‌ها بالاتر بود که نشان‌دهنده دخالت انسان در افزایش غلظت آن‌ها است. عامل غنی‌شدگی و مساحت تحت تأثیر آلودگی توسط فلز Cd در بین فلزات مطالعه شده بالاترین مقدار را داشت و Zn و Pb در مرتبه دوم و سوم قرار داشتند. کم‌ترین و بیش‌ترین مقدار شاخص زمین‌انباشت به ترتیب مربوط به Ni و Zn بود. از نظر این شاخص دو فلز Cd و Pb کلاس‌های آلودگی شدید و متوسط ایجاد کرده‌اند و سایر فلزات تقریباً بدون آلودگی بودند. کم‌ترین و بیش‌ترین مقدار عامل آلودگی به ترتیب به فلز Ni و Zn تعلق داشت. کلاس‌های آلودگی حاصل از دو شاخص زمین‌انباشت و عامل آلودگی مشابهت قابل‌توجهی داشت. مقدار شاخص بار آلودگی کم‌تر از یک بود که بیان‌کننده عدم وجود آلودگی در منطقه است. شاخص‌های انفرادی (I_{geo}، EF) و (CF) کلاس‌های آلودگی شدیدتری را نسبت به شاخص تجمعی PLI به‌وجود آوردند. به‌عبارت دیگر استفاده از شاخص‌های تجمعی باعث نادیده شدن آلودگی شده است. این امر می‌تواند تصمیم‌گیران را در برخورد با نوع و منشأ آلودگی به اشتباه انداخته و برخوردهای جدی را به‌دنبال نداشته باشد.

واژه‌های کلیدی: بارزلی، روی، سرب، شبکه‌بندی منظم، مقادیر مرجع قاره‌ای، نیکل

نوع مقاله: پژوهشی

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: abbasiayda2014@gmail.com

استاد: عباسی کلو، آیدا، کریمی بارزلی، سایه، اوستان، شاهین، و شهاب آرخازلو، حسین (۱۴۰۲). شاخص‌های آلاینده‌ی فلزات سنگین در خاک‌های کشاورزی آبیاری شده با فاضلاب خام (مشگین‌شهر، اردبیل). *مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک*، ۳(۴)، ۲۸۶-۳۰۶.

DOI:10.22098/mmws.2023.13370.1332
DOR: 20.1001.1.27832546.1402.3.4.20.4

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۵/۰۱، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۶/۰۶، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۶/۰۶، تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۰۶/۰۶

مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک، سال ۱۴۰۲، دوره ۳، شماره ۴، صفحه ۲۸۶ تا ۳۰۶

© نویسنده‌گان

ناشر: دانشگاه محقق اردبیلی



۱- مقدمه

خاک یک منبع پویاست که توسط اجزای زنده و غیرزنده تشکیل شده است. همچنین، خاک به‌عنوان مخزن مهم مواد غذایی و آلاینده، نقش مهم و تعیین‌کننده در سلامت و پایداری اجتماعی-بوم‌شناختی بازی می‌کند. افزایش آلودگی خاک ناشی از ورود فلزات سنگین حاصل از عملیاتی نظیر کشاورزی، شهرسازی و صنعتی شدن از دلایل افزایش غلظت آن‌ها در خاک هستند. با این حال، آلودگی خاک به یک مانع مهم برای توسعه منطقه‌ای و سلامت انسان در دهه‌های اخیر تبدیل شده است (Baltas et al., 2020). ورود فلزات سنگین به خاک باعث ایجاد خطرات بالقوه‌ای برای انسان و کل موجودات یک اکوسیستم می‌شود. فلزات و یا شبه فلزات با چگالی بزرگ‌تر از پنج گرم بر سانتی‌متر مکعب به‌عنوان فلزات سنگین شناخته شده و مهم‌ترین نوع آلاینده‌های خاک در کل دنیا شناخته می‌شوند (Rachwat et al., 2017). بنابراین، در اغلب مطالعات خطرات بوم‌شناختی و سلامتی ناشی از فلزات سنگین و توزیع مکانی آن‌ها مورد توجه قرار گرفته است.

فلزات سنگین برخلاف آلاینده‌های آلی، قابل تجزیه نبوده و بیش از ۱۵۰ سال در خاک باقی می‌مانند (Adelopo et al., 2018). افزایش مداوم غلظت فلزات سنگین در خاک در اثر عملیات کشاورزی غلط، اثر جدی بر سلامت انسان داشته است (Rahimpour and Abaspour, 2014). زیرا فلزات سنگین می‌توانند از طریق مصرف آب، استنشاق و جذب پوستی وارد بدن انسان شوند (Long et al., 2021). گرچه کوددهی بیش از حد و استفاده از حشره‌کش‌ها، کمپوست و کودهای غیراستاندارد از منابع مهم ورود فلزات سنگین به درون خاک هستند (Keshavarzi and Kumar, 2019) ولی آبیاری با آب فاضلاب و فعالیت‌های صنعتی یکی از مهم‌ترین طرق ورود فلزات سنگین به خاک است. فلزات سنگین از نظر زیستی تجزیه‌ناپذیر بوده و به‌آسانی به حد سمیت رسیده و به‌شدت در محیط زیست ماندگار هستند (Sharma et al., 2007). استفاده طولانی‌مدت از فاضلاب در آبیاری اراضی اغلب باعث افزایش میزان فلزات سنگین در خاک می‌شود (Larcheveque et al., 2006). آلودگی فلزات سنگین در خاک‌های کشاورزی می‌تواند منجر به بی‌نظمی در ساختار خاک، دخالت در رشد گیاه و حتی آسیب به سلامت انسان از طریق ورود به زنجیره غذایی شود (Mirzashahi and Bazargan, 2015). استفاده از فاضلاب‌های شهری و صنعتی در آبیاری اراضی مناطق حومه شهری در بسیاری از نقاط جهان به امری معمول و متعارف تبدیل شده است (Singh and Agrawal, 2008) که سودمندی یا زیانبار بودن آن بسته به محیط جغرافیایی می‌تواند متفاوت باشد.

مجموعه بررسی‌ها نشان می‌دهد که نوع فاضلاب مورد استفاده، میزان تصفیه، اقلیم منطقه و نوع خاک و گیاه نقش مهمی در چگونگی استفاده از فاضلاب دارد و به‌نظر می‌رسد که محصولات آبیاری شده با فاضلاب و خاک منطقه باید به‌صورت دوره‌ای مورد تجزیه شیمیایی قرار گیرند. فاضلاب‌های صنعتی دارای مقادیر زیادی عناصر کم‌مصرف و فلزات سنگین هستند که به هنگام آبیاری به خاک اضافه شده و در نتیجه گیاه مقدار زیادی از آن‌ها را جذب می‌نماید. به‌عنوان مثال آبیاری طولانی‌مدت اراضی جنوب تهران با فاضلاب شهری، سبب افزایش فلزات سنگین سرب، روی و مس به میزان دو تا سه برابر و افزایش عناصر تغذیه‌ای فسفر و ماده آلی در این اراضی نسبت به اراضی شاهد تحت آبیاری با آب قنات شد (Mirzashahi and Bazargan, 2015). گزارش‌های مختلف حاکی از افزایش غلظت بعضی فلزات سنگین خاک در پی کاربرد فاضلاب است. در این راستا، Chen et al. (2009) گزارش کردند که آبیاری ۵۰ ساله با فاضلاب باعث افزایش معنادار غلظت کادمیوم، سرب، نیکل، روی و مس نسبت به خاک مرجع آبیاری شده با آب چاه شده است. در پژوهشی، Munir et al. (2007) هم گزارش نمودند که آبیاری گیاهان علوفه‌ای با فاضلاب شهری به‌مدت دو تا ۱۰ سال، غلظت عناصر روی، مس، آهن و منگنز در خاک را افزایش داده است. در پژوهش دیگری، Magdaleno et al. (2011) نیز نتایج مشابهی در مکزیک به‌دست آوردند که بیش از ۸۰ سال آبیاری با فاضلاب موجب افزایش مقدار قابل جذب عناصر سنگین در خاک شد، اما افزایش تجمع هیچ یک از عناصر یاد شده بر اساس استانداردهای کشور مکزیک از حد مجاز تجاوز نکرد. در ادامه، Kolawole et al. (2018) با بررسی غلظت و آلودگی فلزات سنگین در خاک و رسوبات منطقه صنعتی ایبادان، نشان دادند که غنی‌سازی قابل‌توجهی در سطح کادمیم، سرب و مس در خاک و رسوب در منطقه مورد مطالعه صورت گرفت و نقاط نمونه‌برداری در منطقه صنعتی، از نظر کادمیوم، سرب و مس خطر زیست محیطی بالقوه بالایی نشان داد. در مطالعه‌ای، Huajun et al. (2011) درجه آلودگی فلزات سنگین را در لجن فاضلاب با استفاده از شاخص خطر زیست‌محیطی ارزیابی و ترتیب درجه خطر برای فلزات مورد مطالعه را مشخص کردند که نیکل بالاترین درجه خطر (خطر زیاد) را نشان داد. در مطالعه دیگری، Baltas et al. (2020) در پژوهش خود در ترکیه با بررسی شاخص‌های آلودگی مختلف نتیجه گرفتند که سطوح فلزات سنگین مورد مطالعه در منطقه به‌مراتب بالاتر از میانگین جهانی بوده و این افزایش تحت تأثیر دخالت انسانی (عملیات کشاورزی) قرار گرفته است. آبیاری با فاضلاب، علاوه بر افزایش غلظت عناصر سنگین در خاک، ویژگی‌ها و کیفیت‌های خاک را نیز تحت تأثیر خود قرار می‌دهد.

انگور در استان اردبیل است. وجود آلودگی در خاک‌های این منطقه می‌تواند سلامت زیستی جامعه تغذیه‌کننده از تولیدات را به خطر بیندازد. شناسایی مناطق آلوده و کمی‌سازی میزان آلودگی می‌تواند به کاهش خطرات آلودگی و یافتن راه‌حلی برای کاهش آلودگی کمک نماید. لذا، مطالعه حاضر با هدف بررسی تأثیر استفاده از فاضلاب خام بر ویژگی‌های خاک و شاخص‌های آلودگی فلزات سنگین در روستای بارزیل از توابع شهرستان مشگین‌شهر صورت گرفته است.

۲- مواد و روش‌ها

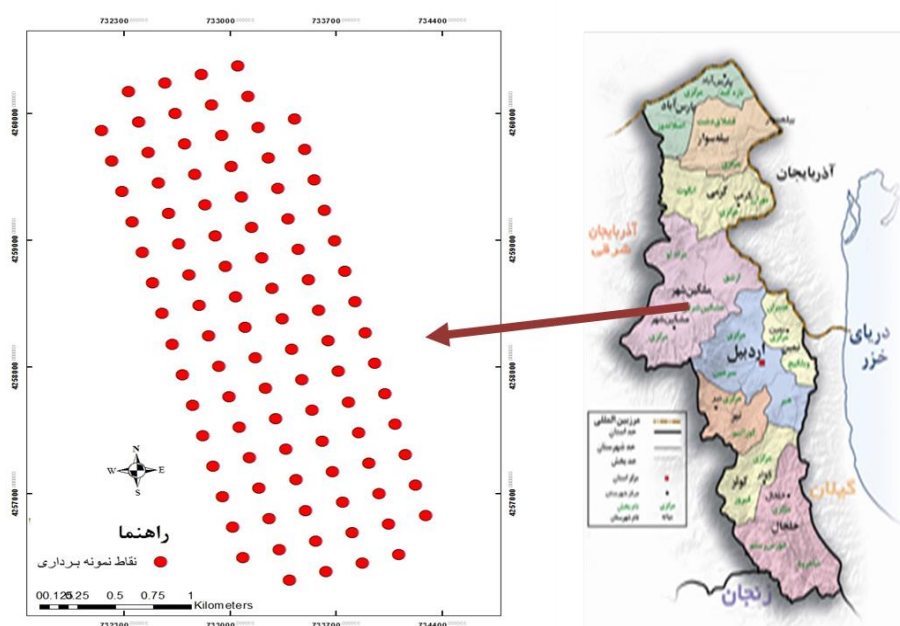
۲-۱- منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه این پژوهش در روستای بارزیل از توابع شهرستان مشگین‌شهر (۹۰ کیلومتری غرب استان اردبیل) به عرض جغرافیایی ۳۸ درجه و ۲۳ دقیقه و ۳۴ ثانیه شمالی و طول جغرافیایی ۴۷ درجه و یک دقیقه و هفت ثانیه شرقی واقع شده است (شکل ۱). کاربری غالب در این منطقه درختان میوه، میانگین بارندگی سالانه ۳۰۰ میلی‌متر و بر اساس طبقه‌بندی اقلیمی دومارتن توسعه یافته، منطقه نیمه‌خشک است.

باتوجه به استفاده طولانی‌مدت از فاضلاب خام شهری (بیش از ۱۰ سال) به‌عنوان آب آبیاری در منطقه روستای بارزیل، بعد از بازدید صحرایی در فصول آبیاری (بهار و تابستان) نمونه‌برداری سطحی انجام شد. تعداد ۹۷ نمونه خاک به روش شبکه‌بندی منظم ۲۵۰×۲۵۰ مترمربعی در مساحت ۹۴۰ هکتار برداشت شد.

همچنین، Rohani Shahraki et al. (2005) در مقایسه تأثیر فاضلاب و آب چاه بر خاک منطقه شمال اصفهان نشان دادند که هدایت الکتریکی، اسیدیته و نسبت جذب سدیم با شوری آب مصرفی ارتباط نزدیکی دارد. غلظت عناصری از قبیل سرب، روی، منگنز، مس و آهن در خاک آبیاری شده با فاضلاب بیش‌تر از خاک آبیاری شده با آب چاه بود، اگرچه تفاوت معنادار نبود. در نهایت، Mojiri (2011) در مطالعه خود افزایش میزان هدایت الکتریکی، فسفر، درصد مواد آلی، نیتروژن کل، پتاسیم، کلر، سدیم، کادمیم، آهن و روی را در عمق صفر تا ۱۰ سانتی‌متری خاک در منطقه آبیاری شده با فاضلاب نسبت به منطقه شاهد گزارش کرد.

تهدید سلامتی جامعه از خطرات رایج افزایش فلزات سنگین در خاک است که مطالعات زیادی این خطر را نشان داده‌اند. بی‌توجهی به انباشتگی فلزات سنگین در خاک‌های کشاورزی خطرات جبران‌ناپذیری به‌دنبال دارد؛ زیرا این فلزات در خاک بسیار ماندگار بوده و از طریق زنجیره غذایی گیاهان، استنشاق و حتی تماس پوستی وارد بدن انسان می‌شوند و مشکلات زیادی را برای سلامتی انسان به‌وجود می‌آورند. لذا، بررسی و شناسایی مناطق آلوده به فلزات سنگین در مدیریت و برنامه‌ریزی استفاده از خاک اهمیت فراوانی دارد. متأسفانه مطالعات زیست محیطی به دلایل مختلفی توجه کافی را به خود جلب نکرده است و نیازمند مطالعات دقیق‌تری است. اراضی زراعی و باغی شهرستان مشگین‌شهر و توابع آن از جمله تولیدکننده‌های عمده میوه به‌خصوص سیب و



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه در استان اردبیل
Figure 1- Location of the study area on Ardabil province

مخرج نیز نشان‌دهنده نسبت غلظت مرجع آن عنصر به نسبت آهن مرجع است (Baltas et al., 2020). در رابطه بالا از غلظت‌های مرجع قاره‌ای (Taylor, 1964) استفاده شده است. اگر مقدار EF حدود یک باشد نشان‌دهنده غنی‌شدگی فلز در اثر فرآیندهای طبیعی و اگر مقدار این شاخص ۱/۵ یا بیش‌تر شود نشان‌دهنده دخالت انسان در غنی‌شدگی آن عنصر در خاک است. مقادیر مرجع استفاده شده در این مطالعه در جدول ۱ آورده شده است.

۲-۳-۲- شاخص زمین‌انباشت (Igeo)

این شاخص نشان‌دهنده میزان انباشتگی فلز مورد نظر در مقایسه با مقدار مرجع بوده و از رابطه (۲) به‌دست می‌آید:

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

که در آن، C_n نشان‌دهنده غلظت فلز در نمونه خاک و B_n غلظت زمینه آن فلز در زمینه (غلظت قاره‌ای در این مطالعه) (جدول ۱) بوده و عدد ۱/۵ برای به حداقل رساندن اثر تغییرات احتمالی در زمینه سنگ اعمال شده است (Baltas et al., 2020).

۲-۳-۳- عامل آلودگی (CF)

این عامل به‌سادگی میزان افزایش یک فلز نسبت به مقدار زمینه را محاسبه می‌کند و با استفاده از این عامل می‌توان ادعا کرد که فلز مورد نظر نسبت به زمینه چند برابر شده است. عامل آلودگی از طریق رابطه (۳) محاسبه می‌شود. در رابطه زیر C_{metal} غلظت فلز در نمونه خاک و $C_{background}$ غلظت مرجع فلز یا خاک آلوده نشده است.

$$CF = \frac{C_{metal}}{C_{background}} \quad (3)$$

۲-۳-۴- شاخص بار آلودگی (PLI)

این شاخص با عامل آلودگی مرتبط است. به‌عبارت دیگر عامل آلودگی برای تک تک فلزات مورد مطالعه محاسبه می‌شود ولی شاخص بار آلودگی برای یک منطقه از حاصل ضرب عامل آلودگی همه فلزات محاسبه می‌شود (رابطه ۴). در رابطه زیر، عامل CF عامل آلودگی فلز n ام و n تعداد فلزات سنگینی است که عامل آن‌ها در محاسبه این شاخص دخالت داده شده است (Baltas et al., 2020).

$$PLI = \sqrt[n]{CF_1 \times CF_2 \times CF_3 \times \dots \times CF_n} \quad (4)$$

در پایان از جدول‌های ۲ و ۳ برای تقسیم‌بندی کلاس‌های مختلف شاخص‌های آلودگی استفاده شد. تجزیه فلزات سنگین در آب فاضلاب استفاده شده در منطقه با جذب اتمی (شیماتزو- AA6300) اندازه‌گیری شد (جدول ۴). آزمون نرمال بودن داده‌ها

۲-۲- تجزیه‌های آزمایشگاهی

نمونه‌های برداشت شده بعد از خشک شدن در هوا و عبور از الک دو میلی‌متری مورد آزمایش و تجزیه قرار گرفت. بافت خاک به روش هیدرومتری دو قرائته (Gee and Bauder, 1986)، اسیدیته با دستگاه pH متر و هدایت الکتریکی با دستگاه هدایت‌سنج، (Jackson, 1952)، کربن آلی به روش والکلی بلک (Nelson and Sommers, 1996)، میزان سدیم، پتاسیم و کلسیم با فلیم فتومتر (Jones, 2001) اندازه گرفته شد.

برای اندازه‌گیری میزان فلزات سنگین در خاک، نمونه بخش ریز (زیر دو میلی‌متر) مورد استفاده قرار گرفت. عمل هضم با استفاده از روش تیزاب سلطانی (Aqua Regia) با نسبت ۱:۳ اسید نیتریک به اسید کلریدریک (یک حجم اسید نیتریک و سه حجم اسید کلریدریک) صورت پذیرفت. ۰/۵۰۰۰ گرم از نمونه خاک برداشته و در بشر ۲۵ میلی لیتر ریخته شد و ۱۲ میلی لیتر محلول آکوارجیا به آن اضافه شد. پس از گذاشتن شیشه ساعتی روی بشرهای حاوی عصاره، نمونه‌ها به مدت سه ساعت روی یک صفحه داغ با دمای ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شدند و پس از رسیدن به مرز تبخیر، با اسید نیتریک دو درصد رقیق شده و پس از فیلتر با کاغذ واتمن ۴۲، با آب دیونیزه به حجم ۱۰۰ میلی‌لیتر رسانده شدند (Chen and Ma, 2001). غلظت فلزات کروم (Cr)، مس (Cu)، روی (Zn)، کادمیم (Cd)، نیکل (Ni)، سرب (Pb)، منگنز (Mn) و آهن (Fe) در عصاره تهیه شده با استفاده از دستگاه جذب اتمی (شیماتزو- AA6300) به روش شعله قرائت شده و به وزن خشک خاک (میلی‌گرم بر کیلو گرم) تبدیل شد.

۲-۳-۳- شاخص‌های آلودگی

برای بررسی اثر فاضلاب بر روی میزان فلزات سنگین در خاک مورد مطالعه، از شاخص‌های عامل غنی‌شدگی^۱، شاخص زمین‌انباشت^۲، عامل آلودگی^۳ و شاخص بار آلودگی^۴ استفاده شد.

۲-۳-۱- عامل غنی‌شدگی (EF)

این عامل نشان‌دهنده درجه آلودگی نمونه‌های خاک و ارزیابی میزان تأثیر انسان در افزایش غلظت فلزات سنگین در خاک بوده و از رابطه (۱) محاسبه می‌شود:

$$EF = \frac{(C_n/C_{Fe})_{Sample}}{(C_n/C_{Fe})_{Reference}} \quad (1)$$

در این رابطه، صورت رابطه نشان‌دهنده نسبت غلظت فلز هر نمونه (Cn) به غلظت آهن موجود در آن نمونه (C_{Fe}) بوده و

¹ Enrichment factor (EF)

² Geo-accumulation index (I_{geo})

³ Contamination factor (CF)

⁴ Pollution load index (PLI)

با روش اسیمرونوف- کلموگراف، تهیه نقشه‌ها و محاسبات آماری به ترتیب با نرم‌افزار ArcGIS10.6.1 و SPSS17 صورت گرفت.

جدول ۱- مقادیر مرجع قاره‌ای فلزات سنگین مورد مطالعه (Taylor, 1964)

Table 1- Continental reference values of studied heavy metals (Taylor, 1964)

مقدار (میلی‌گرم بر کیلو گرم)	مس (Cu)	روی (Zn)	کادمیم (Cd)	نیکل (Ni)	کروم (Cr)	سرب (Pb)	آهن (Fe)	منگنز (Mn)
میانگین (Mean)	55	70	0.2	75	100	12.50	56300	950
بازالت (Basalt)	100	100	0.2	150	200	5	85600	1500
گرانیت (Granite)	10	40	0.2	0.5	4	20	27000	400

جدول ۲- کلاس‌بندی شاخص‌های آلودگی (Kusin et al., 2018)

Table 2- Classification of pollution Indexes (Kusin et al., 2018)

کلاس‌بندی	CF	کلاس‌بندی	EF	کلاس‌بندی	I_{geo}
آلودگی پایین	$CF < 1$	عدم غنی‌شدگی یا حداقل	$EF < 2$	کلاس‌بندی	$I_{geo} < 0$
آلودگی متوسط	$1 \leq CF < 3$	غنی‌شدگی متوسط	$2 \leq EF < 5$	غیرآلوده	$0 \leq I_{geo} < 1$
آلودگی قابل توجه	$3 \leq CF < 6$	غنی‌شدگی چشم‌گیر	$5 \leq EF < 40$	غیرآلوده تا آلودگی متوسط	$1 \leq I_{geo} < 2$
آلودگی خیلی بالا	$CF \geq 6$	غنی‌شدگی خیلی بالا	$EF \geq 40$	آلودگی متوسط تا شدید	$2 \leq I_{geo} < 3$
		غنی‌شدگی بی‌نهایت بالا		آلودگی شدید	$3 \leq I_{geo} < 4$
				آلودگی شدید تا بی‌نهایت شدید	$4 \leq I_{geo} < 5$
				بی‌نهایت آلوده	$I_{geo} \geq 5$

جدول ۳- کلاس‌های آلودگی بر اساس شاخص بار آلودگی (Kowalska et al., 2018)

Table 3- Classes of pollution according to Pollution Load Index (Kowalska et al., 2018)

مقدار PLI	کلاس	کیفیت خاک
< 1	1	شرایط ایده‌آل
1	2	حد مرزی آلودگی
> 1	3	نابودی کیفیت خاک

جدول ۴- غلظت فلزات سنگین در نمونه آب فاضلاب

Table 4- Concentration of heavy metals in the wastewater sample

فلز	Cu	Zn	Cd	Ni	Cr	pb
غلظت (میلی‌گرم بر لیتر)	0.1	0.2	0.05	0.25	less	1.7

۳- نتایج و بحث

فراوانی را در بین کلاس‌های بافت خاک دارد. کلاس‌های شن لومی با ۲۳ درصد و لوم با ۱۰ درصد به ترتیب در مرتبه دوم و سوم و کلاس شن با دو درصد سهم کم‌ترین فراوانی را دارند. این شکل نشان می‌دهد که خاک‌های مورد مطالعه در گروه کلاس‌های سبک بافت قرار دارند. با در نظر گرفتن تغییرات کم رس در بین نمونه‌های خاک (جدول ۵) (میانگین ۸/۲۷ درصد) و درصد بالای شن (میانگین ۶۶/۵۴ درصد) این توزیع کلاس‌های بافت خاک منطقی به نظر می‌رسد. مشابهت بافت خاک‌های مورد مطالعه از این جهت اهمیت دارد که اختلاف غلظت فلزات سنگین را نمی‌توان به اختلاف در بافت (میزان رس و قدرت نگهداری عناصر توسط آن‌ها) ارتباط داد. میانگین غلظت فلزات مطالعه شده در منطقه به صورت آهن < منگنز < روی < مس < کروم < سرب < نیکل < کادمیم است.

مقایسه میانگین غلظت فلزات سنگین مطالعه شده (جدول ۶) با مقادیر استاندارد (جدول ۱) نشان می‌دهد میانگین سه فلز روی

آماره‌های توصیفی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد مطالعه در جدول ۵ آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود حداکثر مقادیر pH و هدایت الکتریکی (EC) خاک در برخی نقاط آبیاری شده با فاضلاب به ترتیب به ۷/۷۰ و ۴/۳۵ و میانگین آن‌ها به ترتیب به ۶/۶۹ و ۱/۴۵ رسیده است. کربن آلی نمونه‌های خاک مورد مطالعه از حداقل ۰/۵۹ تا ۳/۵۰ درصد تغییر می‌کند که میانگین ۲/۱۴ درصد در منطقه اندازه‌گیری شده است. با توجه به این‌که اکثر نمونه‌های خاک از کاربری باغی تهیه شده است می‌توان مقدار نسبتا بالای کربن آلی را به نوع کاربری نسبت داد. میانگین نسبتا پایین pH در این نمونه‌ها نیز می‌تواند به مقادیر بالای کربن آلی خاک نسبت داده شود. شکل ۲ سهم کلاس‌های بافت نمونه‌های خاک مطالعه شده را نشان می‌دهد. در مجموع چهار کلاس بافت لوم شنی، شن لومی، لوم و شن در منطقه مشاهده شده است که کلاس لوم شنی با ۶۵ درصد بیش‌ترین

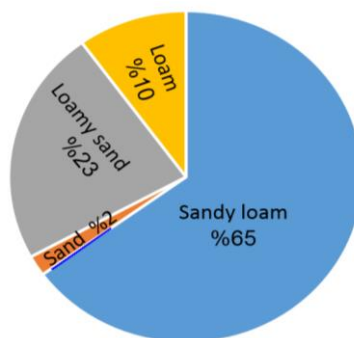
به‌دست آمده با نتایج (Shammi et al., 2021) که غلظت کادمیم را کم‌ترین مقدار ارزیابی کردند، هم‌سو نیست. توزیع مکانی غلظت‌های عناصر سنگین نحوه پراکنش غلظت هر یک از فلزات سنگین را با جزئیات بیش‌تری نشان می‌دهد (شکل ۳: Cu (الف)، Zn (ب)، Cd (پ)، Ni (ت)، Cr (ث)، Pb (ج)، Fe (چ) و Mn (ح)). مقادیر مطلق فلزات سنگین نمی‌تواند ملاک مناسبی برای بیان آلاینده‌ی در یک منطقه باشد. در اکثر مطالعات آلودگی فلزات سنگین از شاخص‌های کمی برای نمایش و تفسیر میزان آلاینده‌ی استفاده شده است (Shammi et al., 2021, 2023; Saberi et al., 2023; Abbasnejad et al., 2023). برای بررسی و کمی‌سازی آلاینده‌ی فلزات سنگین در این مطالعات از شاخص‌های مختلفی استفاده شده است. که در این مطالعه از چهار شاخص غنی‌شدگی (EF)، شاخص زمین‌انباشت (Igeo)، عامل آلودگی (CF) و بار آلودگی (PLI) برای کمی‌سازی آلودگی در منطقه مورد مطالعه استفاده شد.

(۸۵/۴۱ میلی‌گرم در کیلوگرم)، کادمیم (۲/۴۲ میلی‌گرم در کیلوگرم) و سرب (۱۷/۳۸) به‌ترتیب ۱/۲۲، ۱۲ و ۱/۳۹ برابر میانگین مرجع قاره‌ای آن‌ها به‌ترتیب برابر با ۰/۲، ۷۰ و ۱۲/۵۰ میلی‌گرم در کیلوگرم است. مقادیر قاره‌ای (جدول ۱) نشان‌دهنده غلظت‌های متوسط فلزات سنگین در سنگ‌های تشکیل‌دهنده پوسته سطح زمین بوده و افزایش غلظت یک فلز نسبت به این مقادیر به‌معنای تأثیر انسان و فعالیت‌های او بر تجمع فلز مورد نظر در خاک است (Zhang et al., 2018). آبیاری خاک‌های مورد مطالعه با فاضلاب باعث بالا رفتن غلظت سه عنصر روی، کادمیم و سرب شده است. این نتیجه با نتایج مطالعه Mirzashahi and Bazargan (2015) و Chen et al. (2023) و Kolawole et al. (2018) هم‌خوانی دارد. غلظت بقیه فلزات از میانگین مرجع پایین‌تر است. در مطالعه (Chen et al., 2023) فلز کادمیم بیش‌ترین افزایش را نسبت به مقادیر قاره‌ای داشته و مس و روی در رتبه بعدی قرار دارند. نتایج

جدول ۵- آماره‌های توصیفی ویژگی‌های نمونه‌های خاک مورد مطالعه

Table 5-Descriptive statistics of characteristics of studied soil samples

متغیر	حداقل	حداکثر	میانگین	انحراف استاندارد
pH	5.01	7.70	6.69	0.78
EC (دسی‌زیمنس بر متر)	0.52	4.35	1.45	0.668
OC (درصد)	0.59	3.50	2.14	0.78
Silt (درصد)	5.10	44.78	25.19	8.48
Sand (درصد)	39.08	94.05	66.54	11.48
Clay (درصد)	0.44	20.29	8.27	5.28



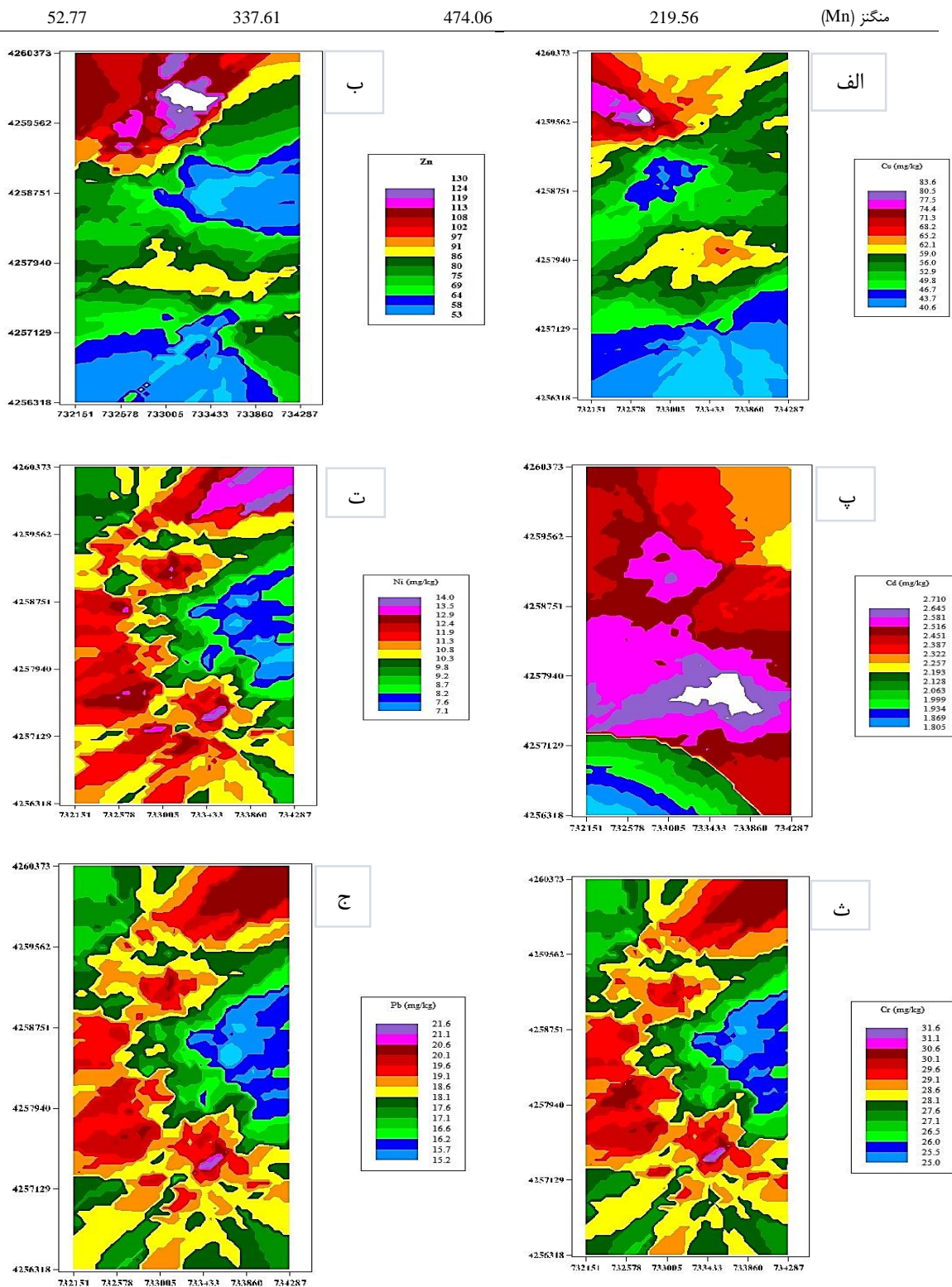
شکل ۲- توزیع کلاس‌های بافت در منطقه مورد مطالعه

Figure 2- Distribution of soil texture classes in the study area

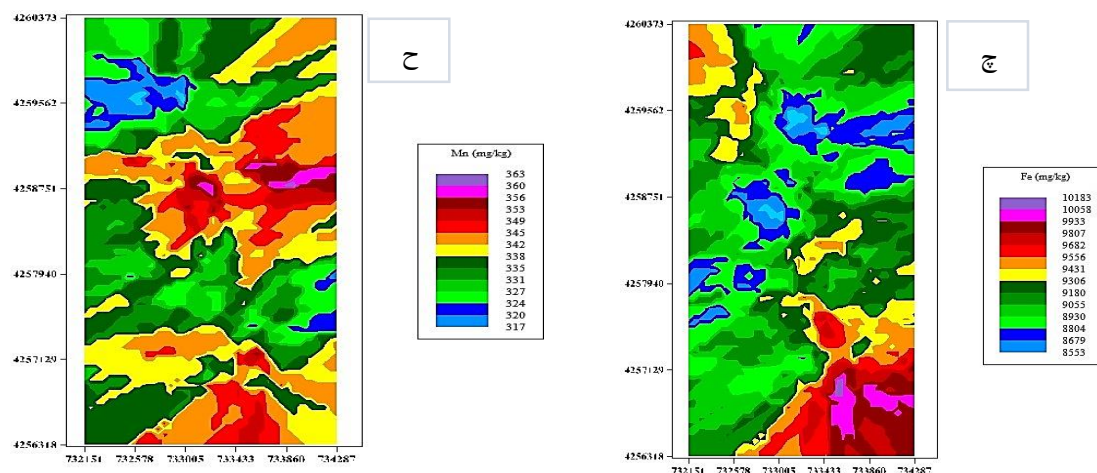
جدول ۶- آماره‌های توصیفی فلزات سنگین اندازه‌گیری‌شده در منطقه مورد مطالعه

Table 6- Descriptive statistics of heavy metals measured in the study area

متغیر	حداقل (میلی‌گرم بر کیلوگرم)	حداکثر (میلی‌گرم بر کیلوگرم)	میانگین (میلی‌گرم بر کیلوگرم)	انحراف استاندارد
مس (Cu)	14.42	144.96	53.32	22.95
روی (Zn)	1.66	1380.08	85.41	153.10
کادمیم (Cd)	0.25	3.09	2.42	0.34
نیکل (Ni)	0.94	38.82	9.58	7.16
کروم (Cr)	18.38	56.26	27.03	7.14
سرب (Pb)	8.74	46.62	17.38	7.15
آهن (Fe)	6269.14	12316.92	9182.97	1414.93



شکل ۳- توزیع زمین‌آماري غلظت فلزات سنگين در منطقه مورد مطالعه
 Figure 3- Geostatistical distribution of heavy metal concentration in the study area



ادامه شکل ۴- توزیع زمین‌آماري غلظت فلزات سنگین در منطقه مورد مطالعه

Continued Figure 3- Geostatistical distribution of heavy metal concentration in the study area

۴۲/۳ درصد در کلاس غنی‌شدگی متوسط قرار داشته و در مجموع ۹۹ درصد مساحت منطقه از نظر مس غنی شده‌اند (جدول ۸). روی در همه کلاس‌های غنی‌شدگی سهم دارد اما غنی‌شدگی چشم‌گیر با ۴۶/۴ درصد و غنی‌شدگی متوسط با ۴۲/۳ بیش‌ترین مساحت را دارد، در حالی‌که غنی‌شدگی خیلی بالا و حداقل، مساحت کمی را به خود اختصاص می‌دهند (به ترتیب ۳/۱ و ۸/۲ درصد). برخلاف آهن که هیچ‌گونه غنی‌شدگی ایجاد نکرده است (کل مساحت منطقه در کلاس تمیز قرار گرفته است)، فلز کادمیم تنها فلزی است که ۹۹ درصد مساحت مورد مطالعه دارای غنی‌شدگی خیلی بالا است. فلز نیکل مشابه آهن غنی‌شدگی کمی در منطقه ایجاد کرده است. به‌گونه‌ای که ۹۵/۹ درصد از مساحت منطقه فاقد غنی‌شدگی بوده و تنها ۴/۱ درصد باقی‌مانده منطقه دارای کلاس غنی‌شدگی متوسط است. روند مشابهی نیز در مورد کروم مشاهده می‌شود که سهم کلاس عدم غنی‌شدگی (تمیز) و غنی‌شدگی متوسط به ترتیب ۷۴/۲ و ۲۵/۸ درصد منطقه را شامل می‌شود. سرب ۸۸/۷ درصد منطقه را در کلاس غنی‌شدگی چشم‌گیر و منگنز ۶۳/۹ درصد منطقه را در کلاس غنی‌شدگی متوسط قرار داده است. شکل ۴ توزیع مکانی شاخص غنی‌شدگی (EF) توسط عناصر سنگین Cu (الف)، Zn (ب)، Cd (پ)، Ni (ت)، Cr (ث)، Pb (ج) و Mn (ح) را نشان می‌دهد. با توجه به این‌که آهن در محاسبه این عامل دخالت داده شده (رابطه ۱) و مقدار EF برای این عنصر یک است (نقشه توزیع عامل EF برای عنصر آهن تهیه نشده است). همان‌طور که اشاره شد غلظت فلزات به تنهایی نمی‌تواند ملاک خوبی برای ارزیابی آلاینده‌ی باشد. جدول ۶ نشان داد کادمیم کم‌ترین غلظت را در منطقه دارد، درحالی‌که استفاده از شاخص غنی‌شدگی، این فلز را به‌عنوان آلاینده‌ترین فلز در بین هشت فلز مطالعه‌شده معرفی کرد. دلیل این امر مقدار خیلی کم این

۳-۱- شاخص غنی‌شدگی (EF)

با بررسی شاخص غنی‌شدگی هشت فلز سنگین مورد مطالعه (جدول ۷) مشخص شد که کادمیم و سرب بیش‌ترین مقدار EF (به ترتیب برابر ۷۵/۸۵ و ۸/۶۸) را دارند و آلاینده‌ترین فلزات سنگین در منطقه هستند. این نتیجه با مطالعه Balali et al. (2023) هم‌خوانی دارد که این دو فلز را با مقادیر EF ۱۲/۲۴ و ۵/۹۴ غنی‌شده‌ترین فلزات معرفی کرده‌اند. تجمع کادمیم در خاک برای سلامتی انسان بسیار خطرناک است؛ زیرا می‌تواند از طریق سیستم خاک گیاه به بدن انسان منتقل (Liu et al., 2007) و باعث اختلال در عملکرد ریه، کلیه، سرطان و فشار خون بالا شود (Zerizghi et al. 2022). انباشتگی سرب در خاک باعث بیماری‌های دیابت، انسداد روده و پلمیسم (مسمومیت با سرب) می‌شود (Zukowska and Biziuk, 2008). روی و مس به ترتیب با EF برابر ۷/۴۲ و ۶/۱۴ در رتبه‌های بعدی آلاینده‌ی قرار دارند. ترتیب تغییر این شاخص در منطقه مورد مطالعه به‌صورت زیر است: $Ni > Fe > Cr > Mn > Cu > Zn > Pb > Cd$. این نتیجه با نتایج Shammi et al. (2021) که سرب را به‌عنوان غنی‌شده‌ترین عنصر معرفی کرده و EF کادمیم کم‌تر از روی، آهن، مس و نیکل است هم‌خوانی ندارد. به‌طور کلی EF بین ۰/۰۵ تا ۱/۵ نشان‌دهنده آزدسازی فلز از طریق فرآیندهای طبیعی و مقادیر بیش‌تر از آن حاکی از دخالت انسان در تجمع آن فلز در خاک است (Zhang et al., 2013). مقادیر مختلف EF سطوح آلودگی متفاوتی را به‌دنبال دارند (جدول ۲). بر این اساس EF بالاتر از پنج نشان‌دهنده آلودگی متوسط بوده و هرچه این مقدار از پنج تجاوز کند آلودگی نیز شدیدتر می‌شود. از نظر مس، ۵۶/۷ درصد از مساحت منطقه مورد مطالعه در کلاس غنی‌شدگی چشم‌گیر و

رودخانه در جنوب هند، فلزات کادمیم، آرسنیک، سرب، کبالت، روی، نیکل، کروم و منیزیم را اندازه‌گیری کردند. مقدار عامل غنی‌شدگی همه فلزات به‌جز کادمیم کم‌تر از حد آلودگی بود. آن‌ها نتیجه‌گیری کردند که غلظت فلزات در این رودخانه تحت تأثیر فعالیت انسان قرار نگرفته است. این تحقیق نیز رفتار کادمیم را تأیید می‌کند که در بیش‌تر مطالعه به‌عنوان فلز آلاینده ظاهر می‌شود.

فلز در پوسته زمین (مقادیر قاره‌ای) است که این مقدار در مورد کادمیم تنها ۰/۲ میلی‌گرم در کیلوگرم است. عامل EF تأثیر انسان و منابع انسانی بر محیط زیست را نشان می‌دهد (Da Silva et al., 2020). این عامل غلظت فلزات را نسبت به یک فلز مرجع نرمال‌سازی می‌کند که در اغلب مطالعات فلز آهن به‌عنوان فلز مرجع انتخاب شده است (Weissmannova and Pavlovsky, 2017). در مطالعه‌ای، Arisekar et al. (2022) با بررسی رسوبات

جدول ۷- آماره‌های توصیفی عامل غنی‌شدگی (EF)

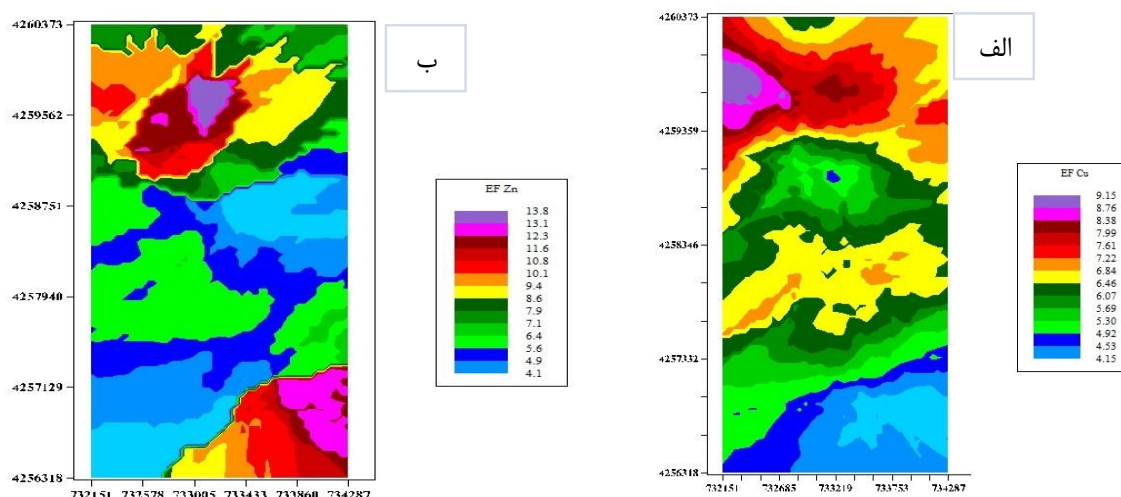
Table 7- Descriptive statistics of Enrichment Factor (EF)

متغیر	حداقل	حداکثر	میانگین	انحراف استاندارد
EF Cu	1.72	15.23	6.14	2.98
EF Zn	0.16	100.48	7.42	11.66
EF Cd	6.54	121.18	75.85	15.34
EF Ni	0.07	3.32	0.79	0.57
EF Cr	0.99	3.63	1.69	0.48
EF pb	4.01	24.01	8.68	3.56
EF Fe	1.00	1.00	1.00	0.00
EF Mn	1.35	3.80	2.23	0.51

جدول ۸- درصد نمونه‌های متعلق به کلاس‌های مختلف EF

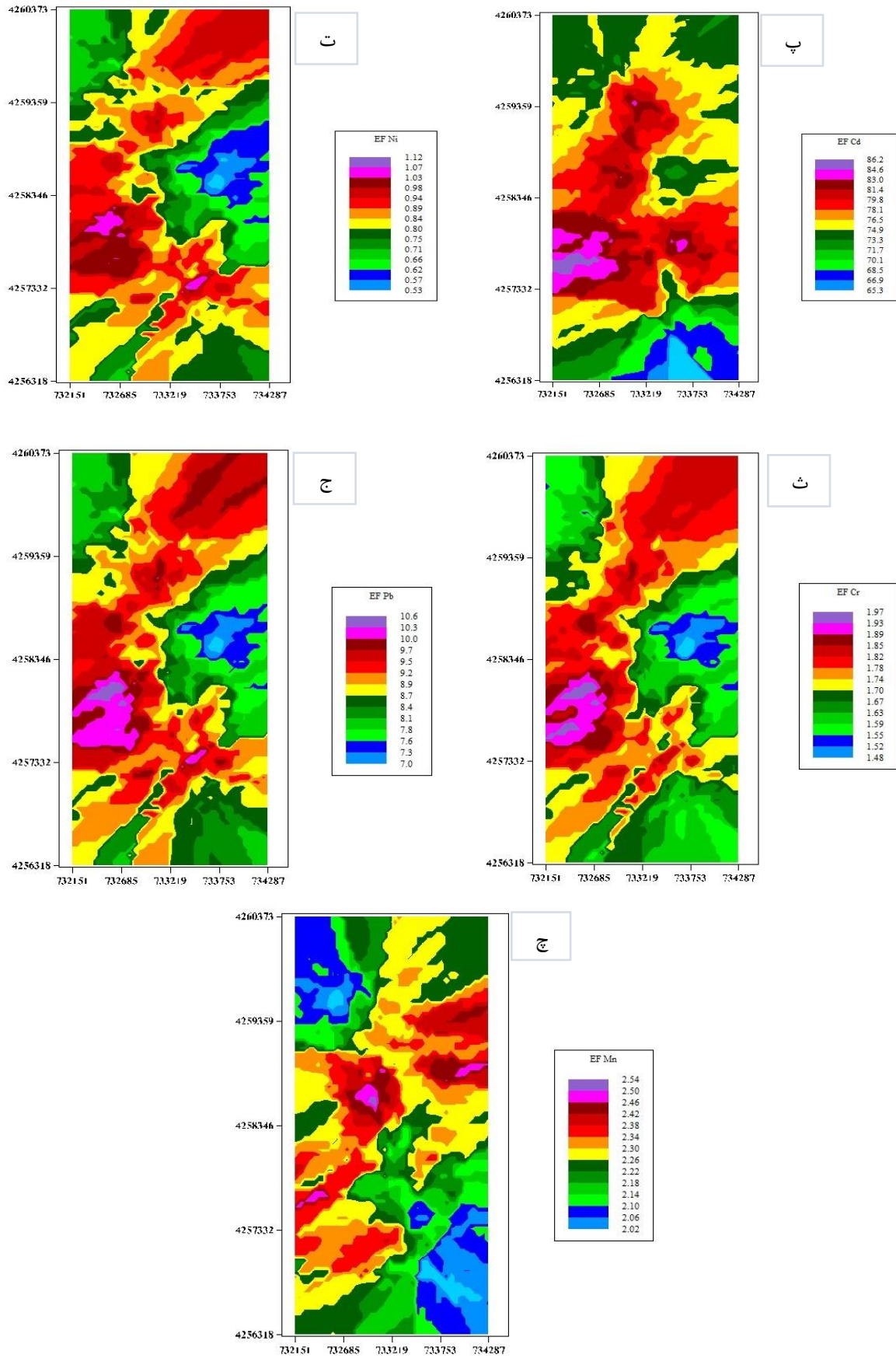
Table 8- Percentage of samples belonging to different EF classes

کلاس بندی EF	درجه آلودگی	EF Cu	EF Zn	EF Cd	EF Ni	EF Cr	EF pb	EF Fe	EF Mn
EF < 3	عدم غنی‌شدگی یا حداقل	1.0	8.2	95.9	74.2	100.0	36.1		
2 ≤ EF < 5	غنی‌شدگی متوسط	42.3	42.3	4.1	25.8	11.3	63.9		
5 ≤ EF < 40	غنی‌شدگی چشم‌گیر	56.7	46.4	1.0	88.7				
EF ≥ 40	غنی‌شدگی خیلی بالا	3.1	99.0						
جمع		100	100	100	100	100	100	100	100



شکل ۵- توزیع مکانی EF عناصر سنگین در منطقه مورد مطالعه

Figure 4- Geostatistical distribution of EF in the study area



ادامه شکل ۴- توزیع مکانی EF عناصر سنگین در منطقه مورد مطالعه
Continued Figure 4- Geostatistical distribution of EF in the study area

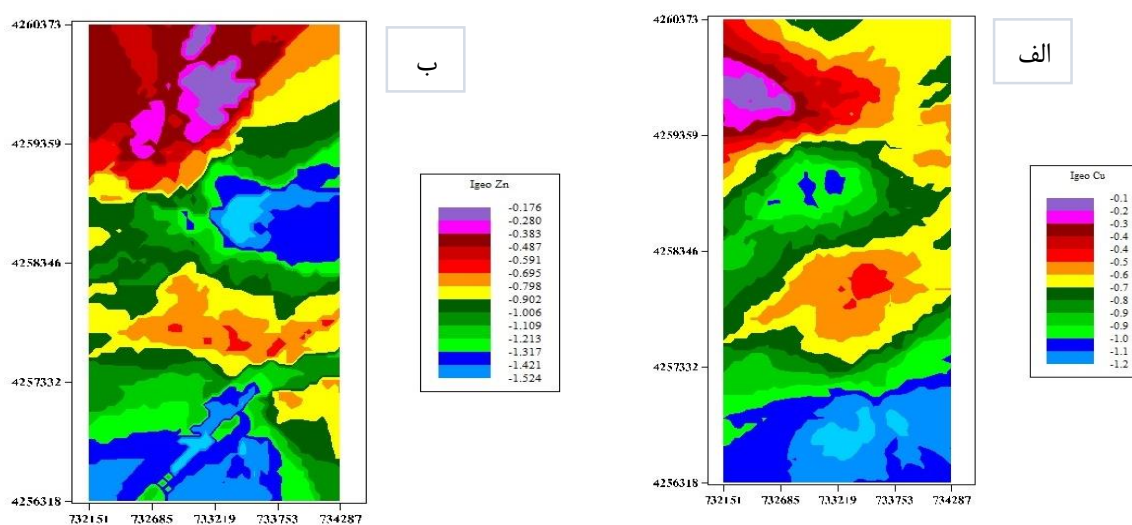
مورد مطالعه از نظر فلزات نیکل، کروم، آهن و منگنز و ۸۶/۶ درصد منطقه از نظر فلزات مس و روی در کلاس غیرآلوده قرار دارند. این نتیجه برخلاف نتایج مطالعه Balali et al. (2023) است که هیچ قسمتی از منطقه از نظر فلزات بررسی شده تمیز نبودند و آلودگی توسط همه فلزات مورد مطالعه ایجاد شده بود.

فلز کادمیم ۳۸/۱ درصد منطقه را در کلاس آلودگی متوسط و ۵۹/۸ درصد مساحت را در کلاس آلودگی شدید قرار داد که در مجموع حدود ۹۸ درصد منطقه از نظر این فلز دچار آلودگی بودند. این نتیجه با مطالعه Balali et al. (2023) همخوانی داشت که در آن ۵۵/۴۱ درصد نمونه‌های مطالعه شده در کلاس آلودگی شدید قرار داشتند. از نظر فلز سرب نیز ۶۹/۱ درصد منطقه تمیز تشخیص داده شد و تنها ۲۸/۹ درصد مساحت آلودگی متوسط داشت (جدول ۱۰). مطابق نتایج این شاخص قریب به اتفاق فلزات آلاینده را نشان ندادند. شکل ۶ توزیع مکانی شاخص I_{geo} برای عناصر سنگین Cu (الف)، Zn (ب)، Cd (پ)، Ni (ت)، Cr (ث)، Pb (ج) و Mn (ح) را در مورد مطالعه نشان می‌دهد.

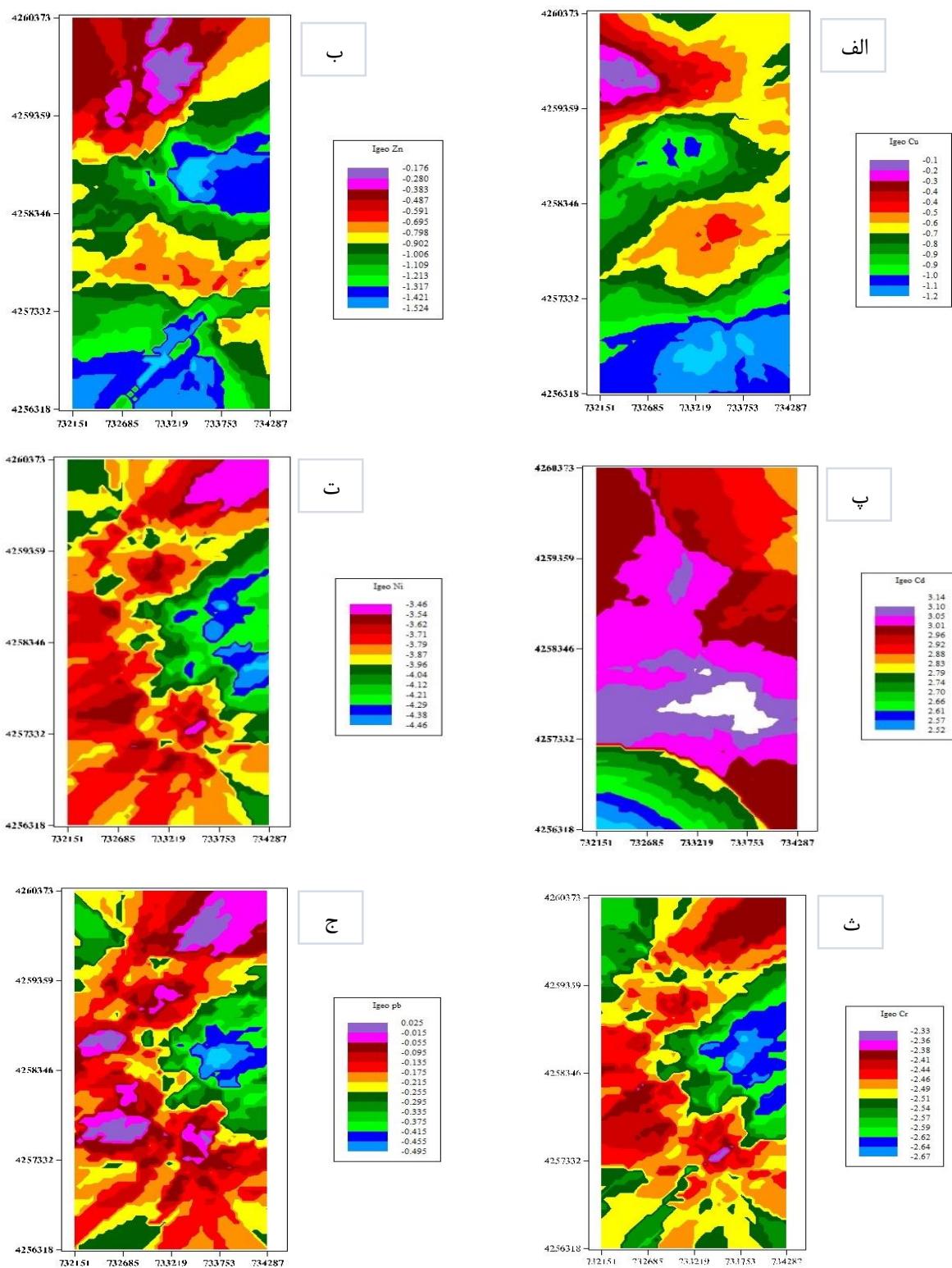
۳-۲- شاخص زمین‌انباشت (I_{geo})

متغیرهای آمار توصیفی شاخص زمین‌انباشت (I_{geo}) در جدول ۹ نشان داده شده است. مقادیر منفی این شاخص نشان‌دهنده عدم آلاینده‌گی فلز سنگین می‌باشد. کم‌ترین مقدار I_{geo} مربوط به نیکل (۶/۹۰-) و بیش‌ترین مقدار آن نیز مربوط به فلز روی (۳/۷۳) است. میانگین این شاخص در بین فلزات مطالعه شده به ترتیب زیر کاهش می‌یابد: $I_{geo}Cd < I_{geo}Cu < I_{geo}Pb < I_{geo}Mn < I_{geo}Ni < I_{geo}Fe < I_{geo}Cr$. این روند فلز کادمیم را به‌عنوان انباشته‌شده‌ترین فلز در منطقه نشان می‌دهد که با نتایج مطالعه Balali et al. (2023) و Chen et al. (2023) مطابقت دارد. در مطالعه آن‌ها نیز فلز کادمیم بیش‌ترین شاخص زمین‌انباشت را داشته است. کم‌ترین مقدار I_{geo} مربوط به نیکل است که این نتیجه برخلاف نتایج Sellami et al. (2022) بود که در مطالعه آن‌ها کروم کم‌ترین مقدار این شاخص (۳/۰۸-) را داشت.

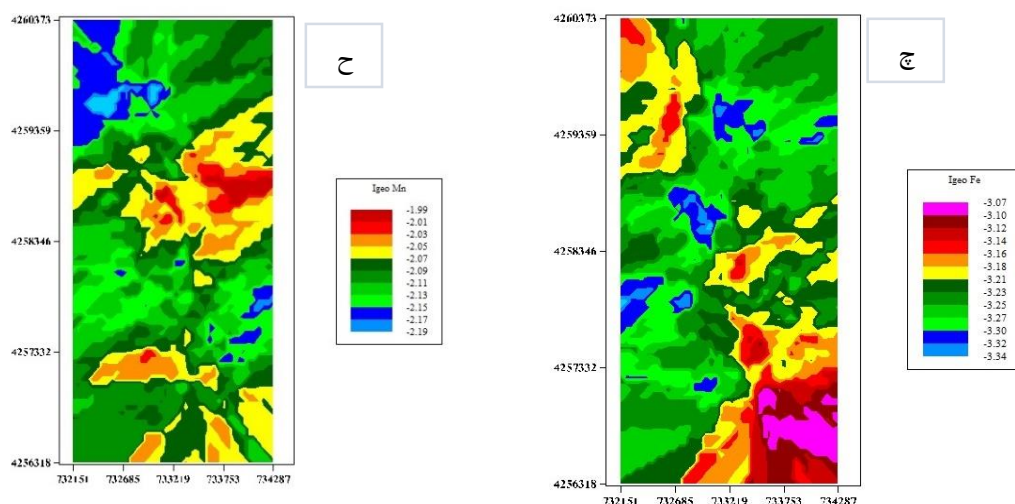
جدول ۱۰ درصد نمونه‌های متعلق به کلاس‌های مختلف آلودگی (تعریف شده بر اساس شاخص زمین‌انباشت) و یا به عبارتی مساحت متعلق به هرکلاس آلودگی (جدول ۲) را نشان می‌دهد. تنوع کلاس‌ها در همه فلزات یکسان نیست. تمام مساحت منطقه



شکل ۶- توزیع شاخص زمین‌انباشت (I_{geo}) در منطقه مورد مطالعه
Figure 5- Geostatistical distribution of I_{geo} in the study area



ادامه شکل ۵- توزیع شاخص زمین‌آبشست (Igeo) در منطقه مورد مطالعه
Continued Figure 5- Geostatistical distribution of Igeo in the study area



ادامه شکل ۵- توزیع شاخص زمین‌انباشت (I_{geo}) در منطقه مورد مطالعه
Continued Figure 5- Geostatistical distribution of I_{geo} in the study area

جدول ۹- آماره‌های توصیفی شاخص زمین‌انباشت (I_{geo})

Table 9- Descriptive statistics of the Geo-accumulation Index

متغیر	حداقل	حداکثر	میانگین	انحراف استاندارد
$I_{geo}Cu$	-2.52	0.81	-0.76	0.63
$I_{geo}Zn$	-5.98	3.72	-0.92	1.21
$I_{geo}Cd$	-0.27	3.36	2.98	0.37
$I_{geo}Ni$	-6.90	-1.54	-3.92	1.07
$I_{geo}Cr$	-3.03	-1.41	-2.51	0.33
$I_{geo}Pb$	-1.10	1.31	-0.21	0.51
$I_{geo}Fe$	-3.75	-2.78	-3.22	0.22
$I_{geo}Mn$	-2.70	-1.59	-2.10	0.23

جدول ۱۰- درصد نمونه‌های متعلق به کلاس‌های مختلف شاخص زمین‌انباشت (I_{geo})

Table 10- Percentage of samples belonging to different I_{geo} classes

$I_{geo}Mn$	$I_{geo}Fe$	$I_{geo}Pb$	$I_{geo}Cr$	$I_{geo}Ni$	$I_{geo}Cd$	$I_{geo}Zn$	$I_{geo}Cu$	میزان آلودگی	کلاس بندی I_{geo}
100	100	69.1	100	100	1	86.6	86.6	غیرآلوده	$I_{geo} < 0$
		28.9					13.4	غیرآلوده تا آلودگی متوسط	$0 \leq I_{geo} < 1$
		2.1			1	1		آلودگی متوسط	$1 \leq I_{geo} < 2$
					38.1	2.1		آلودگی متوسط تا شدید	$2 \leq I_{geo} < 3$
					59.8	1		آلودگی شدید	$3 \leq I_{geo} < 4$
								آلودگی شدید تا بینهایت شدید	$4 \leq I_{geo} < 5$
								بینهایت آلوده	$I_{geo} \geq 5$
100	100	100	100	100	100	100	100	جمع	

شده است. از بین فلزات سنگین مطالعه شده، کمترین CF به فلز نیکل (۰/۰۱) و بیشترین CF به فلز روی (۱۹/۷۲) تعلق دارد و در منطقه مطالعه شده، میانگین این شاخص از مقدار ۰/۱۳ برای فلز نیکل تا ۱۲/۰۹ برای فلز کادمیوم متغییر است. طبق جدول ۲ تمام نقاطی که CF یک فلز در آن‌ها کم‌تر از یک است آلودگی پایین دارند.

۳-۳- عامل آلودگی (CF) و بار آلودگی (PLI)
متغیرهای آماری دو عامل (CF) و بار آلودگی (PLI) در جدول ۱۱ آورده شده است. CF برای هر فلز جداگانه محاسبه می‌شود (شاخص انفرادی است)، اما در محاسبه PLI مجموع فلزات سنگین دخالت داده می‌شود (شاخص تجمعی است). به همین دلیل PLI در سه حالت بدون دخالت آهن و منگنز (PLI_1)، بدون دخالت منگنز (PLI_2) و با دخالت آهن و منگنز (PLI_3) محاسبه

جدول ۱۱- آماره‌های توصیفی شاخص‌های عامل آلودگی (CF) و بار آلودگی (PLI)

Table 11- Descriptive statistics of CF and PLI indices

انحراف استاندارد Std. Deviation	میانگین Mean	حداکثر Maximum	حداقل Minimum	پارامتر Parameter
0.42	0.97	2.64	0.26	CFCu
2.19	1.22	19.72	0.02	CFZn
1.69	12.09	15.43	1.25	CFCd
0.09	0.13	0.52	0.01	CFNi
0.07	0.27	0.56	0.18	CFCr
0.57	1.39	3.73	0.70	CFpb
0.02	0.16	0.22	0.11	CFFe
0.05	0.35	0.50	0.23	CFMn
0.23	0.88	1.60	0.46	PLI1
0.15	0.66	1.16	0.40	PLI2
0.12	0.61	1.01	0.39	PLI3

PLI1: بار آلودگی محاسبه شده بدون دخالت دادن آهن و منگنز، PLI2: بار آلودگی محاسبه شده بدون دخالت دادن منگنز و PLI3: بار آلودگی محاسبه شده با دخالت دادن آهن و منگنز

متوسط تنها توسط سه فلز سرب (۷۳/۲ درصد)، مس (۳۹/۲ درصد) و روی (۲۴/۷ درصد) مشاهده شد. این نتایج با مطالعه Afshari et al. (2015) مطابقت دارد که اغلب فلزات سنگین مورد مطالعه آن‌ها کلاس‌های آلودگی پایین و متوسط را به وجود آورده است. در مطالعه Cheng et al. (2023) مقدار CF فلزات سرب، کادمیم و مس نسبت به نیکل بالاتر بود که نتایج مطالعه حاضر را تأیید می‌کند.

از نظر CF به جز کادمیم که ۹۸ درصد منطقه را در کلاس آلودگی خیلی بالا قرار داده است سایر فلزات آلودگی پایین یا متوسط داشتند (جدول ۱۲). در این میان، کلاس‌های آلودگی پایین سهم به مراتب بیشتری نسبت به کلاس‌های دارای آلودگی متوسط دارند. ۱۰۰ درصد مساحت منطقه از نظر فلزات نیکل، کروم، آهن و منگنز، ۷۱/۱ درصد از نظر روی و ۶۰/۸ درصد از نظر مس کلاس آلودگی پایین داشتند. کلاس آلودگی

جدول ۱۲- درصد نمونه‌های متعلق به کلاس‌های مختلف عامل آلودگی (CF)

Table 12- Percentage of samples belonging to different CF classes

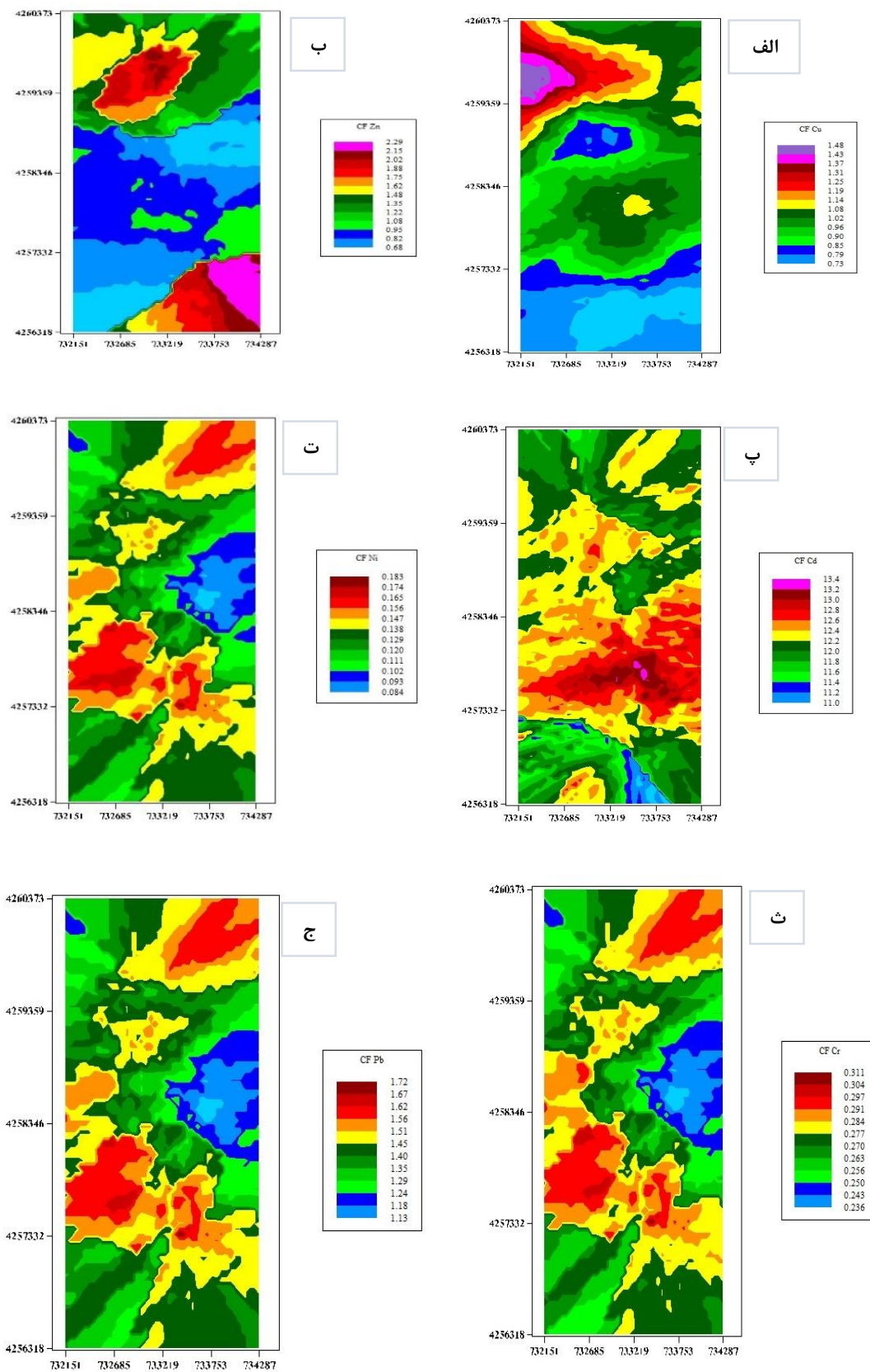
CF Mn	CF Fe	CF Pb	CF Cr	CF Ni	CF Cd	CF Zn	CF CU	درجه آلودگی	کلاس بندی CF
100	100	24.7	100	100		71.1	60.8	آلودگی پایین	CF < 1
		73.2			1	24.7	39.2	آلودگی متوسط	1 ≤ CF < 3
		2.1			1	1		آلودگی قابل توجه	3 ≤ CF < 6
					98	3.1		آلودگی خیلی بالا	CF ≥ 6
		100			100	100	100		جمع

مکان نسبت به مقادیر اولیه موجود در مواد مادری را بهتر نشان می‌دهد. در محاسبه اغلب این شاخص‌ها از مقادیر مرجع استفاده شده و مقادیر موجود با مقادیر مرجع مقایسه شده است. در این مطالعه علاوه بر غلظت فلزات سنگین، از شاخص EF، Igeo، CF و PLI استفاده شد. شاخص EF دخالت فعالیت‌های انسانی در تجمع فلزات سنگین را نسبت به مقادیر طبیعی نشان می‌دهد. مقادیر کمتر ۰/۰۵ تا ۱/۵ این شاخص گویای غلظت‌های ناشی از فرآیندهای طبیعی و افزایش آن به بیش از ۱/۵ مؤید دخالت فعالیت‌های انسانی اعم از فعالیت‌های صنعتی و کشاورزی است. در این مطالعه میانگین عامل EF همه فلزات به جز آهن و تا حدودی نیکل، بالاتر از ۱/۵ بود و این بدان معناست که همه این عناصر به‌عنوان آلاینده در محیط تجمع پیدا کرده‌اند.

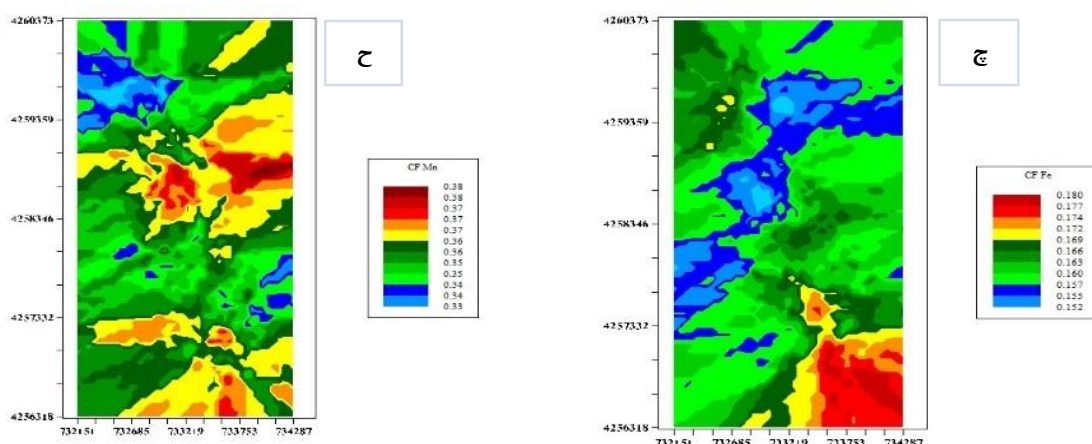
بر اساس جدول ۳ مقادیر PLI کمتر از یک نشان‌دهنده شرایط ایده‌آل و بدون آلودگی است. مقدار PLI محاسبه شده در منطقه مورد مطالعه کمتر از یک بود که نشان‌دهنده عدم وجود آلودگی برحسب این عامل است. این نتایج با نتایج مطالعه Balali et al. (2023) مطابقت ندارد. زیرا آن‌ها مقدار PLI را ۴/۷۸ تا ۱۴/۵۰ به دست آوردند که کلاس آلودگی بی‌نهایت شدید را نشان می‌دهد. شکل ۷ توزیع مکانی شاخص CF را برای عناصر سنگین Cu (الف)، Zn (ب)، Cd (پ)، Ni (ت)، Cr (ث)، Pb (ج) و Mn (ح) نشان می‌دهد.

۴- نتیجه‌گیری

آلودگی خاک توسط فعالیت‌های بشر امروزه تهدید بزرگی برای محیط‌زیست به حساب می‌آید. ارزیابی آلودگی با اندازه‌گیری غلظت فلزات آلاینده ممکن می‌شود. با این حال استفاده از شاخص‌های آلاینده و وضعیت تجمع عناصر آلاینده در یک



شکل ۷- توزیع مکانی شاخص CF در منطقه مورد مطالعه
Figure 6- Geostatistical distribution of CF in the study area



ادامه شکل ۶- توزیع مکانی شاخص CF در منطقه مورد مطالعه
Continued Figure 6- Geostatistical distribution of CF in the study area

یک نشان‌دهنده از بین رفتن کیفیت خاک در اثر آلودگی با فلزات سنگین است. در منطقه مورد مطالعه مقدار این شاخص زیر یک بوده و عدم وجود آلودگی در منطقه را نشان می‌دهد.

نکته‌ای که باید بدان توجه کرد این است که شاخص‌های انفرادی (EF، I_{geo} و CF) به‌ویژه EF کلاس‌های آلودگی شدیدتری را نسبت به شاخص تجمعی PLI به‌وجود می‌آورند. بنابراین، توجه به شاخص‌های تجمعی ممکن است ما را از وجود آلودگی غافل نگه‌دارد. به‌عبارت دیگر این امر ممکن است تصمیم‌گیران را در برخورد با نوع و منشأ آلودگی به اشتباه بیانازد و باعث برخوردهای جدی نشود. لذا، توصیه می‌شود با توجه به اثرات زیانبار هرکدام از فلزات شاخص‌های انفرادی جدی گرفته شود. نتایج این تحقیق به وضوح خطر تجمع کادمیم و آلودگی شدید ناشی از آن را در خاک‌های منطقه نشان می‌دهد. کادمیم از جمله فلزات خطرناک و تهدیدکننده سلامت انسان است. مس، روی و سرب نیز در محدوده خطر و آسیب‌رسانی قرار دارند. استان اردبیل از قطب‌های مهم کشاورزی به حساب می‌آید و اگر به وجود آلاینده‌ها توجه نشود، تبعات جبران‌ناپذیری به‌دنبال خواهد داشت. تصمیم‌گیران در امر مدیریت اراضی و آمایش سرزمین باید نتایج پژوهش انجام شده را به‌کار گرفته و از شدت یافتن آلودگی در منطقه مورد مطالعه جلوگیری نمایند.

در این میان فلز کادمیم، سرب، مس و روی بیش‌ترین انباشتگی را از خود نشان دادند (جدول ۸) که کادمیم از نظر شدت آلاینده‌ی (مقدار EF) و مساحت تحت تأثیر آلاینده‌ی (۹۹ درصد منطقه در کلاس غنی‌شدگی خیلی بالا) بیش‌ترین سهم را به خود اختصاص داده است. برخلاف شاخص EF که کلاس‌های آلودگی شدیدتری را به‌دست آورده است شاخص زمین‌انباشت (I_{geo}) کلاس‌های آلودگی پایین‌تری را نتیجه داده است. به‌طوری‌که طبق این شاخص اغلب فلزات بدون آلودگی و در موارد کمی آلودگی متوسط داشته‌اند به‌جز کادمیم که کلاس آلودگی شدید را نیز ایجاد کرده است (جدول ۱۰). این نشان می‌دهد که شاخص EF در مقایسه با شاخص I_{geo} حساسیت بیش‌تری در ارزیابی آلودگی دارد.

نتایج حاصل از به‌کارگیری عامل آلودگی CF (جدول ۱۲) مشابهت زیادی با عامل I_{geo} دارد و کلاس‌های ایجاد شده توسط دو شاخص تا حد زیادی شبیه هم هستند. هر دو عامل جزء عوامل انفرادی بوده و برای هر فلز در هر نقطه محاسبه می‌شوند و مشابهت نتایج آن‌ها به فرمول محاسباتی آن‌ها ارتباط دارد (رابطه‌های ۲ و ۳).

عامل بار آلودگی (PLI) از عوامل تجمعی است که اثر تجمعی فلزات آلاینده را نشان می‌دهد. به‌عبارتی این عامل به جای این که برای تک تک فلزات محاسبه شود برای کل فلزات در کل منطقه یک شاخص محاسبه می‌شود. مقادیر PLI بالاتر از

منابع

افشاری، علی، خادمی، حسین، و دلاور، محمدامیر (۱۳۹۴). ارزیابی آلودگی فلزات سنگین با استفاده از فاکتور آلودگی در خاک اراضی با کاربری‌های مختلف در بخش مرکزی استان زنجان. دانش آب و خاک، ۲۵ (۴/۲)، ۴۱-۵۲.

رحیم‌پور، فاطمه، و عباس‌پور، رحیم‌علی (۱۳۹۳). پهنه‌بندی آلودگی فلزات سنگین خاک با استفاده از روش‌های کریجینگ و توابع پایه شعاعی (مطالعه موردی: شهرستان هریس). اطلاعات جغرافیایی، ۲۳ (۹۱)، ۵۵-۶۷
doi:10.22131/sepehr.2014.12862

عباس‌نژاد، احمد، احمدی‌افزادی، حسام، و عباس‌نژاد، بهنام (۱۴۰۲). ارزیابی استعداد آلودگی آب‌های زیرزمینی دشت سیرجان با استفاده از شاخص دراستیک در محیط GIS. *مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک*، ۳(۱)، ۲۰۰-۲۱۴. doi:10.22098/MMWS.2022.11610.1146

میرزاشاهی، کامران، بازرگان، کامبیز، و بغوری، اسماعیل (۱۳۹۴). فاضلاب و کاربرد آن در کشاورزی. مؤسسه تحقیقات خاک و آب، نشریه فنی شماره ۵۳۴، ۱۸ صفحه.

روحانی شهرکی، فرزاد، مهدوی، رسول، و رضایی، مرضیه (۱۳۸۴). اثر آبیاری با پساب بر برخی خواص فیزیکی و شیمیایی خاک. *آب و فاضلاب*، ۵۳(۲۳-۲۹).

صابری، عارف، وهاب‌زاده کبری، قربان، حجتی، سیدمحمد، و موسوی، سیدرمضان (۱۴۰۲). تأثیر معدن‌کاری زغال‌سنگ بر انباشت سرب و روی و پراکنش مکانی آن‌ها در خاک سطحی منطقه کارمزد. *مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک*، ۳(۳)، ۵۶-۷۱. doi:10.22098/MMWS.2022.11211.1106

References

- Abbasnejad, A., Ahmadi Afzadi, H., & Abbasnejad, B. (2023). Pollution vulnerability assessment of groundwater in Sirjan Plain using DRASTIC and GIS. *Water and Soil Management and Modeling*, 3 (1), 200-2014. doi:10.22098/MMWS.2022.11610.1146 [In Persian]
- Adelopo, A.O., Haris, P.I., Alo, B.I., Huddersman, K., & Jenkins, R.O. (2018). Multivariate analysis of the effects of age, particle size and landfill depth on heavy metals pollution content of closed and active landfill precursors. *Waste Management*, 78, 227-237. doi:10.1016/j.wasman.2018.05.040
- Afshari, A., Khademi, H., & Delavar, M.A. (2015). Heavy metals contamination assessment in soils of different land uses in central district of Zanjan Province using contamination factor. *Water and Soil Science*, 24(4/2), 41-52. [In Persian]
- Arisekar, U., Shakila, R.J., Shalini, R., Jeyasekaran, G., Keerthana, M., Arumugam, N., Almansour, A.I., & Perumal, K. (2022). Distribution and ecological risk assessment of heavy metals using geochemical normalization factors in the aquatic sediments. *Chemosphere*, 294, 133708. doi:10.1016/j.chemosphere.2022.133708
- Balali, A.H., Gholami, S., Javanmardi, M.R., & Valipour, A. (2023). Assessment of heavy metal pollution in the soil of a construction and demolition waste landfill. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, 20.100856. doi:10.1016/j.enmm.2023.100856
- Baltas, H., Sirin, M., Gökbayrak, E., & 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, 1-41. doi:10.1016/j.chemosphere.2019.125015
- Chen, Z.F., Zhao, Y., Zhu, Y., Yang, X., Qiao, J., Tian, Q., & Zhang, Q. (2009). Health risks of heavy metals in sewage-irrigated soils and edible seeds in Langfang of Hebei province, China. *Journal of Science Food Agriculture*, 90, 314-320. doi:10.1002/jfsa.3817
- Chen, M., & Ma, L.Q. (2001). Comparison of three aqua regia digestion methods for twenty florida soils. *Soil Science Society of America Journal*, 87(2), 491-499. doi:10.2136/sssaj2001.652491x
- Chen, Z., Zhao, Y., Chen, D., Huang, H., Zhao, Y., & Wu, Y. (2023). Ecological risk assessment and early warning of heavy metal cumulation in the soils near the Luanchuan molybdenum polymetallic mine concentration area, Henan Province, central China. *China Geology*, 6, 15-26. doi:10.31035/cg2023003
- Cheng, B., Wang, Z., Yan, X., Yu, Y., Liu, L., Yi, G., Zhang, H., & Yang, X. (2023). Characteristics and pollution risks of Cu, Ni, Cd, Pb, Hg and As in farmland soil near coal mines. *Soil and Environmental Health*, 1, 1-9. doi:10.1016/j.seh.2023.100035
- Da Silva, J.B., Abreu, I.M., De Oliveira, D.A.F., Hadlich, G.M., & Barbosa, A. (2020). Combining geochemical and chemometric tools to assess the environmental impact of potentially toxic elements in surface sediment samples from an urban river. *Marine Pollution Bulletin*, 155, 111146. doi:10.1016/j.marpolbul.2020.111146
- Gee, W.G., & Bauder, J.W. (1986). Particle-size analysis. In: *Methods of Soil Analysis*, Part I, ASA, SSSA, Madison, USA.
- Huajun, H., Xingzhong, Y., Guangming, Z., Huina, Z., Hui, L., & Zhifeng, L. (2011). Quantitative evaluation of heavy metals' pollution hazards in liquefaction residues of sewage sludge. *Bioresource Technology*, 102(22), 10346-10351. doi:10.1016/j.biortech.2011.08.117
- Jackson, M.L. (1962). *Soil Chemical Analysis*. Constable and Co. Ltd., London.
- Jones, J.B. (2001). *Laboratory guide for conducting soil tests and plant analysis*. Boca Raton, London, New York and Washington, D.C. CRC Press, 384 pages.
- Keshavarzi, A., & 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, 544-560. doi:10.1080/09603123.2018.1555638
- Kolawole, T.O., Olatunji, A.S., Jimoh, M.T., & Fajemila, O.T. (2018). Heavy metal contamination and ecological risk assessment in soils and sediments of an industrial area in

- Southwestern Nigeria. *Journal of Health Pollution*, 8(19), 180906. doi:10.5696/2156-9614-8.19.180906
- Kowalska, J.B., Mazurek, R., Gąsiorek, M., & Zaleski, T. (2018). Pollution indices as useful tools for the comprehensive evaluation of the degree of soil contamination—A review. *Environ Geochem Health*, 40, 2395–2420. doi:10.1007/s10653-018-0106-z
- Kusin, F.M., Azani, N.N.M., Hasan, S.N.M.S., & Sulong, N.A. (2018). Distribution of heavy metals and metalloid in surface sediments of heavily-mined area for bauxite ore in Pengerang, Malaysia and associated risk assessment. *Catena*, 165, 454-464. doi:10.1016/j.catena.2018.02.029
- Larcheveque, M., Ballini, C., Korboulewsky, N., & Montès, N. (2006). The use of compost in afforestation of mediterranean areas: Effects on soil properties and young tree seedlings. *Science of the Total Environment*, 369, 220-230. doi:10.1016/j.scitotenv.2006.04.017
- Liu, W.X., Shen, L.F., Liu, J.W., Wang, Y.W., & Li, S.R. (2007). Uptake of toxic heavy metals by rice (*Oryza sativa* L.) cultivated in the agricultural soil near Zhengzhou City, People's Republic of China. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 79 (2), 209–213. doi:10.1007/s00128-007-9164-0
- Long, Z., Zhu, H., Bing, H., Tian, X., Wang, Z., Wang, X., & Wu, Y. (2021). Contamination, sources and health risk of heavy metals in soil and dust from different functional areas in an industrial city of Panzhihua City, Southwest China. *Journal of Hazardous Materials*, 420, 126638. doi:10.1016/j.jhazmat.2021.126638
- Magdaleno, F.O., Villa, R.M., Saenz, E.M., Bolanos, D.C.O., & Olivas, A.L.B. (2011). Heavy metals in agricultural soils and irrigation wastewater of Mixquiahuala, Hidalgo, Mexico. *African Journal of Agricultural Research*, 6(24), 5505-5511. doi:10.5897/ajar11.414
- Mirzashahi, K.K., & Bazargan, A.B. (2015). Sewage and its uses in agriculture. *Soil and Water reaserches Institute*, boullten 534. [In Persian]
- Mojiri, A. (2011). Effects of municipal wastewater on physical and chemical properties of saline soil. *Journal of Biological and Environmental Sciences*, 5(14), 71-76.
- Munir, J., Rusan, M., Hinnawi, S., & Rousan, L. (2007). Long-term effect of wastewater irrigation of forage crops on soil and plant quality parameters. *Soil Science Society of American Journal*, 215, 143-152. doi:10.1016/j.desal.2006.10.032
- Nelson, D.W., & Sommers, L.E. (1996). Total carbon, organic carbon, and organic matter. Pp.153-188, In: Sparks, DL. (ed.), *Methods of Soil Analysis, Part 3: Chemical Methods*, SSSA Book Series Number 5, Soil Science Society of America, Madison, WI.
- Rachwał, M., Kardel, K., Magiera, T., & Bens, O. (2017). Application of magnetic susceptibility in assessment of heavy metal contamination of Saxonian soil (Germany) caused by industrial dust deposition. *Geoderma*, 295, 10-21. doi:10.1016/j.geoderma.2017.02.007
- Rahimpour, F., & Abaspour, R.A. (2014). Mapping concentrations of heavy metals in soils using Kriging and RBF Case study: Harris Township. *Journal Management System* 23, 55-67. doi:10.22131/sepehr.2014.12862 [In Persian]
- Rohani Shahraki, F., Mahdavi, R., & Rezayi, M. (2005). Effect of irrigation treatments on some soil physical and hemical properties. *Journal of Water and Wastewater*, 53, 23-29. [In Persian]
- Saberi, A., Vahabzadeh Kebria, Gh., Hojjati, S.M., & Mosavi, S.R. (2023). The effect of coal mining on the accumulation of Pb and Zn and their spatial distribution in the surface soil of Komarzd. *Water and Soil Management and Modeling*, 3(3), 57-71. doi:10.22098/MMWS.2022.11211.1106 [In Persian]
- 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), 1–17. doi:10.1007/s10661-022-09781-4
- Shammi, S.A., Salam, A., & Khan, M.A.H. (2021). Assessment of heavy metal pollution in the agricultural soils, plants, and in the atmospheric particulate matter of a suburban industrial region in Dhaka. *Environmental Monitoring and Assessment*, 193(2). doi:10.1007/s10661-021-08848-y
- Sharma, R.K., Agrawal, M., & Marshall, F. (2007). Heavy metal contamination of soil and vegetables in suburban areas of Varanasi, India. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 66, 258-266. doi:10.1016/j.ecoenv.2005.11.007
- Singh, R.P., & Agrawal, M. (2008). Potential benefits and risks of landapplication of sewage sludge. *Waste Management*, 28(2), 347-358. doi:10.1016/j.wasman.2006.12.010
- Taylor, S.R. (1964). Abundance of chemical elements in the continental crust: a new table. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 28(8), 1273–1285. doi:10.1016/0016-7037(64)90129-2
- Weissmannova, H.D., & Pavlovsky, J. (2017). Indices of soil contamination by heavy metals – methodology of calculation for pollution assessment (minireview). *Environmental Monitoring and Assessment*, 189(12), 616. doi: 10.1007/s10661-017-6340-5

- Zerizghi, T., Guo, Q., Tian, L., Wei, R., & Zhao, C. (2022). An integrated approach to quantify ecological and human health risks of soil heavy metal contamination around coal mining area. *Science of the Total Environment*, 814, 152653. doi:10.1016/j.scitotenv.2021.152653
- Zhang, H., Luo, Y., Makino, T., Wu, L., & Nanzyo, M. (2013). The heavy metal partition in size-fractions of the fine particles in agricultural soils contaminated by waste water and smelter dust. *Journal of Hazardous Materials*, 248–249, 303–312. doi:10.1016/j.jhazmat.2013.01.019
- Zhang, Y., Zhang, H., Zhang, Z., Liu, C., Sun, C., Zhang, W., & Marhaba, T. (2018). pH Effect on Heavy Metal Release from a Polluted Sediment. *Journal of Chemistry*, 1–7. doi:10.1155/2018/7597640
- Zukowska, J., & Biziuk, M. (2008). Methodological evaluation of method for dietary heavy metal intake. *Journal of Food Science*, 73(2), 21-29. doi:10.1111/j.1750-3841.2007.00648.x