

An improved weighted index and comparing it with aggregate indices in the assessment of heavy metal pollution

Zahra Sheikhi Alman Abad¹, Hossein Pirkharrati^{*2}

1. Ph.D. Graduate of Environmental Geology, Dept. of Geology, University of Urmia, Urmia, Iran. E-mail: z.sheikhi@urmia.ac.ir

2. Corresponding Author, Associate Prof., Dept. of Geology, University of Urmia, Urmia, Iran. E-mail: h.pirkharrati@urmia.ac.ir

Article Info

Article type:

Full Length Research Paper

Article history:

Received: 08.23.2022

Revised: 02.16.2023

Accepted: 02.19.2023

Keywords:

Anthropogenic,
Ecological Risk,
Improved Weight Index,
Mathematical Model,
Nemerow Index

ABSTRACT

Background and Objectives: Due to the importance of soil quality in life and the environment, various evaluation methods have been proposed to describe the effect of pollutants such as heavy metals on soil quality. In this study, we evaluated the quality of the soil around the Zanjan lead and zinc complex located in Zanjan city by using the mathematical model of the improved weighted index and compared it with the results of Nemerow index and pollution load index.

Materials and Methods: In this study, the results of 71 soil sampling stations around Zanjan lead and zinc complex, located in the northwest of Iran, by inductively coupled plasma emission spectrometry device for reading the concentration of heavy metals Lead, Zinc, Arsenic, Cadmium, Thallium, Barium, Antimony, Vanadium, Cobalt, Molybdenum, Nickel and Copper were used. Soil acidity was also analyzed. This approach assigned weights to different heavy metals using statistical tools, including hierarchical cluster analysis and principal component analysis, while calculating the improved weighted index. The result of the index quantitatively determines the amount of pollution.

Results: Based on the improved weight index, 19.9% of the samples were in moderate pollution, 4.2% were in severe pollution, and the others were without or with little pollution. According to the pollution load index, 5.8% of the samples are in moderate pollution, and 2.8% are in severe pollution. According to the pollution index, 19.9% of the samples are in moderate pollution, and 42.2% are in severe pollution. Comparing the results obtained from the model with the weighted improved index with the pollution load index, the correlation value is 0.907, and with the Nemerow index, the correlation value is 0.701, which indicates that it is closer to the pollution load index. The results of the improved weight index showed that the heavy metals Zinc, Lead, Cadmium, and Arsenic are of anthropogenic origin and as a result of the industrial activities of the Zanjan lead and zinc complex. While heavy metals Barium, Vanadium, Thallium, Molybdenum, Cobalt, Copper, Nickel, and Antimony are of earth origin.

Conclusion: The results showed that the improved weighted index has a good match with the previous indices and can be used in broad ranges. It also overcomes the shortcomings of the early indicators and can be used as a new model to evaluate soil pollution and soil ecological risk. This index can be used to identify and determine possible sources of pollution.

Cite this article: Sheikhi Alman Abad, Zahra, Pirkharrati, Hossein. 2023. An improved weighted index and comparing it with aggregate indices in the assessment of heavy metal pollution. *Journal of Soil Management and Sustainable Production*, 13 (1), 27-52.



© The Author(s).

DOI: 10.22069/EJSMS.2023.20535.2070

Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

به کارگیری شاخص بهبود یافته وزنی و مقایسه آن با شاخص های تجمیعی در ارزیابی آلاینده‌گی فلزات سنگین

زهرا شیخی آلمان‌آباد^۱، حسین پیرخراتی^{۲*}

۱. دانش‌آموخته دکتری زمین‌شناسی زیست‌محیطی، گروه زمین‌شناسی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران. رایانامه: z.sheikhi@urmia.ac.ir

۲. نویسنده مسئول، دانشیار گروه زمین‌شناسی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران. رایانامه: h.pirkharrati@urmia.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله کامل علمی- پژوهشی	سابقه و هدف: به جهت اهمیت کیفیت خاک در بستر حیات و محیط‌زیست، روش‌های ارزیابی مختلفی برای توصیف تأثیر آلاینده‌هایی از جمله فلزات سنگین در آن پیشنهاد شده‌اند. در این مطالعه با استفاده از مدل ریاضی، شاخص بهبود یافته وزنی به‌عنوان رویکردی نو، کیفیت خاک اطراف مجتمع سرب و روی زنجان واقع در شهرستان زنجان را مورد ارزیابی قرار گرفته و با نتایج حاصل از شاخص‌های آلودگی نمر و شاخص بار آلودگی مقایسه شده است.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۶/۰۱	مواد و روش‌ها: در این مطالعه، از ۷۱ نقطه خاک اطراف مجتمع سرب و روی زنجان، در شمال‌غربی ایران، به صورت نمونه‌برداری منظم برداشت شد. غلظت کل فلزات سنگین نمونه‌های خاک پس از هضم اسیدی توسط دستگاه اسپکترومتری نشری پلاسما جفت شده القایی قرائت شدند. هم‌چنین مقدار pH خاک نیز اندازه‌گیری شد. در این رویکرد، در طی محاسبه شاخص بهبود یافته وزنی، وزن‌ها با استفاده از ابزارهای آماری، از جمله تجزیه و تحلیل خوشه‌ای سلسله‌مراتبی و تحلیل مؤلفه‌های اصلی، به فلزات سنگین مختلف اختصاص داده شد. نتیجه حاصل از شاخص به‌صورت کمی، مقدار آلاینده‌گی را مشخص می‌سازد.
تاریخ ویرایش: ۱۴۰۱/۱۱/۲۷	یافته‌ها: براساس شاخص بهبود یافته وزنی، ۱۹/۹ درصد نمونه‌ها در آلودگی متوسط، ۴/۲ درصد نمونه‌ها در آلودگی شدید و سایر نمونه‌ها فاقد آلودگی و یا بار آلودگی اندک بودند. برحسب شاخص بار آلودگی، ۵/۸ درصد نمونه‌ها در کلاس آلودگی متوسط و ۲/۸ درصد در کلاس آلودگی شدید و بر مبنای شاخص آلودگی نمر، ۱۹/۹ درصد نمونه‌ها در کلاس آلودگی متوسط و ۴۲/۲ درصد در کلاس آلودگی شدید قرار داشتند. مقایسه همبستگی نتایج حاصل از مدل شاخص بهبود یافته وزنی با شاخص بار آلودگی، نشانگر مقدار همبستگی ۰/۹۰۷ و با شاخص نمر، نشان‌دهنده مقدار همبستگی ۰/۷۰۱ می‌باشد که این موضوع بیانگر نزدیکی بیش‌تر مدل
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۱/۳۰	
واژه‌های کلیدی: انسان‌زاد، خطر اکولوژیکی، شاخص بهبود یافته وزنی، شاخص نمر، مدل ریاضی	

مذبور با شاخص بار آلودگی بود. نتایج شاخص بهبودیافته وزنی نشان داد که فلزات سنگین روی، سرب، کادمیوم و آرسنیک دارای منشأ انسان‌زاد می‌باشند و در نتیجه نشانگر فعالیت‌های صنعتی مجتمع سرب و روی زنجان هستند. در مقابل فلزات سنگین باریم، وانادیوم، تالیوم، مولیبدن، کبالت، مس، نیکل و آنتیموان دارای منشأ زمین‌زاد می‌باشند.

نتیجه‌گیری: نتایج نشان داد که شاخص بهبود یافته وزنی با شاخص‌های قبلی تطابق خوبی داشته و می‌توان در محدوده‌های وسیع به‌کار برده شود. همچنین کاستی‌های شاخص‌های بار آلودگی و شاخص آلودگی نمره را برطرف نموده و به‌عنوان یک مدل جدید می‌تواند برای ارزیابی آلودگی و خطر اکولوژیکی خاک مورد استفاده قرار گیرد. به‌علاوه از این شاخص می‌توان برای شناسایی و تعیین منابع محتمل آلودگی استفاده نمود.

استناد: شیخی آلمان‌آباد، زهرا، پیرخراطی، حسین (۱۴۰۲). به‌کارگیری شاخص بهبودیافته وزنی و مقایسه آن با شاخص‌های تجمیعی در ارزیابی آلاینده‌های فلزات سنگین. نشریه مدیریت خاک و تولید پایدار، ۱۳ (۱)، ۲۷-۵۲.

DOI: 10.22069/EJSMS.2023.20535.2070



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

مقدمه

بستر اصلی تجمع فلزات سنگین در نتیجه فعالیت‌های انسان‌زاد خاک است (۱). فعالیت‌های صنعتی، به‌خصوص ذوب فلزات غیر آهنی، یکی از منابع مهم ورود فلزات سنگین در خاک هستند (۲). فلزات سنگین علاوه بر این که موجب اثرات منفی بر اکولوژی محیط‌زیست می‌شوند (۳ و ۴)، تأثیرات خطرناکی نیز بر سلامتی انسان و سایر جانداران دارند (۵)؛ چراکه مانند آلاینده‌های آلی تجزیه نمی‌شوند (۶) و در خاک تجمع می‌یابند (۷، ۸ و ۹). بنابراین موجب کاهش کیفیت خاک شده و در نتیجه فرسایش به سایر بخش‌های محیط‌زیست منتقل می‌شوند (۹). شناسایی غلظت آن‌ها در محیط خاک و ارزیابی دامنه آلودگی آن‌ها، از چالش‌های اساسی متخصصان علوم محیطی است. رویکردهای محاسباتی مختلفی برای ارزیابی کیفیت محیط‌زیست همچون شاخص‌ها و بررسی‌های آماری، منشأیابی و منطق فازی تاکنون توسط پژوهش‌گران به‌کار گرفته شده است (۱۰، ۱۱، ۱۲ و ۱۳). آنالیزهای آماری چندمتغیره، اطلاعات معنی‌داری از منبع آلودگی و سهم نسبی منابع مختلف در ایجاد آلودگی فلزات سنگین در محیط‌زیست بیان می‌نماید. روش‌های آماری چندمتغیره، تأثیرات عوامل زمین‌زاد و انسان‌زاد را که فاکتورهای کنترل‌کننده تغییرات هستند، شناسایی می‌کند (۱۴). در این بین، روش‌های آماری تجزیه مؤلفه‌های اصلی^۱ و آنالیز تحلیل خوشه‌ای^۲ در پژوهش‌های بسیاری مورد استفاده قرار گرفته شده است (۱۰، ۱۱، ۱۲ و ۱۳).

در روش آماری تجزیه به مؤلفه‌های اصلی، بین مجموعه‌ای متشکل از متغیرهای گوناگون که در ظاهر بی‌ارتباط هستند، رابطه خاصی در مدل فرضی برقرار می‌کند (۱۵). هدف از به‌کارگیری تجزیه مؤلفه‌های اصلی تشخیص مهم‌ترین متغیرهای کنترل‌کننده

تغییرات ویژگی موردنظر از متغیرهایی با نقش کم‌تر است. در این صورت می‌توان با حداقل تعداد متغیرهای فاکتوری، حداکثر تغییرپذیری بین داده‌ها را توجیه و سهم نسبی هر یک از متغیرهای فاکتوری را در توجیه تغییرپذیری مشخص نمود (۱۶). به‌عنوان مثال، پژوهش‌گران با بهره‌گیری از تجزیه مؤلفه‌های اصلی، منشأ فلزات سنگین موجود در آب‌های زیرزمینی امتداد ساحل دریای سرخ را، پراکندگی هالیت و ژپس در رسوبات سابخا^۳، کربنات‌ها و فعالیت‌های کشاورزی مشخص نمودند (۱۷). در مطالعه دیگری با استفاده از تجزیه مؤلفه‌های اصلی، منشأ فلزات سنگین در آب، خاک و رسوبات منطقه معدن سرب شمال غرب مراکش به باطله‌های موجود در منطقه در نتیجه فعالیت‌های معدنی نسبت داده شد (۱۸).

آنالیز تحلیل خوشه‌ای، برای گروه‌بندی نمونه‌هایی که دارای ویژگی‌های مشترک و شبیه به هم هستند و ارزیابی اطلاعات حاصل از تجزیه مؤلفه‌های اصلی به‌کار می‌رود. فاصله خوشه‌ها نشان‌دهنده درجه شباهت توزیع و واریانس میان فلزات سنگین است. هرچه این میزان کاهش یابد، مقدار ارتباط معنی‌داری خوشه‌ها افزایش می‌یابد (۱۹). نتایج پژوهش انجام‌شده روی آلودگی خاک در نتیجه معادن فلزی موجود در شمال ویتنام با کمک آنالیز تحلیل خوشه‌ای نشان داد که سرب، آرسنیک و روی ناشی از فعالیت‌های معدنکاری در خاک غنی شده‌اند (۲۰). مطالعه انجام گرفته برای ارزیابی آلودگی فلزات سنگین در خاک معدن زغال‌سنگ و فرآوری آن در جمهوری چک توسط آنالیز تحلیل خوشه‌ای سه منشأ مختلف را برای فلزات سنگین معرفی نمود (۲۱).

فلزات سنگین دارای اثرات هم‌افزایی هستند، به همین دلیل شاخص‌های تلفیقی به‌کار گرفته می‌شوند (۲۲). شاخص بار آلودگی^۴ و شاخص نمره^۵ که برای

3- Sabkha sediments

4- Pollution Load Index, PLI

5- Nemerow Index, NI

1- Principal Component Analysis, PCA

2- Hierarchical cluster analysis, HCA

زنجان واقع در شهرستان زنجان و به‌کارگیری شاخص وزنی بهبودیافته، براساس روش‌های آماری چندمتغیره و بررسی منبع فلزات سنگین در خاک منطقه است. نتایج حاصل از این مطالعه، علاوه بر ارایه یک شاخص جامع‌تر در بررسی کیفیت خاک، می‌تواند در راستای کمک به حفاظت از محیط‌زیست اطراف مجتمع که از نظر زیست‌محیطی حساسیت بالایی دارد، به‌کار گرفته شوند.

مواد و روش‌ها

معرفی منطقه مورد مطالعه: شرکت ملی سرب و روی ایران واقع در شهرستان زنجان و در موقعیت جغرافیایی ۳۶ درجه و ۳۷ دقیقه و ۳۸ درجه و ۳۰ ثانیه عرض شمالی و ۴۸ درجه و ۳۷ دقیقه و ۴۸ درجه و ۴۱ دقیقه طول شرقی است. این واحد در زمینی به وسعت ۵۶۰ هکتار در ۱۵ کیلومتری شرق شهر زنجان استقرار یافته است. منطقه مورد مطالعه در این پژوهش، علاوه بر شرکت ملی سرب و روی زنجان، شامل روستاهای ایستگاه بناب، کهناب و دیزج‌آباد است (شکل ۱). اغلب فعالیت‌های اصلی در منطقه، زراعت دیم و آبی است و بخش‌های اعظمی از آن به مراتع اختصاص دارد. آمیختگی فعالیت‌های صنعتی و کشاورزی این منطقه، بررسی آن را از نظر زیست‌محیطی بسیار حیاتی می‌نماید. بر اساس شکل ۱، زمین‌شناسی منطقه نشان می‌دهد که محدوده بر روی تراس و مخروط‌افکنه و در نزدیکی رسوبات عهد حاضر به سن پلئوسن و کواترنری قرار گرفته است.

نمونه‌برداری و آنالیز نمونه‌ها: در اجرای این پروژه با توجه به هدف مطالعه، وسعت و ویژگی‌های منطقه و تعیین میزان آلودگی، هم‌چنین تهیه نمونه کافی و مناسب که بر اساس نتایج آن‌ها امکان تجزیه و تحلیل آماری فراهم گردد، از روش نمونه‌برداری منظم که

محاسبه آلاینده‌گی بیش از یک فلز به‌کار می‌روند (۲۳)، جز شاخص‌های تلفیقی هستند (۲۴). در تمامی این شاخص‌ها و روش‌های آماری چندمتغیره تجزیه مؤلفه‌های اصلی و آنالیز تحلیل خوشه‌ای، تلاش بر این است که با شناسایی مناطق آلوده، تحلیل‌های آماری و استفاده از غلظت مرجع، میزان آلودگی مشخص شود (۲۵). مشکل اصلی این روش‌ها، ناتوانی آن‌ها در ارائه رویکردی جامع از شرایط کیفیت خاک است که در عین توانایی برای نشان دادن ویژگی‌های آلودگی، ارتباط بین فلزات سنگین را در مناطق آلوده منعکس سازد. با توجه به این محدودیت، یانگ و همکاران (۲۰۲۱) روش ابتکاری جدیدی را برای ارزیابی آلودگی خاک به فلزات سنگین ارائه نمودند. روش آن‌ها، معرفی شاخص وزنی بهبودیافته، با وزن دادن به فلزات سنگین مختلف آلاینده خاک، توسط روش‌های آماری تجزیه مؤلفه‌های اصلی و آنالیز تحلیل خوشه‌ای می‌باشد. تفاوت اساسی این شاخص با سایر روش‌ها، در نظر گرفتن شرایط محیطی مختلف در مهاجرت و انتقال فلزات سنگین است. بر مبنای شاخص وزنی بهبودیافته، میزان کاهش یا افزایش غلظت فلزات سنگین در هر ایستگاه نمونه‌برداری با کمک آنالیز تحلیل خوشه‌ای گروه‌بندی می‌شود تا خصوصیات مختلف آلودگی از هم تفکیک شوند. سپس برای شناسایی تأثیر ارتباط بین فلزات بر آلودگی خاک، از تجزیه مؤلفه‌های اصلی برای جداسازی فاکتورهای مؤثر در هر خوشه استفاده می‌شود. این روند هم‌چنین به‌طور قابل‌توجهی ابعاد آنالیز را کاهش می‌دهد، زیرا وزن اختصاص داده‌شده به فلزات سنگین، هم سهم عوامل در آلودگی خاک و هم سهم فلزات در عامل مربوطه را در نظر می‌گیرد (۲۶).

هدف از این مطالعه بررسی مکانی گسترش فلزات سنگین آلاینده در خاک اطراف مجتمع سرب و روی

سپس به آن ۱۰ میلی لیتر پرکلریک اسید و ۲ میلی لیتر اسید هیدروفلوئوریک غلیظ اضافه و روی اجاقک گذاشته شد و دمای آن به ۱۰۰ درجه سلسیوس افزایش داده شد. در این روش، چون هدف، هضم کامل نمونه جامد است، اضافه نمودن اسید هیدروفلوئوریک تا شفاف شدن نمونه ادامه پیدا کرد. در پایان، ۱۰ میلی لیتر اسید هیدروکلریک غلیظ به نمونه‌ها اضافه شده و به مدت ۱۰ دقیقه، نمونه در همان دما نگه داشته شد. پس از سرد شدن نمونه، آن را به بالن حجمی ۵۰ تا ۱۰۰ میلی لیتری انتقال داده و با آب دو بار تقطیر به حجم رسانده شد. آنالیز آماری داده‌ها و محاسبات شاخص‌ها با استفاده از نرم افزارهای Excel و SPSS 23 انجام گرفت. نقشه‌ها توسط نرم افزار ArcMap 10 تهیه شدند.

شاخص وزنی بهبود یافته: در این شاخص از دو روش آماری تجزیه مؤلفه‌های اصلی و آنالیز تحلیل خوشه‌ای برای شناسایی خصوصیات و رابطه بین آلاینده‌ها استفاده شد. برای تشخیص ویژگی‌های مختلف آلودگی در منطقه مورد مطالعه توسط آنالیز تحلیل خوشه‌ای بر اساس غلظت فلزات سنگین خوشه‌بندی انجام گرفت. روش وارد^۳ با استفاده از رویکرد فاصله اقلیدسی مربع، برای ترکیبات خوشه‌ای به کار گرفته شد. برای نرمال کردن دامنه داده‌ها از تبدیلات مقیاس Z استفاده شد (۲۹) و در مرحله بعدی از تجزیه مؤلفه‌های اصلی برای شناسایی سهم فلزات سنگین در آلودگی خاک استفاده شد؛ بدین صورت که برای هر خوشه به طور جداگانه تحلیل عاملی انجام گرفت. ابتدا آزمون بارتلت و مقیاس کیسر-میر-اولکین^۴ برای تأیید کفایت داده‌ها به منظور اجرای تجزیه مؤلفه‌های اصلی مورد بررسی قرار گرفت. در ادامه چرخش واریماکس، نرمال‌سازی کرسیر^۵ انجام گرفت (۳۰ و ۳۱).

مرکز آن شرکت ملی سرب و روی زنجان بود، استفاده شده است. بدین جهت، منطقه‌ای به مساحت ۵۱ کیلومتر اطراف شرکت سرب و روی ایران برای برداشت نمونه انتخاب شد. ابتدا نقاط نمونه برداری روی نقشه جغرافیایی به صورت منظم انتخاب شدند. در مجموع، ۷۱ نقطه نمونه برداری انتخاب شد. نمونه برداری از هر نقطه، بدین صورت طرح ریزی شده بود که نمونه از عمق صفر تا ۲۰ سانتی متری پس از پاک کردن سطح نمونه برداری از گیاهان و بقایایی ریشه و کلوخه، برداشت شد. سپس نمونه‌ها در پلاستیک جداگانه با ذکر موقعیت و عبارت مشخص کننده به آزمایشگاه انتقال یافتند. نقاط نمونه برداری در شکل ۱ نشان داده شده‌اند.

نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۱۰۵ درجه سلسیوس در آون مدل G601 خشک شدند. نمونه‌ها از الک پلی اتیلنی با قطر دو میلی متر عبور داده شدند. پهاش^۱ خاک با استفاده از نسبت خاک به آب ۱:۲ و توسط پهاش متر مدل MTT 65 ساخت ایران (۲۷)، اندازه گیری شد. به منظور تعیین غلظت کل فلزات سنگین توسط دستگاه اسپکترومتری نشری پلاسمای جفت شده القایی^۲، مدل Perkin-Elmer ELAN 9000 ساخت آمریکا اندازه گیری شد. برای این منظور، ۰/۵ گرم از نمونه‌های خاک غربال شده به آزمایشگاه زرازا در شهرستان زنجان ارسال شد. نمونه‌ها برای آنالیز غلظت کل فلزات سنگین با استفاده از روش هضم چهار اسید مشتمل بر اسید هیدروفلوئوریک، اسید پرکلریک، اسید نیتریک و اسید هیدروکلریک هضم شدند (۲۸). بدین صورت که نمونه خاک هواخشک شده را درون یک بوتله توزین نموده و به آن ۵ میلی لیتر اسید نیتریک غلیظ اضافه شد و به مدت ۳۰ دقیقه در دمای اتاق قرار گرفت.

3- Ward's method

4- Kaiser-Meyer-Olkin, KMO

5- Kaiser

1- pH

2- Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectroscopy, ICP-OES

بود. محاسبه شاخص وزنی بهبودیافته با استفاده از رابطه ۱ انجام شد.

$$IWI = \sum_{i=1}^n wipi \quad (1)$$

که در آن، Wi وزن به دست آمده است و pi شاخص آلودگی است که از رابطه ۲ محاسبه می شود:

$$pi = Ci/Bi \quad (2)$$

در این رابطه، Ci غلظت اندازه گیری شده و Bi غلظت پس زمینه فلزات سنگین است. در صورتی که مقدار این شاخص بالاتر از ۱ باشد، نشان دهنده تأثیر فعالیت های انسانی بر آلودگی خاک است. تقسیم بندی ارائه شده برای شاخص وزنی بهبودیافته توسط یانگ و همکاران (۲۰۲۱)، در جدول ۱ ارائه شده است (۲۶).

غلظت پس زمینه مورد استفاده در این مطالعه، با استفاده از شاخص میانگین هندسی (رابطه ۳) و توسط نمونه هایی که هیچ گونه آلودگی بر اساس استاندارد ایران (جدول ۱) نشان ندادند، محاسبه شد (استاندارد ارائه شده برای حد آستانه آلاینده های خاک ($pH < 7$) جهت حفاظت از محیط زیست توسط معاونت محیط زیست انسانی ایران، دفتر آب و خاک).

میانگین هندسی^۲ داده های عناصر (X_1, X_2, \dots, X_n) در نمونه های خاک (n) به عنوان غلظت زمینه استفاده شد. میانگین هندسی میانگین لگاریتم داده ها است که با تبدیل نمایی برگردانده می شود (۳۴).

$$GM = \exp\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln x_i\right) \quad (3)$$

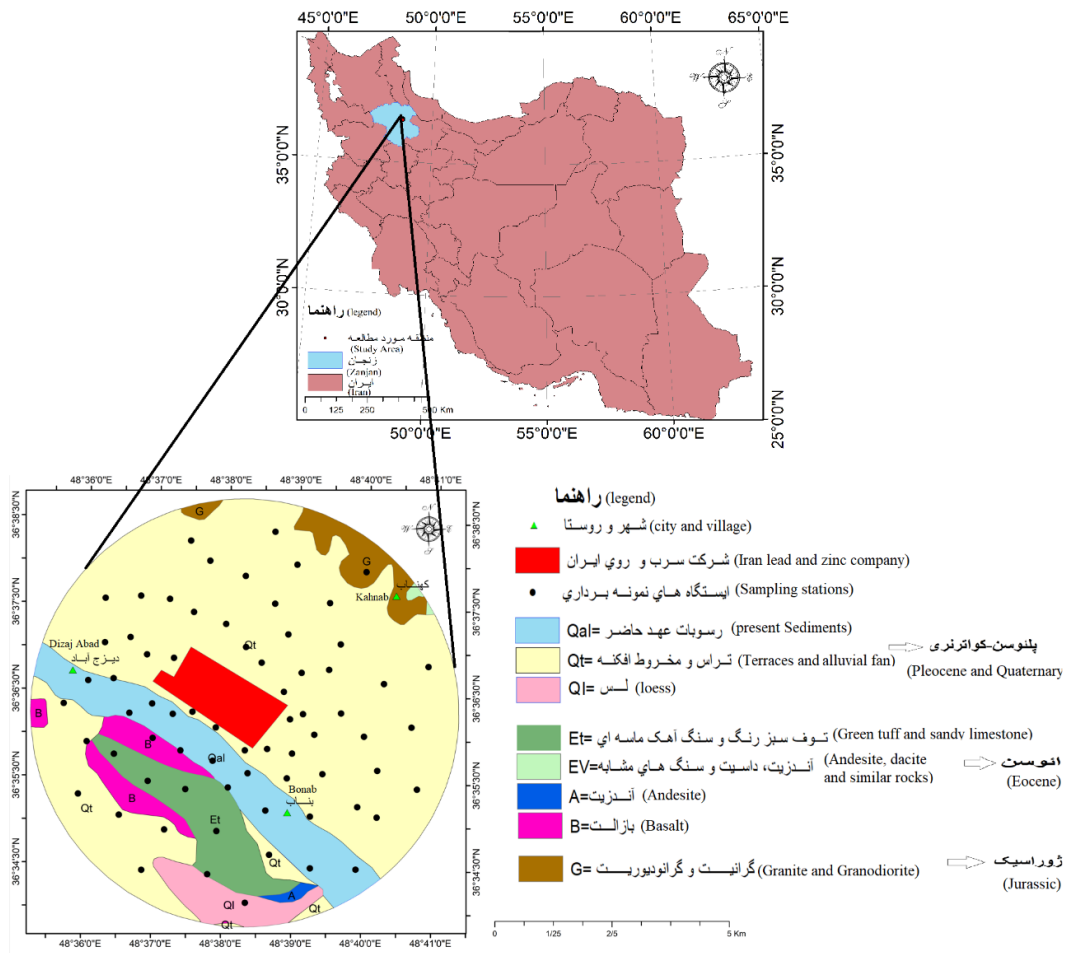
شاخص های تجمیعی: شاخص بار آلودگی به عنوان شاخص تعیین کمیت ریسک آلودگی و آگاهی از پتانسیل آلودگی فلزات سنگین در منطقه معرفی شده است. با استفاده از این شاخص می توان مقدار آلودگی

چرخش واریامکس به این علت استفاده می شود که چنین چرخش متعامدی، تعداد متغیرها با خاصیت بارگذاری بالا، روی هر جز را به حداقل می رساند، بنابراین تفسیر نتایج تجزیه مؤلفه های اصلی را به حداقل می رساند (۳۲). برای محاسبه مقدار بار^۱، همبستگی بالای فلزات سنگین با فاکتورها در نظر گرفته می شود.

برای تجزیه مؤلفه های اصلی، جهت تعیین و تشخیص مناسب بودن داده ها برای تحلیل عاملی از ضریب کیسر-میر-اولکین استفاده می شود. مقدار این ضریب همواره بین صفر و یک در نوسان است و هر چه این ضریب به یک نزدیک تر باشد، تحلیل عاملی معتبرتر است. تعداد فاکتورهای به دست آمده بر اساس مقدار ویژه است. فاکتورهایی با مقدار ویژه بزرگ تر از یک به عنوان عامل معنی دار انتخاب و مابقی فاکتورهایی که رابطه معنی دار ندارند، حذف می شوند (۳۳). ابتدا مقادیر ویژه نسبی برای هر عامل که نشان دهنده سهم نسبی عوامل در آلودگی خاک است، به عنوان نسبت مقادیر ویژه مربوطه محاسبه شد. نحوه محاسبه مقدار ویژه نسبی به این صورت است که مجموع مقادیر ویژه در فاکتورها در هر خوشه تجمیع شده و تقسیم بر مقدار ویژه فاکتور می شود. نحوه محاسبه مقدار بار نسبی نیز بدین صورت است که مجموع مقادیر بار هر فاکتور بر اساس فلزات سنگینی که مقدار بار آن ها بر اساس بیشترین همبستگی در هر فاکتور انتخاب شده تجمیع شده و تقسیم بر مقدار بار فلز سنگین می گردد. مجموع مقادیر ویژه نسبی برابر با یک بود. پس از آن، مقادیر ویژه نسبی و مقدار بار نسبی برای محاسبه وزن فلزات سنگین مختلف در همدیگر ضرب شدند. وزن به دست آمده، منعکس کننده تأثیرات مختلف فلزات سنگین بر آلودگی خاک ناشی از روابط بین فلزات هر ایستگاه

تأثیر گونه‌هایی با بالاترین شاخص آلودگی منفرد (pi_{Max}) را مشخص کرد (۲۲). در جدول ۲ به ترتیب روابط شاخص‌های عنوان شده ارائه شده است.

را از بعد مکانی مقایسه نمود (۳۵). شاخص آلودگی نمره نیز می‌تواند سهم فلزات سنگین را در آلودگی خاک منعکس کند. با استفاده از این شاخص می‌توان



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه به همراه نقاط نمونه برداری و زمین شناسی آن (زمین شناسی با اندکی تغییرات، برگرفته از نقشه ۱:۲۵۰۰۰۰ زنجان است) (۳۶).

Figure 1. Geographical location map with sampling points and Geology map of the region (geology map with changes taken from the 1:250000 map of Zanjan) (36).

جدول ۱- دامنه تغییرات شاخص وزنی بهبود یافته.

Table 1. The range of IWI index changes.

شدیداً آلوده Severely pollution	آلودگی متوسط Average pollution	آلودگی کم Low pollution	فاقد آلودگی Without pollution
$IWI \geq 3$	$2 < IWI \leq 3$	$1 < IWI \leq 2$	$IWI \leq 1$

جدول ۲- معرفی شاخص‌های مورد استفاده به همراه ارائه رده‌بندی و منابع مورد استفاده.

Table 2. Introduction of the indicators used with classification and sources used.

رده‌بندی (Classification)	معادله (Equation)	منبع (Source)
<p>$1 \leq \text{PLI} < 2$ درجه پایین آلودگی، $2 \leq \text{PLI} < 3$ درجه متوسط آلودگی، $3 \leq \text{PLI} < 5$ درجه بالا، $5 \leq \text{PLI}$ درجه بسیار بالا</p> <p>$1 \leq \text{PLI}$ is a low level of pollution, $2 \leq \text{PLI} < 3$ is a medium level of pollution, $3 \leq \text{PLI} < 5$ is a high level of pollution, $5 \leq \text{PLI}$ is a level of very high level of pollution</p>	$\text{PLI} = \left(\frac{C_x^1}{C_b^1} \times \frac{C_x^2}{C_b^2} \times \dots \times \frac{C_x^n}{C_b^n} \right)^{\frac{1}{n}}$	<p>PLI</p> <p>۴۸ (48)</p>
<p>$\text{PN} \leq 0.7$ فاقد آلودگی، $0.7 < \text{PN} < 1$ در معرض آلودگی، $1 < \text{PN} \leq 2$ سطح آلودگی کم، $2 < \text{PN} < 3$ سطح آلودگی متوسط، $\text{PN} \geq 3$ سطح آلودگی بالا</p> <p>$0.7 \geq \text{PN}$ unpolluted, $1 \geq \text{PN} > 0.7$ exposed to pollution, $2 \geq \text{PN} > 1$ low pollution level, $3 \geq \text{PN} > 2$ medium pollution level, $3 \leq \text{PN}$ high pollution level</p>	$\text{PN} = \sqrt{\frac{\bar{p}i^2 + p_{i\max}^2}{2}}$	<p>PN</p> <p>۲۴ (24)</p>

در روابط فوق R_{Soil} و R_b مقدار عنصر مرجع در نمونه خاک و نمونه مرجع، C_b^i و C_x^i غلظت فلز در خاک نمونه و نمونه مرجع و N تعداد آلاینده‌ها است. \bar{p} میانگین و p_{\max} بیش‌ترین مقدار شاخص آلودگی منفرد می‌باشند.

In the above relationships, R_{Soil} and R_b are the amount of the reference element in the soil sample and the reference sample, C_x^i and C_b^i are the metal concentrations in the soil sample and the reference sample, and N is the number of pollutants. \bar{p} average and p_{\max} are the maximum value of single pollution index

نتایج و بحث

درصد)، آنتیموان (۱۸۶/۵ درصد)، کادمیم (۱۵۵/۱ درصد) و آرسنیک (۱۱۲ درصد)، روی (۸۶/۳ درصد) و مس (۶۵/۸ درصد) دارند. استاندارد ایران ارائه‌شده جهت حفاظت از محیط‌زیست نشان می‌دهد که ۴۶ درصد از نمونه‌ها از نظر غلظت باریم، ۸/۴ درصد نمونه‌ها از نظر غلظت نیکل، ۱۵ درصد نمونه‌ها از نظر وانادیم، ۱۰۰ درصد نمونه‌ها از نظر تالیم، ۱۷ درصد نمونه‌ها از نظر غلظت آرسنیک، ۱۳ درصد نمونه‌ها از نظر غلظت روی و ۵ درصد نمونه‌ها از نظر غلظت کادمیم مقدار بالاتری از حد آستانه را نشان می‌دهند. از نظر غلظت عناصر آنتیموان، سرب و مس کم‌تر از ۱۰ درصد از نمونه‌ها غلظت بالاتری از حدود استاندارد تعیین‌شده توسط معاونت محیط‌زیست انسانی ایران نشان دادند و عناصر کبالت و مولیبدن فاقد آلودگی هستند. هم‌چنین کبالت و مولیبدن از نظر مقدار میانگین پسته زمین

نتایج آمار توصیفی نمونه‌های خاک به همراه مقایسه آن‌ها با مقادیر استاندارد ایران و میانگین غلظت در پسته زمین در جدول ۳ ارائه شده است. پهاش خاک وابسته به ویژگی‌های مانند تبادل یونی، درصد مواد آلی و رس خاک است که این پارامترها به‌طور مستقیم با انحلال فلزات مختلف که روی پهاش خاک مؤثر هستند، در ارتباط است (۳۷). متوسط پهاش خاک منطقه ۷/۴ و کم‌ترین و بیش‌ترین آن به ترتیب ۶/۹ و ۸/۲ است که نشان‌دهنده شرایط قلیایی و کمی قلیایی است. بر اساس متوسط غلظت فلزات سنگین در منطقه به ترتیب تالیم < باریم < روی < وانادیوم < سرب < نیکل < مس < آرسنیک < کبالت < مولیبدن < آنتیموان < کادمیم بیش‌ترین غلظت را نشان دادند. بالاترین ضریب تغییرات فلزات سنگین را عنصر سرب (۱۹۶/۵

نشان می‌دهند. با توجه به این که فلزات سنگین آرسنیک، کادمیم و سرب بیشترین نگرانی را از نظر زیست محیطی دارند و غلظت عنصر روی در منطقه می‌تواند در نتیجه تأثیر فعالیت‌های صنعتی افزایش یابد، نقشه پراکندگی غلظت این فلزات سنگین در شکل ۲ ارائه شده است.

غلظت بالاتری نشان ندادند. در بین عناصر آرسنیک و تالیم همه نمونه‌ها از مقدار میانگین پوسته زمین غلظت بالاتری نشان دادند. هم‌چنین غلظت عناصر باریم، کادمیم، سرب و روی بیش از ۹۰ درصد بالاتر از میانگین پوسته زمین است. نیکل در بیش از ۴۰ درصد نمونه‌ها و وانادیم، آنتیموان و مس در کم‌تر از ۱۰ درصد نمونه‌ها غلظت بالاتری از حد پوسته زمین

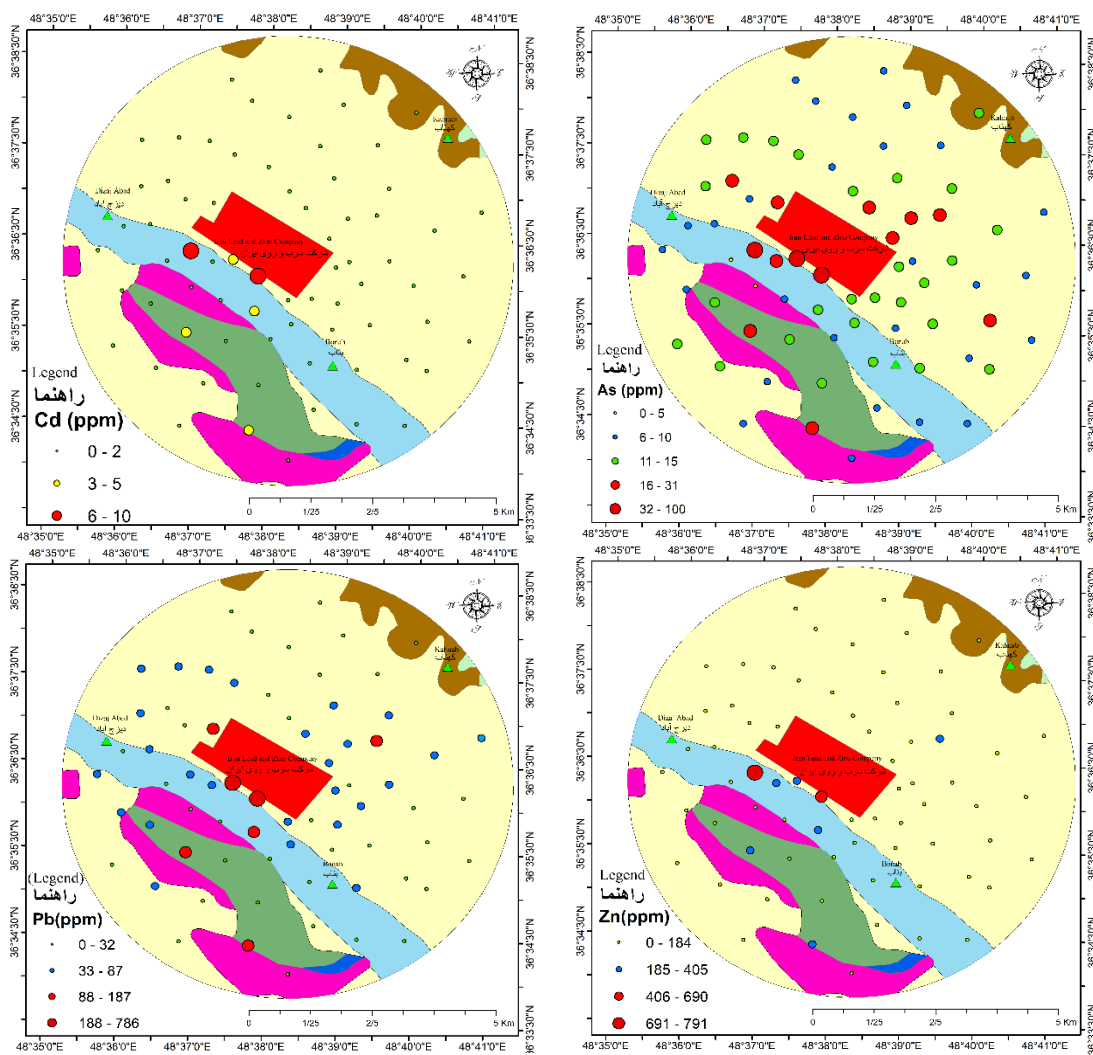
جدول ۳- نتایج آمار توصیفی نمونه‌های خاک، استاندارد ایران و میانگین غلظت فلزات در پوسته زمین (غلظت عناصر بر حسب قسمت در میلیون یا میلی‌گرم بر کیلوگرم).

Table 3. Results of descriptive statistics of soil samples, Iran standard and average concentration of metals in the earth's crust (elements in part per million or milligram in kilogram).

میانگین غلظت در پوسته زمین Average Concentration in Earth's Crust	استاندارد ایران* Iran Standard	ضریب تغییرات (%) Coefficient of Variations	میانگین Average	حداکثر Max	حداقل Min	نماد فلزات Symbol of metals	فلزات سنگین Heavy Metal
1.8 ¹	17	112	14.8	100	4.6	As	آرسنیک Arsenic
340 ¹	500	16.3	488.6	687	274	Ba	باریم Barium
102 ³	4	7.9	9.7	1.1	0.83	Mo	مولیبدن Molybdenum
25 ³	50	43.1	30.2	55	6	Ni	نیکل Nickel
0.2 ²	3.9	155.1	0.92	10.1	0.16	Cd	کادمیم Cadmium
55 ¹	63	65.8	27.7	146	3	Cu	مس Copper
1.5 ³	20	186.5	2.2	27.9	0.82	Sb	آنتیموان Antimony
14 ²	300	196.5	56.1	768	7	Pb	سرب Lead
130 ³	130	29.6	108.3	220	54	V	وانادیوم Vanadium
0.52	0.9	22.07	4252	6605	2511	Tl	تالیوم Thallium
752	200	86.3	138	791	52	Zn	روی Zinc
251	20	20.1	10.3	15	6	Co	کبالت Cobalt
-	-	5.4	7.4	8.2	6.9	pH	پ‌هاس pH

* استاندارد ارائه شده برای حد آستانه آلاینده‌گی خاک (pH < 7) جهت حفاظت از محیط‌زیست توسط معاونت محیط‌زیست انسانی ایران، دفتر آب و خاک، ۳۸^۱، ۳۹^۲، ۴۰^۳ و ۴۱^۳

* The standard provided for the soil pollution threshold limit (pH > 7) for environmental protection by Iran's Human Environment Deputy, Water and Soil Office, 38¹, 39², 40³ and 41³



شکل ۲- پراکنش فلزات سنگین در اطراف شرکت سرب و روی ایران (نقاط قرمز رنگ نشان‌دهنده محدوده بالاتر از حد آستانه براساس استاندارد ایران ارائه‌شده جهت حفاظت از محیط‌زیست).

Figure 2. Distribution of heavy metals around Iran's lead and zinc company (red points indicate the range above the threshold based on Iran's standard provided for environmental protection).

غلظت فلزات سنگین در اطراف شرکت سرب و روی ایران و به‌خصوص در اطراف شرکت بالاتر از سایر نقاط است. با توجه به بالا بودن ضریب تغییرات عناصر در منطقه، تغییرات و پراکنندگی فلزات سنگین در محدوده مورد مطالعه متغیر است. چرا که در برخی نقاط غلظت عناصر بالاتر از نقاط با فاصله بیشتر از شرکت سرب و روی انگوران می‌باشد.

در جدول ۴ مقدار غلظت زمینه‌ای محاسبه‌شده توسط روش میانگین هندسی و مقادیر به‌دست‌آمده توسط سایر پژوهش‌گران ارائه‌شده است. برای محاسبه غلظت زمینه‌ای ایستگاه‌های نمونه‌برداری به‌نحوی انتخاب شدند که به‌دوراز فعالیت‌های صنعتی در منطقه بوده و تنها در یکی از فلزات سنگین براساس استاندارد محیط‌زیست آلاینده‌گی نشان دادند. غلظت زمینه طبیعی محاسبه‌شده در محدوده مطالعه و سایر مطالعات تفاوت اندک آن را با سایر مطالعات نشان می‌دهد.

جدول ۴- غلظت زمینه‌ای محاسبه شده توسط میانگین هندسی در این پژوهش و مقایسه آن با نتایج سایر پژوهش‌گران (نتایج بر حسب ppm).

Table 4. The background concentration calculated by the geometric mean in this research and its comparison with the results of other researchers (results in ppm).

Co	Zn	Tl	V	Pb	Sb	Cu	Cd	Ni	Mo	Ba	As	منابع مورد مقایسه Comparative sources
9.8	91.5	3630.5	95.4	23.5	1.3	22.2	0.4	30.2	0.9	423.6	9.7	مطالعه حاضر Current study
-	40.2	-	-	34.2	-	28.3	0.23	45.7	-	-	-	عظیم‌زاده و خادمی، ۱۳۹۱ (بخشی از خاک‌های سطحی مازندران) ^{۴۹} Azimzadeh and Khademi, 1391 (a part of the surface soils of Mazandaran) ⁴⁹
24	93.5	-	-	59.6	-	28.2	0.27	42	-	-	-	افشاری و همکاران، ۱۳۹۴ (خاک‌های مرکزی استان زنجان) ^{۵۰} Afshari et al., 2016 (central soils of Zanjan province) ⁵⁰
30	59.4	-	-	8.8	-	18.2	2.2	47	-	-	-	رحمانی و خان‌محمدی، ۱۳۹۹ (خاک‌های منطقه دیزچه اصفهان) ^{۵۱} Rahmani and Khan-Mohammadi, 2019 (soils of Diziche region of Isfahan) ⁵¹

خط تیره برای فلزات سنگینی به کار رفته که مقداری برای آن‌ها ارائه نشده است

A dashed line is used for heavy metals for which no amount is provided

میلیون است. خوشه دوم که بیش‌ترین تعداد نمونه‌ها در این خوشه است، اغلب بخش‌های شمالی شرکت سرب و روی ایران را در بر گرفته است. عناصر تالیم با مقدار ۳۸۱۱/۴، باریم با میانگین ۴۷۳/۷، روی با میانگین ۱۰۷/۳، وانادیم با میانگین ۱۰۵/۲، سرب با میانگین ۳۵/۲ و نیکل با میانگین ۲۸/۲ قسمت در میلیون است. خوشه سوم که بیش‌تر شامل بخش‌های جنوب غربی شرکت سرب و روی ایران را شامل می‌شود، تالیم با میانگین ۴۹۵۷/۸، باریم با میانگین ۵۶۵/۵، روی با میانگین ۲۳۵/۷ و سرب با میانگین ۱۲۷ قسمت در میلیون بیش‌ترین غلظت را در این گروه دارند. بنابراین با توجه به تفاوت در غلظت فلزات سنگین در خوشه‌ها می‌توان چنین استنباط کرد خصوصیات آلاینده‌ها در نمونه‌ها متفاوت است. پس

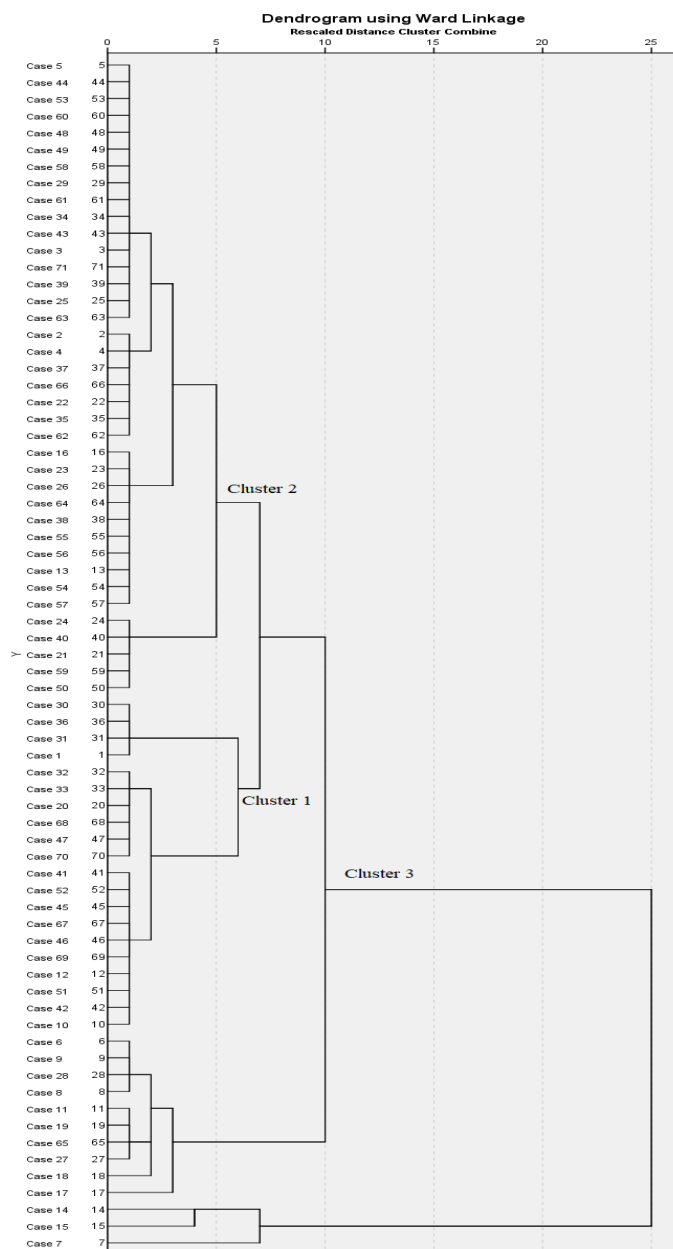
نتایج ارزیابی آلودگی فلزات سنگین توسط شاخص وزنی بهبود یافته: روش آنالیز تحلیل خوشه‌ای برای ۷۱ ایستگاه نمونه‌برداری اعمال و سه خوشه مجزا شد (شکل ۳). خوشه اول ۲۰، خوشه دوم ۳۷ و خوشه سوم شامل ۱۴ ایستگاه نمونه‌برداری است (شکل ۴). خوشه اول بیش‌تر در امتداد بخش‌های شمال غربی و جنوب شرقی شرکت سرب و روی ایران گسترش دارد و در این خوشه تالیم با میانگین ۴۵۷۲/۹ قسمت در میلیون بیش‌تر از سایر عناصر است. پس‌از آن، باریم دارای تمرکز بالاتری از سایر فلزات سنگین با میانگین ۴۶۲/۶ قسمت در میلیون است. در نهایت بیش‌ترین غلظت متعلق به وانادیم و روی با میانگین ۱۲۹/۸ و ۱۲۶/۲ قسمت در میلیون است. عناصر سرب با میانگین ۴۵/۲ و مس با میانگین ۲۹/۹ قسمت در

فاکتور اول و دوم در مجموع ۵۵/۴ درصد از کل تغییرات را نشان می‌دهند. فاکتور اول عناصر آرسنیک، کادمیم، سرب و روی همبستگی بالاتری نشان می‌دهند. در فاکتور دوم باریم، تالیم و وانادیم همبستگی مثبت بالایی نشان می‌دهند. در این خوشه، فاکتور سوم و چهارم در مجموع ۲۷ درصد کل تغییرات را نشان می‌دهند، در فاکتور سوم کبالت، نیکل و مس و در فاکتور چهارم آنتیموان همبستگی بالا نشان می‌دهد. مولیبدن با فاکتور اول، دوم و چهارم همبستگی نه‌چندان بالا و متوسطی نشان می‌دهد. در خوشه سوم ۴۸/۳ درصد تغییرات توسط فاکتور اول و دوم نشان داده می‌شود. در فاکتور اول، آرسنیک، کادمیم و روی و در فاکتور دوم مس، سرب و آنتیموان همبستگی مثبت و بالایی داشتند. نیکل به‌تنهایی در فاکتور سوم و کبالت و وانادیم در فاکتور چهارم همبستگی مثبت بالایی داشتند و عناصر باریم و تالیم همبستگی منفی بالا در فاکتور سوم و مولیبدن در فاکتور چهارم همبستگی منفی بالا نشان می‌دهند. وجود رابطه مثبت معنی‌دار بین روی و کادمیم به دلیل ارتباط تنگاتنگ ژئوشیمیایی بین این عناصر گزارش شده است، به‌طوری‌که خاک‌های آلوده به روی در عمل به کادمیم نیز آلوده هستند (۴۲). در پژوهشی که بر روی منشأیابی آلودگی فلزات سنگین در خاک‌های جزیره هرمز با استفاده از تجزیه مؤلفه‌های اصلی و آنالیز تحلیل خوشه‌ای انجام گرفته بود، نشان داده شد که روی و کادمیم در یک گروه و آهن، نیکل و سرب در گروه دیگر قرار گرفته‌اند. نتایج نشان داد که تفاوت منشأ بین گروه‌های عنوان‌شده وجود دارد. اما در بین عناصر گروه‌ها همبستگی بالایی وجود دارد. این منشأ متفاوت می‌تواند احتمالاً در نتیجه تفاوت در ساختارهای زمین‌شناسی در منطقه باشد، زیرا در منطقه مورد مطالعه فعالیت‌های صنعتی آلاینده وجود

از محاسبه آنالیز تحلیل خوشه‌ای برای هر خوشه با روش آماری تجزیه مؤلفه‌های اصلی برای به دست آوردن مقادیر ویژه، واریانس و مقدار بار در هر خوشه و در مجموعه داده‌ها، به‌کار گرفته شد. مقدار کیس-میر-اولکین برای هر خوشه بیش از ۰/۴۵ (خوشه اول ۰/۵۲۲، خوشه دوم ۰/۵۶۱ و خوشه سوم ۰/۴۵۱) و مقدار بارتلت ($>0/001$) نشان‌دهنده کفایت روش آماری تجزیه مؤلفه‌های اصلی برای محاسبه هر خوشه است. در خوشه‌ها مقدار ویژه بیش‌تر از ۱ به‌دست آمده است، به عبارتی در خوشه اول ۸۰/۴ درصد تغییرها با کاهش ابعاد مجموعه داده‌ها به سه فاکتور به‌دست‌آمده است. خوشه دوم در چهار فاکتور ۸۲/۲ درصد تغییرات مجموعه اولیه داده‌ها به‌دست‌آمده و در خوشه سوم، مجموعه داده‌ها با چهار فاکتور ۸۷/۹ درصد از تغییرات مجموعه داده‌های اولیه ارائه شده است. بنابراین این فاکتورها نقش مهمی در شناسایی چگونگی توزیع آلودگی فلزات سنگین در منطقه دارند. در جدول ۵ چرخش واریماکس برای هر خوشه محاسبه‌شده از آزمون آنالیز تحلیل خوشه‌ای بر روی نمونه‌های منطقه مورد مطالعه ارائه شده است. در خوشه اول، فاکتور اول و دوم در مجموع ۶۵/۷ درصد از کل تغییرات را نشان می‌دهند. فاکتور اول شامل همبستگی مثبت و بالای عناصر باریم، مولیبدن، وانادیم و تالیم است. در فاکتور دوم عناصر آرسنیک، کادمیم، سرب و روی همبستگی مثبت بالایی نشان دادند و در خوشه سوم کبالت و مس همبستگی بالا نشان می‌دهند. عناصر آنتیموان و نیکل به ترتیب در فاکتور اول و سوم همبستگی مثبت متوسطی نشان می‌دهند. خوشه دوم همان‌طور که عنوان شد، بخش بیش‌تری از ایستگاه‌های نمونه‌برداری را شامل می‌شود و پراکندگی بالاتری در بخش‌های شمالی و بخشی از محدوده جنوبی منطقه را در برمی‌گیرد. در خوشه دوم،

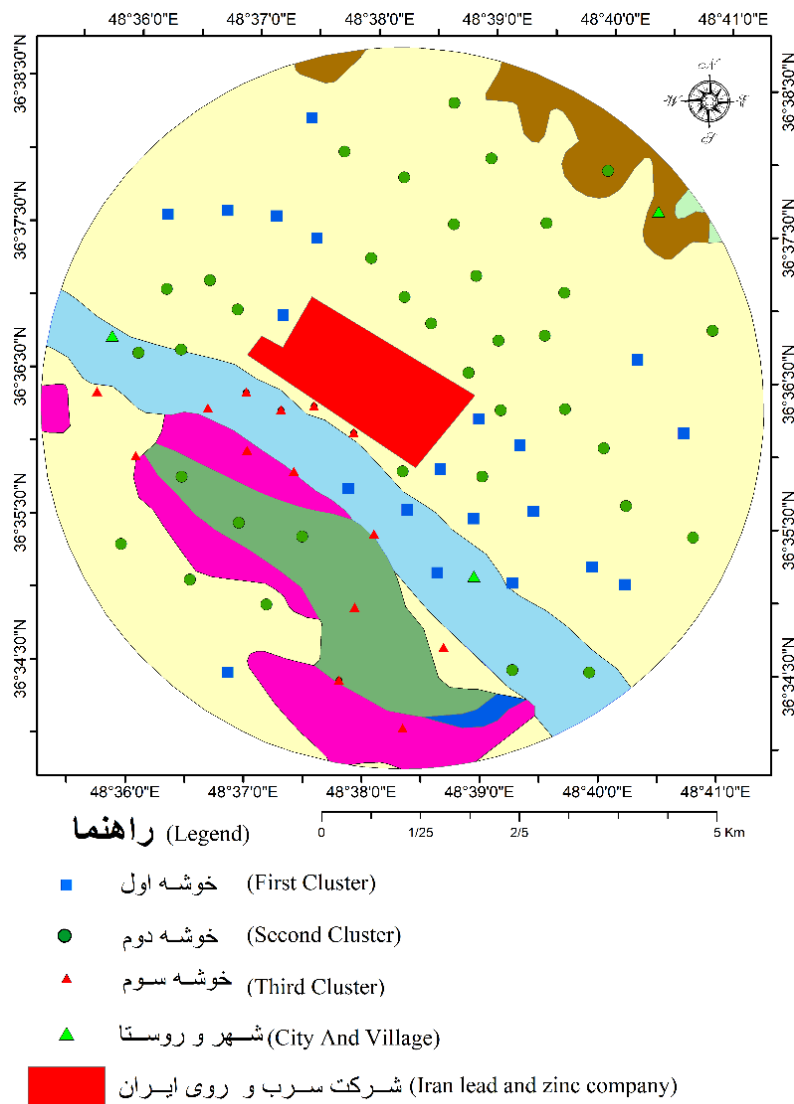
منطقه بود، چراکه در فاکتور اول دارای همبستگی مثبت بالایی بودند (۳۲). در جدول ۶ وزن اختصاص داده شده بر اساس خوشه بندی و فلزات سنگین در هر فاکتور ارائه شده است.

نداشت (۴۳). در مطالعه ای دیگر که بر روی منشأ یابی فلزات سنگین در خاک های مجاور صنایع فولاد کرمان با استفاده از تجزیه مؤلفه های اصلی و آنالیز تحلیل خوشه ای انجام گرفته بود؛ نتایج نشان دهنده منشأ گرفتن سرب و کروم در نتیجه فعالیت های انسانی در



شکل ۳- روش آنالیز تحلیل خوشه ای برای ۷۱ ایستگاه نمونه برداری.

Figure 3. HCA method for 71 sampling stations.



شکل ۴- نتایج حاصل از خوشه‌بندی نمونه‌ها در محدوده مورد مطالعه.

Figure 4. The results of clustering samples in the studied area.

جدول ۵- چرخش واریماکس برای هر خوشه محاسبه شده از آزمون آنالیز تحلیل خوشه‌ای بر روی نمونه‌های منطقه مورد مطالعه.

Table 5. Varimax rotation for each cluster calculated from the HCA test on the samples of the studied area.

خوشه سوم (Third cluster)				خوشه دوم (Second cluster)				خوشه اول (First cluster)			متغیر Variable
فاکتور چهارم 4factor	فاکتور سوم 3factor	فاکتور دوم 2factor	فاکتور اول 1factor	فاکتور چهارم 4factor	فاکتور سوم 3factor	فاکتور دوم 2factor	فاکتور اول 1factor	فاکتور سوم 3factor	فاکتور دوم 2factor	فاکتور اول 1factor	
2.1	2.6	2.7	3	1.1	2	2.8	3.8	1.7	3.5	4.3	مقدار ویژه Eigen value
17.7	21.8	23.2	25	9.7	17.1	23.4	31.9	14.6	29.7	36	واریانس (%) Variance (%)
87.9	70.2	48.3	25	82.2	72.5	55.4	31.9	80.4	67.7	36	واریانس تجمعی (%) Cumulative variance (%)
0.166	0.267	0.426	0.833	0.026	-0.102	0.039	0.870	-0.140	0.788	0.248	As
-0.353	-0.833	-0.060	-0.185	-0.006	0.085	0.772	0.241	-0.056	0.247	0.870	Ba
-0.855	0.065	0.191	0.020	0.488	0.033	0.449	0.494	0.200	-0.214	0.803	Mo
0.123	0.909	0.238	0.181	0.096	0.809	-0.355	0.188	0.448	-0.155	-0.798	Ni
0.149	0.246	0.221	0.925	0.005	-0.083	0.023	0.982	0.141	0.918	-0.239	Cd
-0.037	-0.008	0.867	0.201	0.034	0.740	0.295	-0.102	0.702	0.143	0.082	Cu
0.054	0.297	0.888	0.258	0.954	0.051	-0.061	-0.057	-0.348	0.467	0.154	Sb
0.031	0.315	0.866	0.281	0.032	0.157	0.038	0.941	-0.128	0.930	0.300	Pb
0.634	-0.001	0.222	0.498	0.035	0.004	0.871	-0.108	-0.041	0.015	0.934	V
0.310	-0.811	-0.246	-0.288	-0.054	0.236	0.909	-0.036	0.78	0.055	0.940	Tl
0.000	0.197	0.211	0.928	-0.053	0.075	-0.008	0.935	0.165	0.935	-0.078	Zn
0.837	0.285	0.139	0.107	-0.046	0.860	0.416	0.141	0.896	-0.109	-0.114	Co

جدول ۶- وزن‌دهی به فلزات سنگین در هر خوشه بر اساس فاکتورهای محاسبه شده.

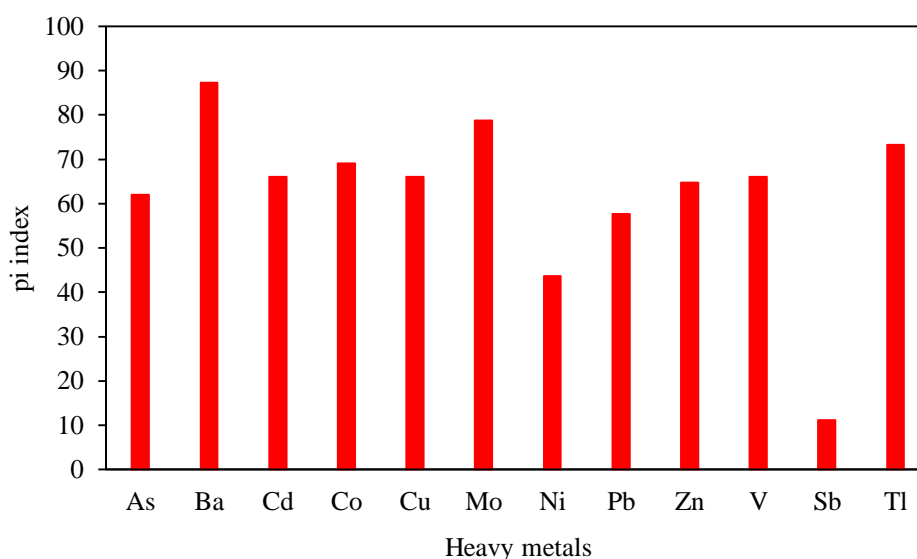
Table 6. Weighting of heavy metals in each cluster based on the calculated factors.

وزن Weight	مقدار بار نسبی Relative loading value	مقادیر بار Loading value	فلز سنگین Heavy metal	مقدار ویژه نسبی ^۱ Relative eigenvalue ¹⁴	فاکتورها Factors	خوشه Cluster
0.098	0.213	0.870	Ba			
0.091	0.197	0.803	Mo			
0.105	0.228	0.934	V	0.462	فاکتور اول 1 Factor	
0.105	0.229	0.940	Tl			
0.061	0.133	0.541	Sb			
0.083	0.222	0.788	As			خوشه اول
0.096	0.257	0.918	Cd	0.376	فاکتور دوم 2 Factor	First Cluster
0.098	0.262	0.930	Pb			
0.097	0.259	0.925	Zn			
0.055	0.244	0.702	Cu			
0.07	0.437	0.986	Co	0.162	فاکتور سوم 3 Factor	
0.035	0.219	0.448	Ni			
0.091	0.234	0.870	As			
0.103	0.264	0.982	Cd	0.392	فاکتور اول 1 Factor	
0.099	0.253	0.941	Pb			
0.097	0.249	0.935	Zn			
0.073	0.254	0.772	Ba			
0.082	0.287	0.871	V	0.289	فاکتور دوم 2 Factor	خوشه دوم
0.047	0.163	0.449	Mo			Second Cluster
0.085	0.296	0.909	Tl			
0.096	0.366	0.809	Ni			
0.063	0.308	0.740	Cu	0.206	فاکتور سوم 3 Factor	
0.073	0.365	0.860	Co			
0.113	1	0.954	Sb	0.113	فاکتور چهارم 4 Factor	
0.089	0.311	0.833	As			
0.099	0.344	0.925	Cd	0.289	فاکتور اول 1 Factor	
0.099	0.345	0.928	Zn			
0.085	0.331	0.867	Cu			
0.087	0.388	0.888	Sb	0.259	فاکتور دوم 2 Factor	خوشه سوم
0.085	0.331	0.866	Pb			Third Cluster
0.25	1	0.909	Ni	0.25	فاکتور سوم 3 Factor	
0.087	0.431	0.634	Co			
0.114	0.569	0.837	V	0.202	فاکتور چهارم 4 Factor	

1- Relative eigenvalue

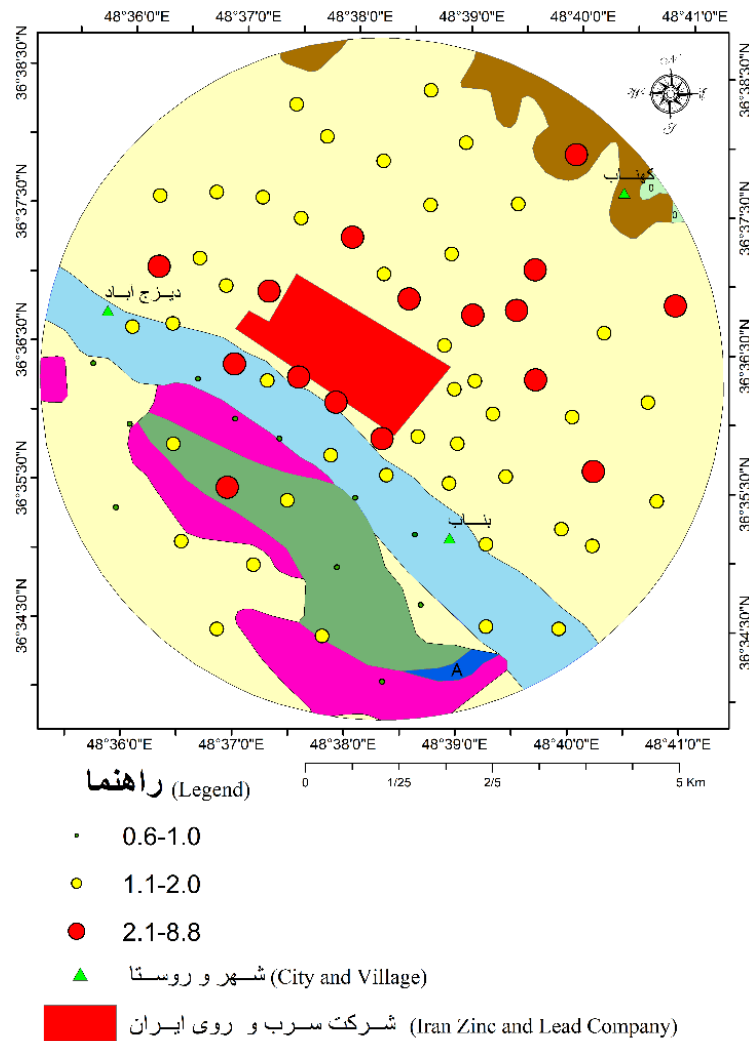
pi، عنصر آرسنیک دارای آلودگی بودند، اما کبالت، سرب، روی، وانادیم و آنتیموان فاقد آلودگی می باشند (۴۱). در ادامه با توجه به روابط ارائه شده برای شاخص وزنی بهبودیافته، این شاخص محاسبه شد. کمترین، بیشترین و میانگین شاخص وزنی بهبودیافته در محدوده مورد مطالعه به ترتیب، ۰/۵، ۸/۷ و ۱/۷ به دست آمده است. در پژوهش انجام گرفته توسط یانگ و همکاران (۲۰۲۱)، کمترین، بیشترین و میانگین شاخص وزنی بهبودیافته ۰/۵۵، ۴/۹۲ و ۱/۰۴ محاسبه شده است (۲۶). شکل ۶ تغییرات مکانی حاصل از شاخص وزنی بهبودیافته ارائه شده است.

در ادامه مقدار شاخص آلودگی pi با استفاده مقدار زمینه به دست آمده از میانگین هندسی برآورد شد. اعداد محاسبه شده بیش تر از ۱ در این شاخص نشان دهنده آن است که نمونه ها در اثر فعالیت های صنعتی آلوده شده اند (۴۴). درصد نمونه هایی که در مجموع کل نمونه ها، در نتیجه فعالیت های صنعتی آلوده شده اند، در شکل ۵ ارائه شده است. عناصر تالیم، مولیبدن و باریم بیشترین درصد نمونه هایی آلوده و بعد از آن ها کبالت، کادمیم، مس، روی، سرب و آرسنیک است. عنصری که کمترین آلودگی را نشان داد عنصر آنتیموان بود. در مطالعات انجام گرفته بر روی خاک های منطقه ششتمد، با استفاده از شاخص



شکل ۵- درصد نمونه هایی با مقدار شاخص pi بیش تر از ۱.

Figure 5. Percentage of samples with pi index value greater than 1.



شکل ۶- تغییرات مکانی شاخص وزنی بهبودیافته در محدوده مورد مطالعه.

Figure 6. Spatial changes of IWI index in the studied area.

سرب و روی بودند. کمترین و بیشترین مقدار شاخص نمره، ۰/۲ و ۲۱۲۸/۶ می‌باشند. ۶۲/۱ درصد از نمونه‌های حاصل از این منطقه بر اساس شاخص دارای آلودگی متوسط و شدید می‌باشند. بر اساس شاخص وزنی بهبودیافته، ۴/۲ درصد نمونه‌ها در آلودگی شدید، ۱۹/۹ درصد در آلودگی متوسط و سایر نمونه‌ها فاقد آلودگی و یا با آلودگی اندک بودند. بخش‌های شمال شرقی و نیز بخش‌های نزدیک به شرکت سرب و روی ایران، آلاینده‌های بیشتری از خود نشان می‌دهند.

ارزیابی آلودگی فلزات سنگین توسط سایر شاخص‌های زیست‌محیطی: بر اساس جدول‌های ۷ و ۸، مقدار میانگین شاخص بار آلودگی ۱/۳ به دست آمد. تأثیرگذارترین فلز سنگین در مقدار شاخص بار آلودگی، عناصر کادمیم و سرب بودند. کمترین و بیشترین مقدار شاخص بار آلودگی نیز ۰/۷ و ۸/۲ محاسبه شد. بر اساس این شاخص آلودگی ۸/۴ درصد نمونه‌ها آلودگی متوسط و شدید از خود نشان دادند. میانگین مقدار شاخص نمره ۴۶/۱ به دست آمد. مشابه شاخص بار آلودگی، تأثیرگذارترین فلزات سنگین در مقدار شاخص نمره، عناصر کادمیم و

آلاینده‌گی بالاتر نشان دادند. در حالی که با شاخص بار آلودگی این چنین نبوده و در هر دامنه از آلاینده‌گی همبستگی بین دو شاخص بالا است (۲۶). این مورد ناشی از این است که نتیجه ارائه شده توسط شاخص نمره با بیشترین مقدار شاخص منفرد به دست آمده و تخمین بالاتری از آلاینده‌گی در منطقه نشان می‌دهد.

بر همین اساس در مطالعه‌ای، جهت بررسی آلودگی فلزات سنگین در خاک دره کنیا از شاخص بار آلودگی در کنار شاخص وزنی بهبودیافته استفاده نمودند. در این مطالعه دامنه تغییرات شاخص وزنی بهبودیافته بین ۰/۵۷ و ۶/۰۴ متغیر بوده و ۲۲/۷ درصد از ایستگاه‌های مورد مطالعه دارای آلودگی شناسایی شد (۴۵).

از منظر شاخص نمره، نقاط آلوده با آلودگی بالا و بسیار بالا (۴۲/۲ درصد) بیش‌تر از نتایج حاصل از شاخص بار آلودگی (۲/۸ درصد) می‌باشند. در مجموع می‌توان در نظر گرفت که نتایج حاصل از شاخص بار آلودگی به نتایج حاصل از شاخص وزنی بهبودیافته نزدیک‌تر است. مقدار کم‌ترین، بیش‌ترین و میانگین شاخص وزنی بهبودیافته و شاخص بار آلودگی نزدیک‌تر از مقادیر حاصل از شاخص نمره می‌باشند.

مشابه نتایج حاصل از مطالعات انجام گرفته یانگ و همکاران (۲۰۲۱)، در نقاطی که میزان آلاینده‌گی کم‌تر است، شاخص وزنی بهبودیافته با شاخص نمره همبستگی بهتری را نسبت به مناطق دارای میزان

جدول ۷- نتایج شاخص‌های بار آلودگی، شاخص آلودگی نمره و شاخص وزنی بهبودیافته.

Table 7. Results of the PLI, PN and IWI.

IWI	PN	PLI	
0.5	0.2	0.7	کم‌ترین (Minimum)
8.7	2128.6	8.2	بیش‌ترین (Maximum)
1.7	46.1	1.3	میانگین (Average)

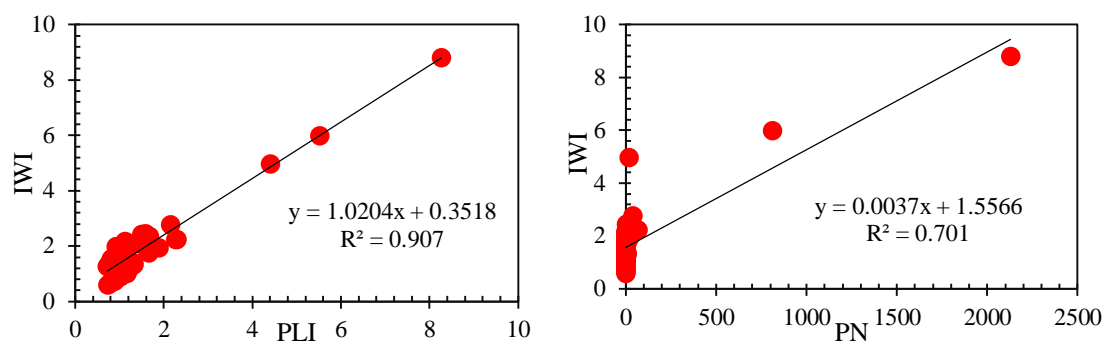
جدول ۸- دامنه آلاینده‌گی فلزات سنگین در منطقه بر اساس شاخص‌ها (بر حسب درصد).

Table 8. The range of heavy metal pollution in the region based on indicators (in percentage).

شدیداً آلوده Severely pollution	آلودگی متوسط Average pollution	آلودگی کم Low pollution	فاقد آلودگی Without pollution	
2.8	5.8	52.1	39.4	PLI
42.2	19.9	9.8	28.1	PN
4.2	19.9	63.3	12.6	IWI

همبستگی شاخص نمره با شاخص وزنی بهبودیافته ۰/۷۰۱ و همبستگی شاخص بار آلودگی با شاخص وزنی بهبودیافته ۰/۹۰۷ است.

بررسی همبستگی بین شاخص نمره و شاخص بار آلودگی با شاخص شاخص وزنی بهبودیافته، نشان از همبستگی قوی این شاخص‌ها دارد (شکل ۷).



شکل ۷- بررسی همبستگی شاخص وزنی بهبودیافته با شاخص‌های تجمیعی نمر و بار آلودگی.

Figure 7. The correlation of IWI index with aggregate indices of PN and PLI.

تالیوم، مولیبدن، مس، کبالت، نیکل و آنتیموان دارای منشأ زمین‌زاد هستند. مطالعات انجام گرفته توسط سایر پژوهش‌گران نیز نشان می‌دهد که مجتمع‌های فرآوری فلزات سنگین و مناطق صنعتی وابسته به این صنایع نقش اصلی در پراکنش فلزات سنگین در محیط دارند (۴۶ و ۴۷).

نتیجه‌گیری

در این مطالعه به ارزیابی غلظت فلزات سنگین در خاک اطراف مجتمع شرکت سرب و روی ایران، واقع در استان زنجان پرداخته شد. به این منظور از رویکردی نو و با استفاده از شاخص وزنی بهبودیافته و مقایسه آن با شاخص‌های تجمیعی بار آلودگی و نمر و جهت تحلیل آلودگی در خاک محدوده مورد مطالعه پرداخته شد. بر اساس نتایج شاخص وزنی بهبودیافته، شاخصی است که تنها تأثیر غلظت فلزات سنگین را نشان داده و مقدار قدرت آلاینده‌گی آن‌ها نمی‌سنجد، اما روابط بین فلزات سنگین در نقاط نمونه‌برداری شده را با در نظر گرفتن وزن تعیین‌شده در نظر می‌گیرد. بنابراین نسبت به دو شاخص دیگر نگاه کامل‌تری را به آلاینده‌گی نقاط نمونه‌برداری نشان می‌دهد. هم‌چنین با استفاده از این شاخص می‌توان منشأ فلزات سنگین را نیز در طول وزن‌دهی و با کمک

با توجه به این‌که وزن فلزات سنگین در مدل وابسته به ویژگی‌های آلاینده‌گی و ارتباط فلزات سنگین با هم در ایستگاه‌های نمونه‌برداری دارد، نتایج حاصل از تجزیه مؤلفه اصلی برای شناسایی منشأ فلزات سنگین مورد استفاده قرار می‌گیرد. به همین منظور خوشه دوم با ۵۲/۱ درصد از تعداد نمونه‌ها به‌عنوان مرجع شناسایی منشأ فلزات سنگین مورد استفاده قرار گرفت. بالا بودن مقدار بار روی، آرسنیک، کادمیم و سرب در فاکتور اول نشان‌دهنده‌ی یکی بودن منشأ این فلزات است. مقدار شاخص آلودگی (Pi بر اساس مقدار زمینه) در مجموع برای این فلزات بین ۲ و ۳ محاسبه شد، که بر اساس رده‌بندی در وضعیت متوسط آلودگی قرار داشتند. در فاکتور دوم باریم، تالیم، وانادیم و مولیبدن بیش‌ترین آلودگی را نشان دادند که مقدار شاخص آلودگی آن‌ها در مجموع بین ۱ و ۲ و در رده آلودگی کم قرار گرفتند. در فاکتور سوم نیز کبالت، مس و نیکل بیش‌ترین بار آلودگی را داشتند که شاخص آلودگی آن‌ها نیز مشابه فاکتور دوم بین ۱ و ۲ محاسبه شد. در فاکتور چهارم آنتیموان به‌تنهایی قرار گرفته و مقدار شاخص آن بین ۱ و ۲ است.

بر این اساس، فلزات سنگین سرب، روی، آرسنیک و کادمیم دارای منشأ انسان‌زاد باریم، وانادیم،

ملاحظات اخلاقی

نویسندگان تمام نکات اخلاقی شامل عدم سرقت ادبی، انتشار دوگانه، تحریف داده‌ها و ساده‌سازی را در این مقاله رعایت کرده‌اند. همچنین هر گونه تضاد منافع حقیقی یا مادی که ممکن است بر نتایج یا تفسیر مقاله تأثیر بگذارد را رد می‌کنند.

آنالیز تحلیل خوشه‌ای و تحلیل عاملی محاسبه نمود. بررسی هم‌زمان نتایج شاخص‌های آلودگی نشان داد که نتایج حاصل از شاخص بار آلودگی نسبت به شاخص نمره نزدیک‌تر به شاخص وزنی بهبودیافته است. همچنین بررسی همبستگی نشان‌دهنده همبستگی بالای شاخص بار آلودگی نسبت به شاخص نمره به شاخص وزنی بهبودیافته است.

منابع

1. Keshavarzi, A., Kumar, V., Ertunç, G., & Brevik, E. C. (2021). Ecological risk assessment and source apportionment of heavy metals contamination: An appraisal based on the Tellus soil survey. *Environmental Geochemistry and Health*, 43, 2121-2142. <https://doi.org/10.1007/s10653-020-00787-w>. [In Persian]
2. Zang, Z., Li, Y., Li, H., Guo, Z., & Zhang, R. (2020). Spatiotemporal variation and pollution assessment of Pb/Zn from smelting activities in China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17, 1968. <https://doi.org/10.3390/ijerph17061968>.
3. Chen, Y., Jiang, X., Wang, Y., & Zhuang, D. (2018). Spatial characteristics of heavy metal pollution and the potential ecological risk of a typical mining area: A case study in China. *Process Safety and Environmental Protection*, 113, 204-219. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2017.10.008>.
4. Saleem, M., Iqbal, J., Akhter, G., & Shah, M. H. (2018). Fractionation, bioavailability, contamination and environmental risk of heavy metals in the sediments from a freshwater reservoir, Pakistan. *Journal of Geochemical Exploration*, 184, 199-208. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2017.11.002>.
5. Eqani, S.A.M.A.S., Kanwal, A., Bhowmik, A. K., Sohail, M., Ullah, R., Ali, S. M., Alamdar, A., Ali, N., Fasola, M., & Shen, H. (2016). Spatial distribution of dust-bound trace elements in Pakistan and their implications for human exposure. *Environmental Pollution*, 213, 213-222. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.02.017>.
6. Wuana, R. A., & Okieimen, F. E. (2011). Heavy metals in contaminated soils: a review of sources, chemistry, risks and best available strategies for remediation. *International Scholarly Research Notices*, 201, 1-20. doi:10.5402/2011/402647.
7. Ayoubi, S., & Karami, M. (2019). Pedotransfer functions for predicting heavy metals in natural soils using magnetic measures and soil properties. *Journal of Geochemical Exploration*, 197, 212-219. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2018.12.006>. [In Persian]
8. Jia, X., Fu, T., Hu, B., Shi, Z., Zhou, L., & Zhu, Y. (2020). Identification of the potential risk areas for soil heavy metal pollution based on the source-sink theory. *Journal of Hazardous Materials*, 393, 122424. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122424>.
9. Yang, Y., Yang, X., He, M., & Christakos, G. (2020). Beyond mere pollution source identification: Determination of land covers emitting soil heavy metals by combining PCA/APCS, GeoDetector and GIS analysis. *Catena*, 185, 104-297. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104297>.
10. Tokatli, C., Uğurluoğlu, A., Köse, E., Çiçek, A., Arslan, N., Dayioğlu, H., & Emiroğlu, Ö. (2021). Ecological risk assessment of toxic metal contamination in a significant mining basin in Turkey. *Environmental Earth Sciences*, 80 (1), 1-19. <https://doi.org/10.1007/s12665-020-09333-4>.

11. Buch, A. C., Niemeyer, J. C., Marques, E. D., & Silva-Filho, E. V. (2021). Ecological risk assessment of trace metals in soils affected by mine tailings. *Journal of Hazardous Materials*, 403.p.123852. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123852>.
12. Olumayowa Oluwasola, H., Oluoye, O., Mohammad Bashir, S., Odewole, O. A., Onyeka Abugu, H., Akpomie, K. G., Kolade David, M., Inumidun Fagorite, V., & Aishatu Umar, M. (2021). Geochemical and health risk assessment of heavy metals concentration in soils around Oke-Ere mining area in Kogi State, Nigeria. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*. 1-16. <https://doi.org/10.1080/03067319.2020.1862817>.
13. Long, Z., Huang, Y., Zhang, W., Shi, Z., Yu, D., Chen, Y., Liu, C., & Wang, R. (2021). Effect of different industrial activities on soil heavy metal pollution, ecological risk, and health risk. *Environmental Monitoring and Assessment*, 193 (1), 1-12. <https://doi.org/10.1007/s10661-020-08807-z>.
14. Borůvka, L., Vacek, O., & Jehlička, J. (2005). Principal component analysis as a tool to indicate the origin of potentially toxic elements in soils. *Geoderma*, 128 (3-4), 289-300. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2005.04.010>.
15. Abdi, M., Karimpour, M. H., & Zarinkoob, M. H. (2014). The interpretation of factor analysis results of stream sediment geochemical data by utilization of geological, alteration and mineralization data in Kooh-Shah, Birjand, South Khorasan. *Scientific Quarterly Journal of Geosciences*, 23 (92), 23-38. <https://doi.org/10.22071/gsj.2014.43649>. [In Persian]
16. Abbaszadeh, F., Jalali, V., & Jafari, A. (2018). Investigating the source of some heavy metals using cluster and factor analysis techniques in soils of Hormoz Island. *Applied Soil Research*, 6 (1), 13-24. [In Persian]
17. Alfaifi, H., El-Sorogy, A. S., Qaysi, S., Kahal, A., Almadani, S., Alshehri, F., & Zaidi, F. K. (2021). Evaluation of heavy metal contamination and groundwater quality along the Red Sea coast, southern Saudi Arabia. *Marine Pollution Bulletin*, 163, 111975. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.111975>.
18. Nassiri, O., Rhoujjati, A., & EL Hachimi, M. L. (2021). Contamination, sources and environmental risk assessment of heavy metals in water, sediment and soil around an abandoned Pb mine site in North East Morocco. *Environmental Earth Sciences*, 80 (3), 1-20. <https://doi.org/10.1007/s12665-021-09387-y>.
19. Naimi, M. S., Ayoubi, S., & Khademi, H. (2013). Vertical and Horizontal Variability of lead and nicel in Zobhan industrial District, Isfahan, *Water and Soil*, 27 (2), 394-405. doi: 10.22067/jsw.v0i0.24366. [In Persian]
20. Nguyen, T. H., Hoang, H. N. T., Bien, N. Q., Tuyen, L. H., & Kim, K. W. (2020). Contamination of heavy metals in paddy soil in the vicinity of Nui Phao multi-metal mine, North Vietnam. *Environmental Geochemistry and Health*, 42 (12), 4141-4158. <https://doi.org/10.1007/s10653-020-00611-5>.
21. 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. <https://doi.org/10.3390/ijerph16224495>.
22. Qingjie, G., Jun, D., Yunchuan, X., Qingfei, W., & Liqiang, Y. (2008). Calculating pollution indices by heavy metals in ecological geochemistry assessment and a case study in parks of Beijing. *Journal of China University of Geosciences*, 19 (3), 230-241. [https://doi.org/10.1016/S10020705\(08\)60042-4](https://doi.org/10.1016/S10020705(08)60042-4).
23. Obiora, S. C., Chukwu, A., & Davies, T. C. (2016). Heavy metals and health risk assessment of arable soils and food crops around Pb-Zn mining localities in Enyigba, southeastern Nigeria. *Journal of African Earth Sciences*, 116, 182-189. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2015.12.025>.

24. Weissmannová, H. D., & Pavlovský, J. (2017). Indices of soil contamination by heavy metals—methodology of calculation for pollution assessment (minireview). *Environmental Monitoring and Assessment*, 189 (12), 1-25. <https://doi.org/10.1007/s10661-017-6340-5>.
25. Tian, K., Wu, Q., Liu, P., Hu, W., Huang, B., Shi, B., Zhou, Y., Kwon, B. O., Choi, K., Ryu, J., & Khim, J. S. (2020). Ecological risk assessment of heavy metals in sediments and water from the coastal areas of the Bohai Sea and the Yellow Sea. *Environment International*, 136, 105512. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105512>.
26. Yang, H., Wang, F., Yu, J., Huang, K., Zhang, H., & Fu, Z. (2021). An improved weighted index for the assessment of heavy metal pollution in soils in Zhejiang, China. *Environmental Research*, 192, 110246. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.110246>.
27. Klute, A. (1986). Water retention: laboratory methods. *Methods of soil analysis: part 1. Physical and Mineralogical methods*, Pp: 635-662.
28. Sheikhi, A. Z., Pirkharrati, H., & Mojarrad, M. (2020). Evaluation of Risk Potentials and Determination of Zn, Pb and Cd Source in Soil around Angouran Mineral Processing Complex. *Journal of Environmental Studies*, 46 (1), 173-19. DOI:10.22059/jes.2020.292719.1007949. [In Persian]
29. Naimi Marandi, S., Ayoubi, S., & Azimzadeh, B. (2013). Use of Multivariate Statistic and Geostatistic to differentiate the lithologic and antropogenic source of some heavy metals in Zobhan industrial district, Isfahan Province. *Journal of Water and Soil*, 27 (3), 560-569. DOI: 10.22067/jsw.v0i0.26084. [In Persian]
30. Kaiser, H. F. (1960). The application of electronic computers to factor analysis. *Educational and Psychological Measurement*, 20 (1), 141-151. <https://doi.org/10.1177/001316446002000116>.
31. Dalal, S. G., Shirodkar, P. V., Jagtap, T. G., Naik, B. G., & Rao, G. S. (2010). Evaluation of significant sources influencing the variation of water quality of Kandla creek, Gulf of Katchchh, using PCA. *Environmental Monitoring and Assessment*, 163 (1), 49-56. <https://doi.org/10.1007/s10661-009-0815-y>.
32. Sistani, N., Moein, M., Taleshi, M., Khorasani, N., Hamidiyan, A., & Azemi, R. (2016). Source identification of heavy metal pollution nearby Kerman steel industries. *Journal of Natural Environment*. 70 (3), 627-641. doi:10.22059/jne.2017.214386.1233. [In Persian]
33. Javidaneh, Z., Zarsevandi, A. R., & Rast Manesh, F. (2016). Determination of geo-environmental factors and source of heavy metals in street dust, Masjed-e-Soleiman City, Khuzestan Province. *Iranian Journal of Health and Environment*, 9 (2), 155-170. [In Persian]
34. Cabrera, F., Clemente, L., Barrientos, E. D., López, R., & Murillo, J. M. (1999). Heavy metal pollution of soils affected by the Guadiamar toxic flood. *Science of the Total Environment*, 242 (1-3), 117-129. [https://doi.org/10.1016/S00489697\(99\)00379-4](https://doi.org/10.1016/S00489697(99)00379-4).
35. Tian, L., Ge, B., & Li, Y. (2017). Impacts of state-led and bottom-up urbanization on land use change in the peri-urban areas of Shanghai: Planned growth or uncontrolled sprawl?. *Cities*, 60, 476-486. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2016.01.002>.
36. Stoecklin, E., & Eftakhar Neghad, E. (1969). Geology map from the 1:250000 map of Zanjan. No. D4, 61p.
37. Dabiri, R., Bakhshi Mazdeh, M., & Mollai, H. (2017). Heavy metal pollution and identification of their sources in soil over Sangan iron-mining region, NE Iran. *Journal of Mining and Environment*, 8 (2), 277-289. <https://doi.org/10.22044/jme.2016.820>. [In Persian]
38. Motamedi Rad, M., Goli Mokhtari, L., Bahrami, S., & Zanganeh Asadi, M. A. (2019). Assessment of the heavy-metal pollution in sediments of the Roein karstic basin. *Researches in Earth Sciences*. 21, 146-66. 10.29252/esrj.9.4.146. [In Persian]

39. Wang, Y. Q., Zhang, X. Y., Arimoto, R., Cao, J. J., & Shen, Z. X. (2005). Characteristics of carbonate content and carbon and oxygen isotopic composition of northern China soil and dust aerosol and its application to tracing dust sources. *Atmospheric Environment*, 39 (14), 2631-2642. [https:// doi.org/ 10.1016/ j.atmosenv.2005.01.015](https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2005.01.015).
40. Niencheski, L. F. H., Baraj, B., Franca, R. G., & Mirlean, N. (2002). Lithium as a normalizer for the assessment of anthropogenic metal contamination of sediments of the southern area of Patos Lagoon. *Aquatic Ecosystem Health and Management*, 5 (4), 473-483. [https:// doi.org/10.1080/14634980290001977](https://doi.org/10.1080/14634980290001977).
41. Salavati-Nik, S., Saadat, S., & Allameh, M. (2020). Environmental study of the distribution of heavy metals contamination in soils of Sheshtamad area (Northeastern Iran). *Journal of Water and Soil*, 34, 721-735. [10.22067/ jsw.v34i3.85308](https://doi.org/10.22067/jsw.v34i3.85308). [In Persian]
42. Erfanmanesh, M., & Afyuni, M. (2000). Environmental Pollution (water, soil and air). Isfahan, 330p. [In Persian]
43. Duru, C. E., Enyoh, C. E., Eneh, M. C., Duru, I. A., Ibe, F. C., Verla, A. W., & Isiuku, B. O. (2021). Assessment of Heavy Metals in Soils from Reclaimed Section of Nekede Mechanic Village, Owerri, Southeastern, Nigeria. *Chemistry Africa*, 4 (2), 429-441. [https:// doi.org/10.1007/s42250-020-00216-6](https://doi.org/10.1007/s42250-020-00216-6).
44. Parsafar, N., Marofi, S., Rahimi, G., & Marofi, H. (2015). Assessment of pollution index (PI) of Cd, Zn, Cu and Pb in the soil irrigated with municipal wastewater. *Water and Soil Science*, 25 (1), 1-12. [In Persian]
45. Githaiga, K. B., Njuguna, S. M., Gituru, R. W., & Yan, X. (2021). Water quality assessment, multivariate analysis and human health risks of heavy metals in eight major lakes in Kenya. *Journal of Environmental Management*, 297, 113410. [https://doi.org/10.1016/j.jenvman. 2021. 113410](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113410).
46. Ren, Z., Xiao, R., Zhang, Z., Lv, X., & Fei, X. (2019). Risk assessment and source identification of heavy metals in agricultural soil: a case study in the coastal city of Zhejiang Province, China. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 33 (11), 2109-2118. [https:// doi.org/ 10.1007/ s00477-019- 01741-8](https://doi.org/10.1007/s00477-019-01741-8).
47. Liu, H., Zhou, Y., Qin, S., Awasth, S.K., Liu, T., Liu, H., Zhang, Z., & Awasthi, M.K. (2021). Distribution of heavy metal resistant bacterial community succession in cow manure biochar amended sheep manure compost. *Bioresource Technology*, 335, 125282. [https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021. 125282](https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125282).
48. Tomlinson, D.L., Wilson, J.G., Harris, C.R., & Jeffrey, D.W. (1980). Problems in the assessment of heavy-metal levels in estuaries and the formation of a pollution index. *Helgoländermeeresuntersuchungen*, 33 (1), 566-575. [https://doi.org/ 10.1007/ BF02414780](https://doi.org/10.1007/BF02414780).
49. Azimzadeh, B., & Khademi, H. (2013). Estimation of background concentration of selected heavy metals for pollution assessment of surface soils of Mazandaran province, Iran. *Water and Soil*, 27 (3), 548-559. [DOI: 10.22067/ jsw.v0i0.26055](https://doi.org/10.22067/jsw.v0i0.26055). [In Persian]
50. Afshari, A., Khademi, H., & Hojjati, S. (2016). Assessment of heavy metals pollution risk in soils of central Zanjan province based on pollution indices. *Journal of Water and Soil Conservation*, 22 (6), 21-40. [DOI:20.1001.1. 23222069. 1394.22.6.2.4](https://doi.org/10.22067/jsw.v22i6.24). [In Persian]
51. Rahmani, H.R., & Khanmohamadi, Z. (2020). Effect of Sepahan Cement Factory on Heavy Metals Contamination in Soils of Dizicheh Area of Isfahan. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 51 (7), 1701-1709. [DOI: 10.22059/ ijswr. 2020.292969.668407](https://doi.org/10.22059/ijswr.2020.292969.668407). [In Persian]