

Evaluation of Potential Ecological Risk and Comprehensive Pollution Index of Heavy Metals around some Industrial units at Ardabil Plain

Ayda Abbasi-Kalo^{1*}

(Received: January 2024 Accepted: Juan 2024)

Abstract

Increasing the concentration of heavy metals in soil has adverse effects on ecosystem and causes serious damage to humans. Quantifying pollution can be helpful for soil management. In this study, the pollution of heavy metals has been studied and quantified in agricultural lands around some industrial units at Ardabil plain. For this, we selected 9 industrial units and prepared 46 soil samples (0 to 30 cm). Clay, sand and silt percentages, soil organic carbon content, pH and EC were measured. The heavy metals were extracted by digestion using HNO₃ and HCl and the concentration of Pb, Zn, Cu and Cd were measured by AAS. Pollution index (Pi), comprehensive pollution index (Pj), ecological risk (Er) and potential ecological risk (RI) were calculated. The average concentration of heavy metals varied from 0.724 mg/kg-1 of Cd to 120.58 mg/kg-1 of Cu. All regions had Pi greater than 2 and showed mild pollution except region 4 which had slight pollution. The pollution index of Cd had the highest value among all heavy metals. Pj had the lowest (1.268) and highest (3.636) mean values in regions 2 and 5, respectively. Region 2 had slight pollution class, regions 1, 6 and 7 had a mild class and regions 3, 4, 5, 8 and 9 had a moderate class. The ecological risk of Pb, Zn and Cu was lower than 3.0 in all regions and ErCd was between 120 and 240 for regions 3, 5, 8 and 9 increasing a serious pollution class and greater than 240 indicating a severe pollution class for other areas. All regions were in the serious pollution class according to the RI index. There is a significant difference between the concentration of Pb (sig. 5%) and Zn and Cu (sig.1%) in all regions. It shows differences between regions cannot be related to parent material and human activities have resulted in an increase in metal concentration.

Keywords: Cd, Cu, Pb, Potential Ecological Risk, Zn

Abbasi-Kalo, A. 2025. Evaluation of potential ecological risk and comprehensive pollution index of heavy metals around some industrial units at Ardabil plain. *Applied Soil Research*, 12(4):30-45.

1-Assistant professor, Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture and Natural resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.

Corresponding Author Email: abbasiayda2014@gmail.com

ارزیابی خطر اکولوژیکی پتانسیل و شاخص جامع آلودگی فلزات سنگین در اطراف برخی واحدهای صنعتی در دشت اردبیل

آیدا عباسی کلو^{۱*}

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۰/۱۳)

(تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۴/۱۱)

چکیده

بالا رفتن غلظت فلزات سنگین در خاک اثرات نامطلوبی بر اکوسیستم خاک گذاشته و آسیب‌های جدی به دنبال دارد. کمی‌سازی آلودگی می‌تواند به مدیریت بهتر خاک‌ها کمک نماید. در این مطالعه، آلودگی فلزات سنگین در اراضی زراعی اطراف برخی واحدهای صنعتی در دشت اردبیل مطالعه و کمی شد. بدین منظور ۹ واحد صنعتی انتخاب و ۴۶ نمونه خاک (صفر تا ۳۰ سانتی‌متر) تهیه شد. درصد رس، شن و سیلت، کربن آلی، pH و EC خاک اندازه‌گیری شد. غلظت فلزات سنگین شامل سرب، روی، مس و کادمیم با جذب اتمی اندازه‌گیری و شاخص آلودگی، شاخص جامع آلودگی، خطر اکولوژیکی و خطر اکولوژیکی پتانسیل محاسبه شد. میانگین غلظت فلزات سنگین از ۰/۷۲۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم کادمیم تا ۱۲۰/۵۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم مس متغیر بود. همه مناطق ۹ گانه به جز منطقه ۴ (با کلاس آلودگی خفیف)، شاخص آلودگی بیشتر از ۲ و کلاس آلودگی خفیف نشان دادند. شاخص آلودگی کادمیم در بین فلزات سنگین، بیشترین مقدار را داشت. شاخص جامع آلودگی کمترین (۱/۲۶۸) و بیشترین (۳/۶۳۶) میانگین را به ترتیب در مناطق ۲ و ۵ داشته و منطقه ۲ دارای آلودگی خفیف، مناطق ۱، ۶ و ۷ دارای آلودگی ملایم و مناطق ۳، ۴، ۵، ۸ و ۹ دارای آلودگی متوسط بودند. خطر اکولوژیکی سرب، روی و مس در همه مناطق کمتر از ۳/۰۰ و خطر اکولوژیکی کادمیم بین ۱۲۰ تا ۲۴۰ در مناطق ۳، ۵، ۸ و ۹ با کلاس آلودگی جدی و بیشتر از ۲۴۰ و کلاس آلودگی شدید در مناطق دیگر بود. بر اساس خطر اکولوژیکی پتانسیل، همه ۹ منطقه در کلاس آلودگی جدی قرار داشتند. بین میزان سرب ($p < 0.05$)، روی و مس ($p < 0.01$) در ۹ منطقه تفاوت معنی‌داری وجود داشت. این نشان می‌دهد که تفاوت غلظت فلزات در بین مناطق به مواد اولیه مربوط نبوده و فعالیت‌های انسانی در افزایش غلظت آنها نقش دارد.

واژه‌های کلیدی: خطر اکولوژیکی پتانسیل، روی، سرب، کادمیم، مس

عباسی کلو، آ. ۱۴۰۳. ارزیابی خطر اکولوژیکی پتانسیل و شاخص جامع آلودگی فلزات سنگین در اطراف برخی واحدهای صنعتی در دشت اردبیل. تحقیقات کاربردی خاک. جلد ۱۲، شماره ۴. صفحه: ۳۰-۴۵.

۱- استادیار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه محقق اردبیلی (مکاتبه کننده)

*پست الکترونیک: abbasiayda2014@gmail.com

مقدمه

خاک یک منبع مهم و حیاتی برای توسعه و رفاه اجتماعی و منبع تأمین کننده عناصر غذایی برای بقای گیاهان و جانوران می‌باشد (Kumar *et al.*, 2019). آلودگی عبارت است از تغییرات نامطلوب ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک به گونه‌ای که زندگی انسان و سایر موجودات گیاهی و جانوری، شرایط زندگی بشر روی کره زمین و منابع طبیعی با ارزش مثل خاک و آب را تحت تأثیر خود قرار دهد. فلزات سنگین از قبیل آرسنیک، کادمیم، کروم، سرب و جیوه به عنوان اجزای مهمی در خاک محسوب می‌شوند و در متابولیسم گیاهان نیز نقش مهمی بر عهده دارند (Yang *et al.*, 2018 و Sun *et al.*, 2018). این در حالی است که در اثر فعالیت‌های انسان مثل تغییرات محیط زیست طبیعی و یا معدنکاری، میزان برخی از این فلزات به طور خطرناکی به بالاتر از حد استاندارد افزایش می‌یابد (Stefanowicz *et al.*, 2020) که می‌تواند اثرات نامطلوب دائمی بر پایداری اکوسیستم خاک گذاشته و آسیب‌های جدی برای انسان به دنبال داشته باشد (Li *et al.*, 2020). بنابراین ارزیابی دقیق آلودگی فلزات سنگین در خاک و توزیع مکانی آنها توجه زیادی را به خود جلب کرده است. حضور مقادیر اندک فلزات سنگین در خاک‌ها امری طبیعی است زیرا در اثر فرآیندهای هوادیدگی و تشکیل خاک از سنگ‌ها آزاد می‌گردند. اما زمانی که مقادیر آنها از مقادیر طبیعی تجاوز کرده و به حد آلودگی برسد اهمیت زیست محیطی پیدا می‌کند. آلاینده‌های فلزات سنگین از طریق کودهای غیراستاندارد و کوددهی بیش از حد، بکارگیری کمپوست، افزایش فعالیت‌های صنعتی و شهرسازی و آبیاری با آب فاضلاب وارد خاک می‌شود (Baltas *et al.*, 2020). به همین دلیل افزایش غلظت فلزات سنگین در اکوسیستم‌های کشاورزی نگرانی فزاینده‌ای را به دنبال دارد (Keshavarzi & Kumar 2018).

در اکثر تحقیقات مربوط به میزان آلودگی فلزات سنگین، از شاخص‌های کمی استفاده می‌شود. شاخص‌های آلودگی ابزاری قدرتمند جهت بررسی آلودگی فلزات سنگین در خاک هستند. وو و همکاران (Wu *et al.*, 2018) در مطالعه خود بر روی خاک‌های فلات تبت، از شاخص‌های زمین

انباشت^۱ (Igeo)، فاکتور غنی‌شدگی^۲ (EF) و شاخص بار آلودگی^۳ (PLI) برای ارزیابی خطر آلودگی فلزات سنگین استفاده نموده‌اند. براساس نتایج این محققین فلزات سرب و کادمیم کلاس‌های آلودگی متوسطی را به وجود آورده‌اند.

عباسی کلو و همکاران (Abbasi-Kalo *et al.*, 2023) با بررسی میزان آلودگی خاک‌های زارعی آبیاری شده با آب فاضلاب خام در روستای بارزلیل مشگین شهر، از Igeo، فاکتور آلودگی^۴ (CF)، EF و PLI استفاده کردند و فلز کادمیم را به عنوان آلوده‌کننده‌ترین فلز سنگین معرفی نمودند.

بلالی و همکاران (Balali *et al.*, 2023) غلظت فلزات سنگین را با استفاده از شاخص‌های Igeo، PLI و خطر اکولوژیکی^۵ (Er) بررسی کردند و میزان غنی‌شدگی فلز کادمیم و سرب را بیشترین مقدار گزارش کردند.

یان و همکاران (Yan *et al.*, 2022) از شاخص‌های Pj (شاخص جامع آلودگی) و RI (شاخص خطر اکولوژیکی پتانسیل) برای بررسی میزان آلودگی فلزات سنگین استفاده کرده و دریافتند که در اراضی زراعی اطراف معدن زغال سنگ، جیوه و کادمیم جدی‌ترین خطرات آلودگی و فلزات نیکل، مس، سرب، کروم و روی پایین‌ترین میزان آلودگی را به دنبال داشتند.

جهانتاب و همکاران (Jahantab *et al.*, 2023) با مطالعه فلزات سنگین در اطراف کارخانه سیمان داراب، نتیجه‌گیری کردند که میزان کادمیم بالاتر از استاندارد جهانی بوده و خطر اکولوژیکی پتانسیل در همه نمونه‌ها کلاس خطر کم را نشان داد. همچنین کادمیم، نیکل و سرب درجه آلودگی متوسط و شاخص بار آلودگی مقادیر کمتر از ۱ را نشان دادند.

سبحان اردکانی و حسینی (Sobhan Ardakani & Hosseini, 2024) میزان آلودگی فلزات سنگین را در محیط‌های اطراف جاده‌های پرترافیک کرمان مطالعه نمودند. شاخص غنی‌شدگی حاصل از این مطالعه نشان داد که عناصر مس، منگنز و نیکل در ایستگاه‌های پرترافیک در اثر دخالت انسان افزایش یافته‌اند و خطر سرطان‌زایی کبالت و نیکل قابل توجه بوده است.

۴ - Contamination Factor

۵ - Ecological Risk

۱- Geo-accumulation Index

۲-Enrichment Factor

۳ - Pollution load Index

است. متوسط بارش و دمای سالانه آن به ترتیب ۳۵۲/۶ میلیمتر و ۸/۵ درجه سانتیگراد و پرباران‌ترین و کم‌باران‌ترین فصول سال به ترتیب بهار و تابستان می‌باشد. دشت اردبیل شیب ملایمی به سمت شمال داشته و از این رو آب‌های جاری منطقه توسط رود قره‌سو، به سمت شمال و رود ارس جریان می‌یابند. اردبیل در شمال غربی ایران واقع شده و دارای آب و هوای نیمه‌خشک می‌باشد. همانند سایر شهرهای بزرگ، کارخانه‌ها و کارگاه‌های متعددی در اطراف این شهر فعالیت دارند که هر کدام از آنها با توجه به نوع مواد اولیه مورد استفاده و محصولات تولیدی تأثیراتی را در زمین‌های زراعی اطراف خود به دنبال دارند.

برای بررسی تأثیر فعالیت واحدهای صنعتی بر آلودگی فلزات سنگین در دشت اردبیل، ۹ واحد از بین واحدهای صنعتی فعال در دشت تعیین شد. لایه‌ی واحدهای صنعتی، در محیط ArcMap تهیه و نمونه‌برداری در خاک‌های زراعی اطراف آنها انجام شد. نمونه‌برداری بر اساس روش سیستماتیک و با شناخت قبلی از منطقه انجام گرفت. تعداد نمونه‌ها در اطراف هر کدام از واحدهای صنعتی با توجه به وسعت اراضی تحت تأثیر هر واحد صنعتی متغیر بود (جدول ۱). محل نمونه‌ها بر روی لایه منطقه و با فاصله حدود ۵۰۰ متری نسبت به مرکز واحد صنعتی تعیین شد. موقعیت مکانی نقاط نمونه‌برداری در ArcMap استخراج و به سیستم موقعیت‌یاب جهانی (GPS) منتقل شد. در مجموع تعداد ۴۶ نمونه خاک سطحی (از اطراف واحدهای صنعتی، هر واحد حداقل ۳ تکرار) از عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متری تهیه شد. موقعیت منطقه مطالعاتی و نقاط نمونه‌برداری در شکل ۱ ارائه شده است.

امروزه فعالیت واحدهای صنعتی در اطراف شهرها به امری عادی تبدیل شده است. زیرا بیشتر این واحدها نیازهای روزمره مردم ساکن شهرها را تأمین می‌کنند. از طرف دیگر امکان انتقال آن‌ها به دوردست وجود ندارد زیرا در این صورت رفت و آمد نیروی کار و رساندن تولیدات به بازار مصرف با مشکل مواجه خواهد شد. لذا می‌توان گفت ورود آلاینده‌ها به خاک از طریق فعالیت واحدهای صنعتی اجتناب‌ناپذیر می‌نماید. معضلی که به آسانی قابل حل نبوده و در گذر زمان مشکلات جدی برای سلامت غذایی انسان به دنبال خواهد داشت. دشت اردبیل از جمله دشت‌های حاصلخیز ایران است که سالانه محصولات کشاورزی زیادی در آن تولید می‌شود. در این میان، واحدهای صنعتی زیادی نیز در این دشت فعالیت می‌کنند که محدوده وسیعی از صنایع از جمله تصفیه خانه فاضلاب شهری، مجتمع کشتارگاه، تولید لاستیک و پلاستیک و... را در بر می‌گیرد. در اثر فعالیت این واحدها، ورود فاضلاب آنها به اراضی اطراف، تأثیر فعالیت خودروها در اطراف آنها، دود حاصل از این کارخانه‌جات و ... می‌تواند باعث آلودگی در خاک‌های اطراف و در نهایت به خطر افتادن سلامت و کیفیت محصولات تولید شده شود. به همین جهت مطالعه حاضر به عنوان گامی نخست در بررسی میزان آلودگی واحدهای صنعتی فعال در دشت اردبیل تلاش می‌کند میزان آلودگی آنها را با استفاده از شاخص‌های آلودگی به صورت کمی نشان دهد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

دشت اردبیل، دشتی هموار و حاصلخیز است که در مرکز استان و در میان کوه‌های سبلان، بزقوش و تالش قرار گرفته

جدول ۱- موقعیت جغرافیایی واحدهای صنعتی و محل نمونه‌های خاک

Table 1. Location of industrial units and soil sample positions

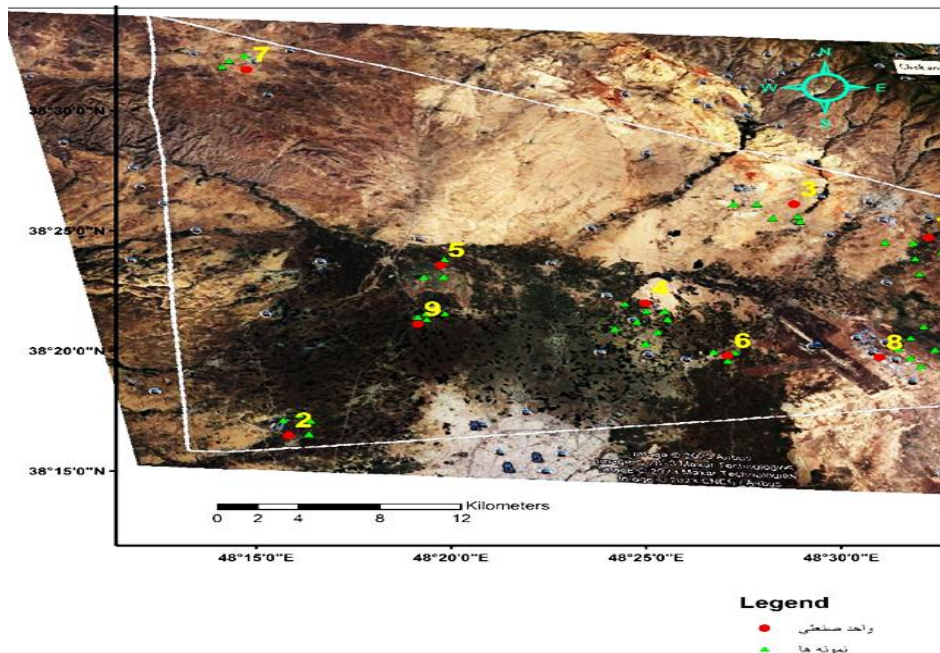
| Industrial unit* | Region 1 | Region 2 | Region 3 | Region 4 | Region 5 | Region 6 | Region 7 | Region 8 | Region 9 |
|------------------|--------------------------------|------------------------------------|-----------------------------|----------------------------------|---------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|---------------------------------|------------------------------|
| position | The lands around the Artiplast | The lands around the Artavill Tire | The lands around the cement | The lands around the city sewage | The lands around the meat | The lands around the soda factory | The lands around the combined | The lands around the Industrial | The lands around the poultry |

* ۱- کارخانه آرتاپلاست، ۲- کارخانه آرتاویل تایر، ۳- کارخانه سیمان، ۴- کارخانه تصفیه فاضلاب، ۵- مجتمع گوشت، ۶- کارخانه نوشابه سازی، ۷- نیروگاه سیکل ترکیبی، ۸- شهرک صنعتی ۱ و ۹- کشتارگاه طیور.

مطالعات آزمایشگاهی

جهت اندازه‌گیری غلظت فلزات سنگین خاک، عصاره‌گیری نمونه‌های خاک با استفاده از HNO_3 و HCl (نسبت ۱:۳) اسید نیتریک (۶۳ درصد) به اسید کلریدریک (۳۷ درصد) با روش آکوارجیا) هضم شدند (Chen & Ma, 2001). غلظت فلزات سنگین سرب (Pb)، روی (Zn)، مس (Cu) و کادمیم (Cd) در عصاره حاصل با دستگاه جذب اتمی مدل شیماتزو ۶۳۰۰ اندازه‌گیری شد.

نمونه‌های سطحی تهیه شده از اطراف واحدهای صنعتی، برای انجام تجزیه‌های فیزیکی و شیمیایی به آزمایشگاه منتقل و پس از هوا خشک شدن، از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شدند. بافت خاک شامل درصد سه ذره رس، شن و سیلت به روش هیدرومتر (Gee & Bauder, 1980)، میزان ماده آلی خاک (Nelson & Sommers, 1996)، پ هاش و میزان هدایت الکتریکی خاک (EC) در عصاره یک به یک اندازه‌گیری شد.



شکل ۱- موقعیت منطقه مطالعاتی و واحدهای صنعتی انتخابی (شماره‌ها در جدول ۱ شرح داده شده‌اند)
Figure 1. Position of the study area and selected industrial units (Numbers are explained in table 1).

می‌توان بیان کرد که فلز مورد نظر نسبت به زمینه چند برابر شده است. شاخص P_i از رابطه ۱ محاسبه می‌شود:

$$P_i = \frac{C_{metal}}{C_{background}} \quad (1)$$

ارزیابی آلودگی خاک با فلزات سنگین
شاخص آلودگی^۱ (P_i)

این شاخص برای ارزیابی سطح آلودگی ایجاد شده توسط هر فلز مورد استفاده قرار می‌گیرد. با استفاده از این شاخص

^۱ - Pollution index

شاخص خطر اکولوژیکی پتانسیل (PEHI) (RI) و پارامترهای آن از رابطه‌های (۳ تا ۵) محاسبه شده است:

$$RI = \sum_{i=1}^n E_r^i \quad (3)$$

$$E_r^i = T_r^i \cdot C_f^i \quad (4)$$

$$C_f^i = \frac{C_i}{C_n^i} \quad (5)$$

در این روابط RI خطر اکولوژیکی پتانسیل آلاینده‌های مورد بررسی، E_r^i خطر اکولوژیکی آلاینده نام، T_r^i میزان سمیت فلز آلاینده (ضریب پاسخ سمیت فلز سنگین)، C_f^i ضریب آلاینده نام، C_i غلظت آلاینده نام و C_n^i غلظت مرجع آلاینده نام می‌باشد. ضریب پاسخ سمیت سرب و مس ۵، روی ۱ و کادمیم ۳۰ در نظر گرفته شده است (Yan et al., 2022) مقادیر مرجع آلاینده در جدول ۲ آورده شده است.

در پایان اراضی واحدهای صنعتی برحسب مقادیر شاخص‌های Pi و Pj (جدول ۳)، شاخص خطر اکولوژیکی (Er) و شاخص خطر اکولوژیکی پتانسیل (RI) (جدول ۴) در کلاس‌های آلودگی کم تا آلودگی شدید قرار گرفتند.

جدول ۳- کلاس‌بندی شاخص آلودگی (Pi) و فاکتور جامع آلودگی (Pj) (Yan et al., 2022)

Table 3. Criteria of pollution index (Pi), and comprehensive pollution index (Pj) (Yan et al., 2022)

| Pollution level | Pj Values | Pollution level | P Values |
|--------------------|--------------------|--------------------|------------------|
| Clean | $P_j \leq 0.7$ | Clean | $P_i \leq 1$ |
| Slight Pollution | $0.7 < P_j \leq 1$ | Slight Pollution | $1 < P_i \leq 2$ |
| Mild Pollution | $1 < P_j \leq 2$ | Mild Pollution | $2 < P_i \leq 3$ |
| Moderate Pollution | $2 < P_j \leq 3$ | Moderate Pollution | $3 < P_i \leq 5$ |
| Severe Pollution | $P_j > 3$ | Severe Pollution | $P_i \geq 5$ |

جدول ۴- کلاس‌بندی خطر اکولوژیکی (Er) و خطر اکولوژیکی پتانسیل (RI) (Yan et al., 2022)

Table 4. Criteria of Ecological risk (Er) and Potential Ecological risk index (RI) (Yan et al., 2022)

| Pollution level | RI | Pollution degree | Er |
|-----------------|---------------------|------------------|---------------------|
| low | $110 < RI$ | Low | $30 < Er$ |
| Moderate | $220 < RI \leq 110$ | Mild | $60 < Er \leq 30$ |
| Serious | $440 < RI \leq 220$ | Moderate | $120 < Er \leq 60$ |
| Severe | $440 \geq RI$ | Serious | $240 < Er \leq 120$ |
| | | Severe | $240 \geq Er$ |

۲ - Potential Ecological Hazard Index

که در آن Pi فاکتور آلودگی هر فلز، C_{metal} غلظت فلز آلاینده و $C_{background}$ غلظت زمینه‌ای هر فلز است. در این مطالعه، میانگین مقادیر مرجع مربوط به سنگ‌های بازالت و گرانیت به عنوان غلظت زمینه استفاده شد (جدول ۲). جدول ۳ تقسیم‌بندی کلاس‌های مختلف Pi را نشان می‌دهد.

جدول ۲- مقادیر مرجع قاره‌ای فلزات سنگین مورد مطالعه (Taylor, 1964)

Table 2. Continental reference values of studied heavy metals (Taylor, 1964)

| Cd | Cu | Zn | pb | Concentration (mgkg ⁻¹) |
|-----|-----|-----|-------|-------------------------------------|
| 0.2 | 55 | 70 | 12.50 | Mean |
| 0.2 | 100 | 100 | 5 | Basalt |
| 0.2 | 10 | 40 | 20 | Granit |

شاخص جامع آلودگی (CPI)^۱

این فاکتور عوامل مختلفی را که باعث آلودگی خاک می‌شوند دخالت می‌دهد و با میانگین‌گیری، بر اثر کاهش وزن داده‌ها غلبه می‌کند. شاخص جامع آلودگی اثر مجموع فلزات بر محیط را اندازه می‌گیرد و طبق رابطه ۲ محاسبه می‌گردد:

$$P_j = \sqrt{\frac{(P_i)^2 + [\max(P_{ij})]^2}{2}} \quad (2)$$

که در آن i فلز سنگین، j مکان نمونه، Pj شاخص جامع آلودگی (CPI) تمام فلزات سنگین در مکان j و P_{ij} میانگین شاخص آلودگی تمام فلزات در محل نمونه j و $\max P_{ij}$ بزرگترین شاخص آلودگی در بین تمام فلزات در محل نمونه j می‌باشد. تقسیم‌بندی این شاخص در ۵ کلاس قرار می‌گیرند (جدول ۳). همانطور که ذکر شد این شاخص به جای کمک گرفتن از یک عنصر، میزان آلودگی تمام فلزات را در یک نقطه بررسی می‌کند.

شاخص خطر اکولوژیکی پتانسیل (PEHI)^۲

این شاخص برای ارزیابی آلودگی، مقدار هر فلز را با میزان سمیت آن ترکیب می‌کند. خطر اکولوژیکی تک فلز (Er) و

۱ - Comprehensive Pollution Index

در منطقه ۳ تغییر می‌کند که شرایط قلیایی متوسط را نشان می‌دهد. در شرایط قلیایی جذب اغلب عناصر غذایی توسط گیاه دچار اختلال می‌شود. تنها در منطقه ۳ حداکثر مقدار این پارامتر بالای ۹ ثبت شده است که نیازمند توجه بیشتر می‌باشد. میانگین پارامتر هدایت الکتریکی (EC) در همه مناطق مورد مطالعه کمتر از ۲ دسی‌زیمنس بر متر می‌باشد که نشان‌دهنده غیرشور بودن خاک‌های مورد مطالعه می‌باشد.

غلظت فلزات سنگین مطالعه شده

آماره‌های توصیفی غلظت فلزات سنگین سرب، روی، مس و کادمیم در جدول ۷ آورده شده است. در میان فلزات سنگین مطالعه شده، مس (Cu) با مقدار ۱۴۴/۸۰ میلی‌گرم در کیلوگرم بیشترین و کادمیم (Cd) با ۰/۳۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم کمترین غلظت را دارد. میانگین غلظت فلزات نیز از مقدار ۰/۷۲۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم کادمیم (Cd) تا ۱۲۰/۵۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم مس تغییر می‌کند. جدول ۸ غلظت فلزات سنگین به تفکیک ۹ منطقه مطالعه شده را نشان می‌دهد.

سرب (Pb) کمترین مقدار (۱۳/۹۰ میلی‌گرم در کیلوگرم) را در منطقه ۱ و بیشترین مقدار (۳۳/۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم) و بیشترین میانگین (۲۹/۸۶۷ میلی‌گرم در کیلوگرم) را در منطقه ۳ دارد. همچنین کمترین میانگین Pb معادل ۱۹/۳۳۳ میلی‌گرم در کیلوگرم و در منطقه ۶ مشاهده شد. قابل ذکر است که هر سه پارامتر آماری مقادیری بیشتر از مقدار مرجع قاره‌ای فلز Pb (معادل ۱۲/۵ میلی‌گرم در کیلوگرم، جدول ۲) دارا می‌باشند که نشان‌دهنده انباشتگی این عنصر بر اثر فعالیت‌های انسانی می‌باشد (Zhang et al., 2018). مطابق مقادیر قاره‌ای Pb، حد تجمع این فلز ۷۵ میلی‌گرم در کیلوگرم می‌باشد که مقادیر اندازه‌گیری شده در منطقه مطالعاتی کمتر از این حد بوده و از نظر این فلز تجمعی در منطقه مشاهده نمی‌شود.

در این مطالعه برای انجام آنالیزهای آماری از نرم افزار SPSS17 و اکسل ۲۰۱۶ و برای تهیه نقشه‌ها و تحلیل‌های مکانی از ArcMAP10.2 و Google Earth استفاده شد.

نتایج و بحث

ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک در منطقه مورد مطالعه

جدول ۵ آماره‌های توصیفی ویژگی‌های خاک‌های مورد بررسی را نشان می‌دهد. کمترین میزان درصد رس، سیلت و شن به ترتیب ۹/۴۴، ۴/۳۷ و ۱۴/۵۰ درصد و بیشترین مقدار این سه ذره نیز به ترتیب ۷۰/۲۰، ۴۴/۰۰ و ۸۲/۹۱ درصد می‌باشد. این موضوع نشان می‌دهد که تنوع زیادی در بافت خاک‌های مورد مطالعه وجود دارد. کمترین و بیشترین مقدار ماده آلی خاک به ترتیب ۰/۰۸ و ۵/۳۴ درصد می‌باشد. این تغییر در میزان ماده آلی می‌تواند به نوع مدیریت و کاربری اراضی مربوط باشد. pH خاک‌های مورد مطالعه با میانگین ۸/۱۲۲ در محدوده قلیایی متوسط قرار دارد و میانگین هدایت الکتریکی خاک ($0/882 \text{ dSm}^{-1}$) نیز نشان‌دهنده غیرشور بودن خاک‌های مورد مطالعه می‌باشد.

رس کمترین مقدار خود را در منطقه ۸ و بیشترین مقدارش را در منطقه ۲ کسب کرده است (جدول ۶). میانگین این ذره در منطقه ۵ کمترین مقدار (۱۵/۳۴۲ درصد) و در منطقه ۴ بیشترین مقدار (۴۷/۳۶۵ درصد) می‌باشد. ذره سیلت نیز کمترین و بیشترین مقدارش را به ترتیب در منطقه ۱ و ۵ دارد. کمترین مقدار میانگین سیلت برابر ۶/۱۱۷ و بیشترین مقدار این آماره برابر ۳۷/۷۲۸ درصد می‌باشد که به ترتیب در منطقه ۷ و ۵ اندازه‌گیری شده است. کمترین و بیشترین میانگین درصد شن در منطقه ۴ و ۷ مشاهده شد. از نظر درصد ماده آلی خاک سه منطقه ۵، ۷ و ۹ میانگین بالای ۲ درصد ماده آلی داشته و بقیه ۶ منطقه میانگین ماده آلی زیر ۲ درصد دارند که نیاز به مصرف کود برای تأمین نیاز نیتروژن را در این خاک‌ها آشکار می‌سازد.

pH خاک در مناطق ۹ گانه مورد بررسی نشان می‌دهد که میانگین این پارامتر از مقدار ۷/۷۷۷ در منطقه ۶ تا ۸/۳۷۵

جدول ۵- آماره‌های توصیفی ویژگی‌های خاک‌های مورد مطالعه

Table 5. Descriptive statistics of the characteristics of the studied soils

| Parameter | Clay% | Silt% | Sand% | OM% | pH | EC (dS m ⁻¹) |
|-----------|--------|--------|--------|-------|-------|--------------------------|
| Maximum | 70.20 | 44.00 | 82.91 | 5.34 | 9.43 | 5.40 |
| Minimum | 9.44 | 4.37 | 14.50 | 0.08 | 7.45 | 0.10 |
| Mean | 25.83 | 24.785 | 49.384 | 1.759 | 8.122 | 0.882 |
| St. D | 16.499 | 10.636 | 18.528 | 1.291 | 0.424 | 1.013 |

جدول ۶- آماره‌های توصیفی ویژگی‌های خاک به تفکیک مناطق ۹ گانه مورد مطالعه

Table 6. Descriptive statistics of soils at 9 studied regions

| | Parameter | Clay% | Silt% | Sand% | OM% | pH | EC (dS m ⁻¹) |
|----------|-----------|--------|--------|--------|-------|-------|--------------------------|
| Region 1 | Mean | 16.435 | 28.510 | 55.056 | 1.454 | 7.860 | 0.599 |
| | Minimum | 9.74 | 4.37 | 46.92 | 0.08 | 7.45 | 0.10 |
| | Maximum | 22.57 | 36.23 | 75.49 | 2.10 | 8.15 | 1.68 |
| Region 2 | Mean | 39.472 | 18.218 | 42.310 | 1.787 | 8.342 | 0.937 |
| | Minimum | 14.71 | 10.02 | 19.78 | 0.49 | 8.04 | 0.18 |
| | Maximum | 70.20 | 25.06 | 62.62 | 3.62 | 8.74 | 2.20 |
| Region 3 | Mean | 18.913 | 23.177 | 57.911 | 1.052 | 8.375 | 0.755 |
| | Minimum | 12.60 | 4.49 | 46.52 | 0.18 | 7.85 | 0.23 |
| | Maximum | 23.67 | 38.56 | 82.91 | 1.70 | 9.43 | 2.22 |
| Region 4 | Mean | 47.365 | 23.344 | 29.291 | 2.700 | 8.299 | 1.024 |
| | Minimum | 33.66 | 15.96 | 14.50 | 0.93 | 7.78 | 0.32 |
| | Maximum | 69.54 | 33.18 | 43.90 | 5.34 | 8.82 | 3.00 |
| Region 5 | Mean | 15.342 | 37.728 | 46.930 | 1.557 | 7.900 | 1.671 |
| | Minimum | 14.98 | 32.76 | 41.02 | 0.37 | 7.55 | 1.41 |
| | Maximum | 15.93 | 44.00 | 51.31 | 3.55 | 8.23 | 1.97 |
| Region 6 | Mean | 17.352 | 28.679 | 53.969 | 1.030 | 7.777 | 0.100 |
| | Minimum | 15.21 | 27.20 | 52.62 | 0.25 | 7.51 | 0.10 |
| | Maximum | 19.82 | 31.28 | 55.78 | 1.60 | 7.92 | 0.10 |
| Region 7 | Mean | 19.381 | 6.117 | 74.502 | 2.047 | 8.080 | 0.322 |
| | Minimum | 14.89 | 4.37 | 69.64 | 1.77 | 7.95 | 0.25 |
| | Maximum | 25.91 | 9.53 | 80.74 | 2.24 | 8.17 | 0.36 |
| Region 8 | Mean | 24.290 | 25.360 | 50.349 | 1.533 | 8.149 | 1.189 |
| | Minimum | 9.44 | 7.28 | 15.18 | 0.25 | 7.68 | 0.15 |
| | Maximum | 49.74 | 42.40 | 82.67 | 2.98 | 9.32 | 5.40 |
| Region 9 | Mean | 16.021 | 32.009 | 51.970 | 3.115 | 7.990 | 0.969 |
| | Minimum | 12.47 | 25.76 | 43.06 | 1.60 | 7.94 | 0.10 |
| | Maximum | 20.48 | 36.47 | 59.12 | 4.63 | 8.06 | 2.43 |

میلی گرم در کیلوگرم می‌باشد و فعالیت انسانی تأثیری در آن نداشته است.

Cu در منطقه ۴ با ۸۷/۰۰ میلی گرم در کیلوگرم کمترین مقدار و در منطقه ۲ با ۱۴۳/۶۰ میلی گرم در کیلوگرم بیشترین مقدار را به خود اختصاص داده است. حداقل مقدار Cu بیش از مقدار مرجع قاره‌ای آن (۵۵ میلی گرم در کیلوگرم) می‌باشد که نشان‌دهنده انباشتگی آن در اثر فعالیت‌های انسان می‌باشد. بیشترین میانگین این عنصر در منطقه ۲ (۱۳۴/۷۷۵ میلی گرم در کیلوگرم) و کمترین میانگین آن (۱۰۵/۷۸۲ میلی گرم در کیلوگرم) نیز در منطقه ۴ مشاهده شد (جدول ۸).

در مورد Cd کمترین مقدار ۰/۳ میلی گرم در کیلوگرم در منطقه ۲ و بیشترین مقدار آن با ۱/۲۰ میلی گرم در

جدول ۷- آماره‌های توصیفی غلظت فلزات سنگین اندازه‌گیری شده

Table 7. Descriptive statistics of the heavy metals

| Element | Mean | Min | Max | St. D |
|---------|--------------------|--------|--------|-------|
| | mgKg ⁻¹ | | | |
| Pb | 13.90 | 33.00 | 25.72 | 4.84 |
| Zn | 39.10 | 94.20 | 63.23 | 12.40 |
| Cu | 87.00 | 144.80 | 120.58 | 14.91 |
| Cd | 0.30 | 1.20 | 0.724 | 0.18 |

کمترین و بیشترین مقدار Zn به ترتیب در منطقه ۱ (۳۹/۱۰) میلی گرم در کیلوگرم و منطقه ۸ (۹۴/۲۰) میلی گرم در کیلوگرم) با بالاترین میانگین ۷۹/۶۰ میلی گرم در کیلوگرم در منطقه ۸ مشاهده شد (جدول ۸). کمترین میانگین Zn نیز برابر ۴۸/۶۰ میلی گرم در کیلوگرم در منطقه ۲ مشاهده گردید که با توجه به مقادیر مرجع قاره‌ای فلزات سنگین (جدول ۲)، مقادیر اندازه‌گیری شده این فلز کمتر از ۷۰

همه این مقادیر بیشتر از مقدار قاره‌ای این عنصر (۰/۲ میلی‌گرم در کیلوگرم) بوده و بیانگر نقش انسان در افزایش Cd خاک می‌باشد (Zhang *et al.*, 2018).

کیلوگرم در منطقه ۳ اندازه‌گیری شده است. میانگین این عنصر نیز کمترین و بیشترین مقدار خود را به ترتیب در منطقه ۲ (۰/۵۵) میلی‌گرم در کیلوگرم) و در منطقه ۳ و ۵ (۰/۸۳۳ میلی‌گرم در کیلوگرم) داشته است (جدول ۸) که

جدول ۸- آماره‌های توصیفی غلظت فلزات سنگین در منطقه به تفکیک منطقه

Table 8. Descriptive statistics of the heavy metals at 9 regions.

| Industrial unit | Parameter | Pb | Zn | Cu | Cd |
|--------------------|-----------|--------|--------|---------|-------|
| mgKg ⁻¹ | | | | | |
| Region 1 | Mean | 26.029 | 60.443 | 130.471 | 0.600 |
| | Minimum | 13.90 | 39.10 | 117.10 | 0.50 |
| | Maximum | 31.10 | 67.30 | 138.60 | 0.80 |
| Region 2 | Mean | 20.525 | 48.075 | 134.775 | 0.550 |
| | Minimum | 15.50 | 39.70 | 124.40 | 0.30 |
| | Maximum | 32.00 | 67.00 | 143.60 | 1.00 |
| Region 3 | Mean | 29.867 | 62.700 | 120.650 | 0.833 |
| | Minimum | 25.00 | 53.80 | 95.60 | 0.60 |
| | Maximum | 33.00 | 66.70 | 141.00 | 1.20 |
| Region 4 | Mean | 27.462 | 54.462 | 105.762 | 0.750 |
| | Minimum | 24.00 | 51.20 | 87.00 | 0.60 |
| | Maximum | 30.00 | 57.30 | 132.10 | 1.00 |
| Region 5 | Mean | 27.433 | 60.967 | 127.633 | 0.833 |
| | Minimum | 21.00 | 56.20 | 116.80 | 0.60 |
| | Maximum | 32.00 | 69.40 | 144.80 | 1.00 |
| Region 6 | Mean | 19.333 | 63.667 | 130.467 | 0.667 |
| | Minimum | 17.00 | 54.90 | 124.80 | 0.50 |
| | Maximum | 22.00 | 68.30 | 136.90 | 0.80 |
| Region 7 | Mean | 22.000 | 66.933 | 120.333 | 0.633 |
| | Minimum | 19.00 | 56.90 | 110.50 | 0.60 |
| | Maximum | 24.00 | 86.50 | 129.50 | 0.70 |
| Region 8 | Mean | 26.233 | 79.600 | 114.578 | 0.789 |
| | Minimum | 20.00 | 59.40 | 92.10 | 0.60 |
| | Maximum | 30.50 | 94.20 | 131.30 | 1.00 |
| Region 9 | Mean | 25.833 | 63.400 | 119.333 | 0.800 |
| | Minimum | 24.50 | 61.00 | 117.40 | 0.70 |
| | Maximum | 27.00 | 65.30 | 123.10 | 1.00 |

مقادیر میانگین Pi در مناطق ۹ گانه مورد مطالعه در جدول ۱۰ آورده شده است. میانگین Pi فلز سرب در منطقه ۲ کمترین و در منطقه ۳ بیشترین مقدار را دارد و بین ۱/۲۸۰ تا ۲/۴۶۳ قرار می‌گیرد. مطابق جدول ۳ کلاس آلودگی ایجاد شده توسط این فلز سنگین جزئی تا خفیف می‌باشد که در شکل ۲ (a) نشان داده شده است. سه منطقه ۲، ۶ و ۷ کاملاً در کلاس آلودگی جزئی و سه منطقه ۱، ۳ و ۵ کاملاً در کلاس آلودگی خفیف قرار گرفته

ارزیابی آلودگی خاک با فلزات سنگین شاخص آلودگی (Pi)

آماره‌های توصیفی شاخص آلودگی (Pi) چهار فلز Zn، Pb، Cu و Cd در جدول ۹ آورده شده است. کمترین مقدار این شاخص (۰/۵۵۹) به روی (Zn) و بیشترین مقدار (۶/۰۰۰) آن به کادمیم (Cd) اختصاص دارد. بیشترین و کمترین مقدار میانگین این شاخص نیز توسط این دو فلز به دست آمد. طبق جدول ۳ مقادیر شاخص آلودگی بالاتر از ۱ باعث ایجاد آلودگی توسط این فلز می‌شود.

اند. سه منطقه ۴، ۸ و ۹ هر دو کلاس آلودگی جزئی و خفیف را دارد. شاخص Pi فلز روی ($piZn$) کمترین مقدار (۰/۵۸۷) را در منطقه ۲ و بیشترین مقدار (۱/۱۸۰) را در منطقه ۸ نشان می‌دهد (جدول ۱۰) که مطابق جدول ۳ تنها منطقه ۸ با Pi بیشتر از یک کلاس آلودگی جزئی داشته و بقیه مناطق بدون آلودگی بوده‌اند. شکل ۲(b) نیز این توزیع را نشان می‌دهد.

شاخص Pi فلز مس ($piCu$) بین ۱/۸۴۰ در منطقه ۴ تا ۲/۴۶۴ در منطقه ۶ تغییر می‌کند (جدول ۱۰). بعبارت دیگر، به جز منطقه ۴ (با کلاس آلودگی جزئی)، بقیه مناطق مقادیر Pi بیشتر از ۲ داشته و کلاس آلودگی خفیف را نشان می‌دهند. همانطور که در شکل ۲(c) نیز نشان داده شده است در منطقه ۴ همه تکرارها و در منطقه ۸ فقط ۳ تکرار کلاس آلودگی جزئی را ایجاد کرده‌اند (مطابق جدول ۳) و در مناطق دیگر همه تکرارها در کلاس آلودگی خفیف قرار گرفته‌اند.

جدول ۹- آماره‌های توصیفی شاخص آلودگی (Pi) و شاخص جامع آلودگی (Pj)Table 9. Descriptive statistics of Pollution index (Pi) and Comprehensive pollution index (Pj)

| Pollution index | Mean | Minimum | Maximum | St. d |
|-----------------|-------|---------|---------|-------|
| $piPb$ | 2.058 | 1.112 | 2.640 | 0.387 |
| $piZn$ | 0.90 | 0.559 | 1.346 | 0.177 |
| $piCu$ | 2.192 | 1.582 | 2.633 | 0.271 |
| $piCd$ | 3.620 | 1.447 | 6.000 | 0.902 |
| Pj | 2.999 | 1.447 | 4.631 | 0.638 |

مقادیر شاخص Pi فلز کادمیم ($piCd$) (جدول ۱۰) در بین چهار فلز مطالعه شده بیشترین مقادیر را دارد. کمترین مقدار این شاخص با مقدار ۲/۲۵۰ در منطقه ۲ و بیشترین مقدار آن ۴/۵۰۰ و در منطقه ۵ مشاهده شده است. دو منطقه ۲ و ۶ در کلاس آلودگی خفیف و بقیه مناطق در کلاس آلودگی متوسط قرار گرفته‌اند. شکل ۲(d) نمونه‌های متعلق به کلاس‌های مختلف آلودگی را در مناطق ۹ گانه نشان می‌دهد. مقادیر Pi بیشتر از ۵ در برخی از تکرارهای

مناطق ۳، ۴، ۵ و ۸ مشاهده شده است. نتایج Pi در این تحقیق با مطالعه افشاری (Afshari *et al.*, 2015) مطابقت دارد که اغلب فلزات سنگین مورد مطالعه آنها کلاس‌های آلودگی جزئی و خفیف را به وجود آورده است. در مطالعه چن و همکاران (Cheng *et al.*, 2023) مقدار Pi فلزات کادمیم، سرب و مس نسبت به سایر فلزات بالاتر بود که نتایج مطالعه حاضر را تأیید می‌کند.

جدول ۱۰- مقادیر میانگین شاخص آلودگی (Pi) و شاخص جامع آلودگی (Pj) به تفکیک مناطق ۹ گانهTable 10. The mean values of pollution index (Pi) and Comprehensive pollution index (Pj) At 9 Regions

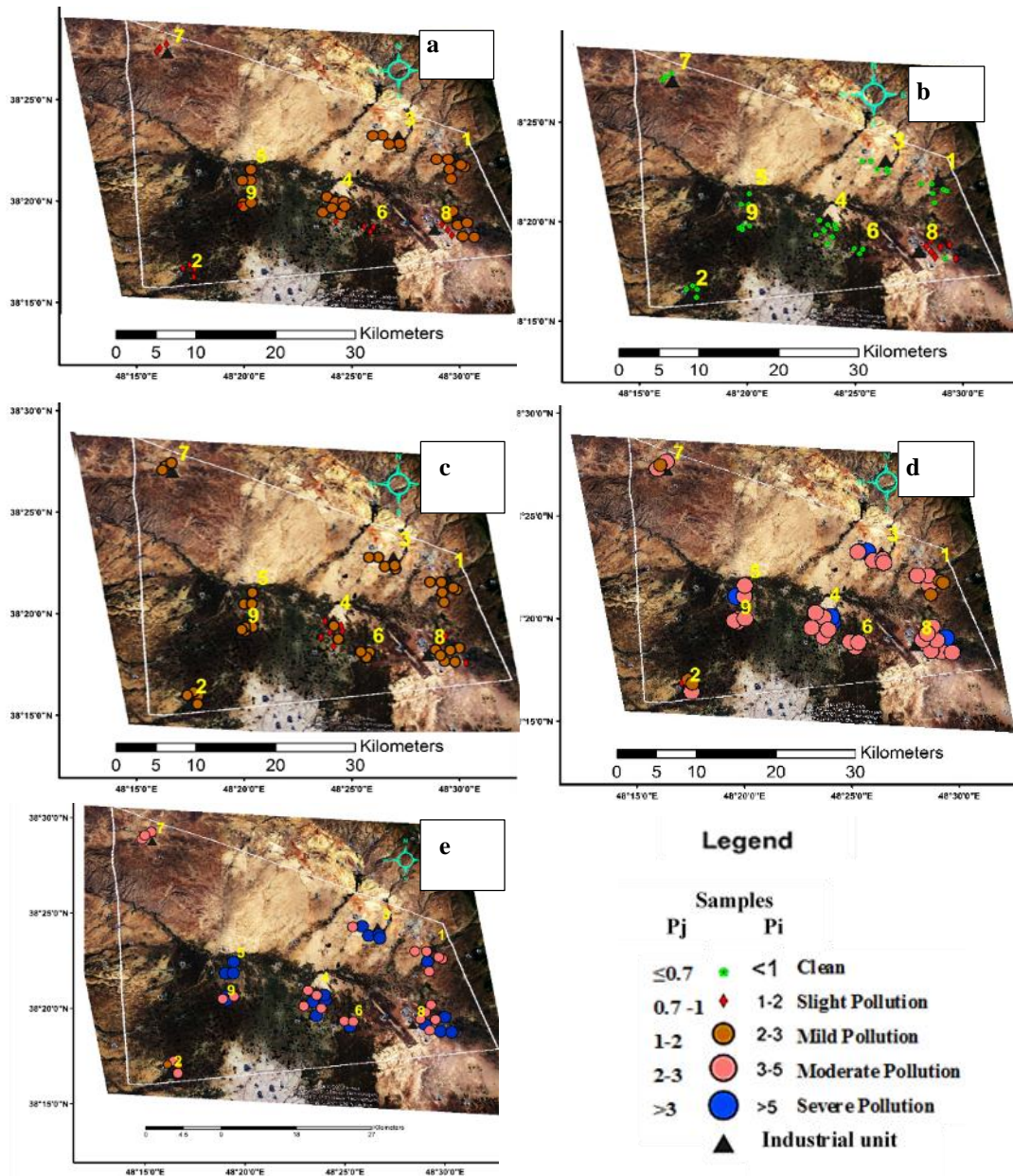
| Region | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $piPb$ | 2.244 | 1.280 | 2.463 | 2.160 | 2.400 | 1.520 | 1.840 | 2.032 | 2.080 |
| $piZn$ | 0.914 | 0.587 | 0.927 | 0.777 | 0.799 | 0.978 | 0.806 | 1.180 | 0.891 |
| $piCu$ | 2.412 | 2.365 | 2.316 | 1.840 | 2.224 | 2.464 | 2.189 | 2.100 | 2.178 |
| $piCd$ | 3.000 | 2.250 | 4.000 | 4.000 | 4.500 | 2.500 | 3.000 | 3.833 | 4.000 |
| Pj | 2.610 | 1.268 | 3.315 | 3.232 | 3.636 | 2.894 | 2.253 | 3.159 | 3.260 |

شاخص جامع آلودگی (شاخص جامع آلودگی (Pj) میزان آلاینده‌گی همه فلزات مطالعه شده را در یک نقطه نشان می‌دهد. این شاخص از ۱/۴۴۷ تا ۴/۶۳۱ تغییر می‌کند و میانگین آن ۲/۹۹۹ می‌باشد (جدول ۹). بررسی توزیع این شاخص در مناطق مورد مطالعه ۹ گانه (جدول ۱۰) نشان می‌دهد که Pj کمترین مقدار میانگین (۱/۲۶۸) را در منطقه ۲ و بیشترین مقدار میانگین (۳/۶۳۶) را در منطقه ۵ دارد. مطابق (جدول ۳) تنها منطقه ۲ کلاس آلودگی خفیف داشته و مناطق ۱، ۶ و ۷ کلاس آلودگی متوسط و مناطق ۳، ۴، ۵، ۸ و ۹ کلاس آلودگی شدید را به دنبال داشته‌اند. شکل ۲(e) توزیع مقادیر Pj را در تکرارهای مناطق ۹ گانه نشان

می‌دهد. مقادیر Pi بیشتر از ۵ در برخی از تکرارهای

Pj ۲ تا ۳ یا بیشتر از ۳ بوده‌اند که مطابق جدول ۳ کلاس‌های خفیف تا شدید را به دنبال دارد.

می‌دهد. همانطور که نشان داده شده است در دو منطقه ۲ مقادیر Pj بین ۱ تا ۲ و در بقیه مناطق همه تکرارها مقادیر



شکل ۲- کلاس‌های مختلف شاخص آلودگی (Pi) و شاخص جامع آلودگی (Pj) به تفکیک مناطق ۹ گانه a: Pi Pb, b: Pi Zn, c: Pi Cu, d: Pi Cd و e: PJ in repetitions of each unit

Figure 2. Different classes of pollution index and Comprehensive pollution index separated by 9 industrial units (a: Pi Pb, b: Pi Zn, c: Pi Cu, d: Pi Cd and e: PJ in repetitions of each unit)

۰/۶۲ تا ۱/۴۸، خطر اکولوژیکی فلز روی (ErZn) از ۰/۶۲ تا ۱/۴۸، خطر اکولوژیکی فلز مس (ErCu) از ۱۸/۱۳ تا ۳۰/۱۷ و خطر اکولوژیکی فلز کادمیم (ErCd) از ۱۰۷/۱۴ تا ۴۲۸/۵۷ تغییر می‌کند. تفاوت قابل توجهی بین Er سرب، روی و مس با Er کادمیم وجود دارد. این اختلاف حداقل ۶ برابر و حداکثر ۱۴ برابر می‌باشد که نشان دهنده خطر

شاخص خطر اکولوژیکی فلزات سنگین (Er) میزان خطر انفرادی فلزات بر محیط زیست با شاخص خطر اکولوژیکی تک فلز (Er) و خطر مجموع فلزات با خطر اکولوژیکی پتانسیل (RI) بیان می‌شود. پارامترهای آماری خطر اکولوژیکی چهار آلاینده در جدول ۱۱ نشان داده شده است. خطر اکولوژیکی فلز سرب (ErPb) از ۲/۶۹ تا

کلاس آلودگی جدی (جدول ۴) و ۵ منطقه دیگر با مقدار Er بیشتر از ۲۴۰ در کلاس آلودگی شدید قرار دارند. شکل ۳ (a تا e) توزیع نمونه‌های متعلق به هر کدام از کلاس‌های آلودگی را براساس شاخص Er نشان می‌دهد. Er سرب، روی و مس در هر کدام از مناطق ۹ گانه در همه تکرارها به طور یکدست در کلاس آلودگی کم و Er کادمیم به طور یکدست در همه تکرارها در کلاس آلودگی جدی قرار گرفته است.

اکولوژیکی خیلی بالای کادمیم می‌باشد. براساس تحقیقات سعیدی و همکاران (Saeedi *et al.*, 2009)، میزان بالای کادمیم در خاک می‌تواند به دلیل فعالیت‌های صنعتی و تردد وسایل نقلیه ایجاد شده باشد.

جدول ۱۲ مقادیر خطر اکولوژیکی هریک از فلزات سنگین مطالعه شده در مناطق ۹ گانه را نشان می‌دهد. همه مناطق از نظر سرب، روی و مس، با Er کوچکتر از ۳۰، دارای خطر اکولوژیکی کم می‌باشند. اما از نظر کادمیم، چهار منطقه ۳، ۵، ۸ و ۹ با مقدار Er بین ۱۲۰ تا ۲۴۰ در

جدول ۱۱- پارامترهای آماری خطر اکولوژیکی تک فلز (Er) و خطر اکولوژیکی پتانسیل (RI)

Table 11. Descriptive statistics of Ecological risk index (Er) and Potential Ecological risk Index (RI)

| Ecological risk | Mean | Minimum | Maximum | St. D |
|-----------------|--------|---------|---------|--------|
| ErPb | 4.98 | 2.69 | 6.40 | 0.94 |
| ErZn | 0.996 | 0.62 | 1.48 | 0.195 |
| ErCu | 25.12 | 18.13 | 30.17 | 3.11 |
| ErCd | 258.54 | 107.14 | 428.57 | 64.41 |
| RI | 289.64 | 136.69 | 454.18 | 63.847 |

جدول ۱۲-مقادیر میانگین شاخص خطر اکولوژیکی (Er) و شاخص خطر اکولوژیکی پتانسیل (RI) در مناطق ۹ گانه

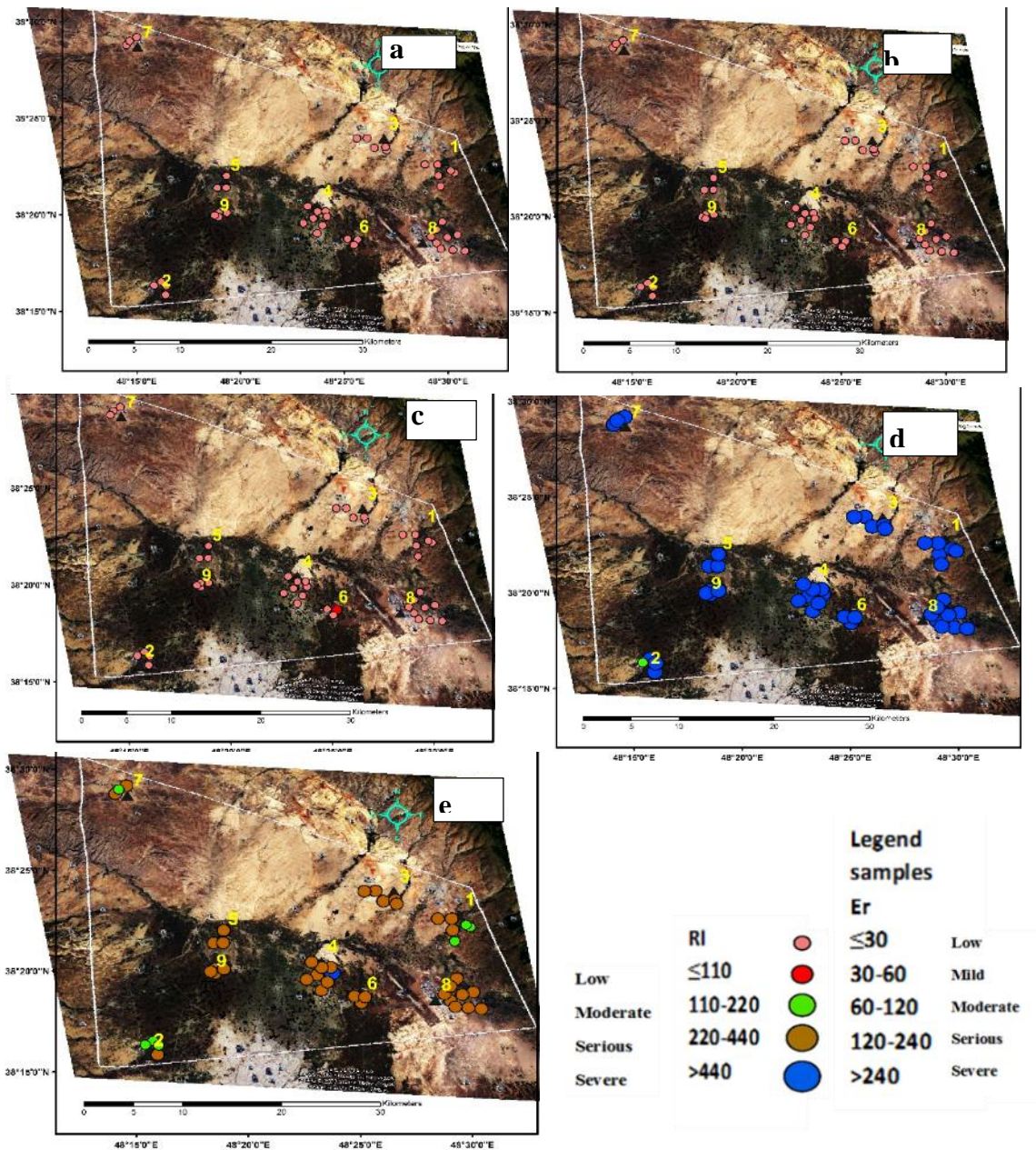
Table 12. The mean values of Ecological risk Index (Er) and Potential Ecological risk Index (RI) at 9 regions

| Region | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| ErPb | 5.078 | 5.577 | 4.167 | 4.796 | 5.556 | 5.103 | 5.730 | 4.666 | 5.480 |
| ErZn | 1.098 | 1.266 | 1.109 | 0.956 | 0.848 | 0.840 | 1.034 | 0.851 | 1.001 |
| ErCu | 24.396 | 22.458 | 25.906 | 25.247 | 22.201 | 20.632 | 26.056 | 27.403 | 27.172 |
| ErCd | 303.57 | 258.929 | 232.143 | 294.643 | 226.190 | 321.429 | 273.810 | 210.317 | 232.143 |
| RI | 334.152 | 288.229 | 263.325 | 325.645 | 254.795 | 348.004 | 306.630 | 243.238 | 265.796 |

۸ تا ۳۴۸/۰۰۴ در منطقه ۶ متغیر است. مطابق جدول ۴ (کلاس‌های مختلف آلودگی براساس شاخص RI)، تمام مناطق ۹ گانه در کلاس آلودگی جدی قرار دارند (میانگین شاخص بین ۲۲۰ تا ۴۴۰). شکل ۳ (e) توزیع نمونه‌های متعلق به هر کدام از کلاس‌های آلودگی ایجاد شده توسط شاخص RI را نشان می‌دهد که به جز در سه منطقه ۱، ۲ و ۷ که برخی از تکرارها کلاس آلودگی متوسط داشته‌اند بقیه نمونه‌ها در کلاس آلودگی جدی قرار گرفته‌اند.

شاخص خطر اکولوژیکی پتانسیل (RI)

شاخص خطر اکولوژیکی پتانسیل، خطر زیست محیطی حاصل از مجموع فلزات سنگین در یک نقطه را نشان می‌دهد. RI از حداقل ۱۳۶/۶۹ تا حداکثر ۴۵۴/۱۸ تغییر کرده و میانگین ۲۸۹/۶۴ را کسب کرده است (جدول ۱۱). شاخص خطر اکولوژیکی پتانسیل (RI) برای هر کدام از فلزات در مناطق ۹ گانه در جدول ۱۲ نشان داده شده است. مقدار میانگین این شاخص از ۲۴۳/۲۳۸ در منطقه



شکل ۳- کلاس‌های مختلف شاخص خطر اکولوژیکی (Er) و شاخص خطر اکولوژیکی پتانسیل (RI) به تفکیک مناطق ۹ گانه مطالعه شده ((a: Er Pb, b: Er Zn, c: Er Cu, d: Er Cd و e: RI در تکرارهای مختلف هر کدام از مناطق)
 Figure 3. Different classes of Ecological Risk index and Potential Ecological Risk index separated by 9 industrial units (a: Er Pb, b: Er Zn, c: Er Cu, d: Er Cd and e: RI in repetitions of each region)

۹ گانه دارد. تغییرات میانگین غلظت چهار فلز به صورت زیر است: $Cu > Zn > Pb > Cd$. این تغییر را می‌توان ناشی از اختلاف این عناصر در مواد مادری خاک‌ها نیز دانست زیرا Cu و Zn بیشتر از Pb و Cd در ساختمان کانی‌ها وجود دارد (Song *et al.*, 2021). با این وجود، براساس مقادیر قاره‌ای این فلزات (جدول ۲، Taylor, 1964)، انتظار می‌رود که غلظت روی در خاک بیش از مس باشد. برهم خوردن این

بحث و نتیجه‌گیری

این پژوهش با هدف بررسی میزان آلاینده‌ی واحدهای صنعتی فعال در دشت اردبیل و کمی‌سازی آلودگی برخی فلزات سنگین با استفاده از شاخص‌های آلودگی می‌باشد که چهار شاخص P_j ، P_i ، Er و RI بکار گرفته شد. بررسی میانگین غلظت فلزات Pb، Zn، Cu و Cd نشان داد که بیشترین و کمترین مقدار میانگین را در مناطق

شاخص‌ها) می‌تواند تفاوت در آلاینده‌گی را بازگو نماید. تفاوت غلظت Cd در مناطق ۹ گانه معنی‌دار نمی‌باشد (جدول ۱۴) در حالی که تفاوت شاخص Pi این فلز در سطح اطمینان ۹۹ درصد معنی‌دار می‌باشد. این نشان می‌دهد که شاخص Pi در مقایسه با غلظت، توانسته است تفاوت‌ها را بهتر نشان دهد. این روند در مورد Pb نیز صدق می‌کند که غلظت Pb در سطح ۵ درصد و شاخص Pi آن در سطح ۱ درصد معنی‌دار می‌باشد. شاخص Cu و Zn همانند غلظت این دو فلز در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار می‌باشند. تفاوت میانگین شاخص Pj نیز همانند شاخص Pi در همه مناطق مطالعاتی در سطح یک درصد معنی‌دار می‌باشد (جدول ۱۳).

مقایسه میانگین شاخص خطر اکولوژیک (Er) فلزات سنگین در مناطق ۹ گانه (جدول ۱۳) نشان می‌دهد خطر اکولوژیک Pb در مناطق مختلف یکسان است (عدم وجود اختلاف معنی‌دار در مناطق)، در حالی که Er فلزات Zn و Cu دارای اختلاف معنی‌دار در سطح ۱ درصد و Cd در سطح ۵ درصد می‌باشد. مقایسه دو شاخص Pj و RI نیز این نتیجه را به دنبال دارد که شاخص Pj حساسیت بیشتری نسبت به شاخص RI دارد زیرا اولی در سطح ۱ درصد و دومی در سطح ۵ درصد معنی‌دار شده است.

روند در اطراف واحدهای صنعتی مطالعه شده می‌تواند دلیلی بر دخالت انسان در افزایش غلظت و به عبارت دیگر تجمع آنها در خاک باشد.

جدول ۱۴ نشان می‌دهد که بین میزان سرب مناطق ۹ گانه در سطح ۵ درصد و میزان روی و مس در سطح ۱ درصد اختلاف معنی‌دار وجود دارد. وجود تفاوت معنی‌دار بدین معناست که اختلاف بین مناطق ناشی از ماده مادری نبوده و حاکی از نقش انسان در افزایش غلظت این فلزات می‌باشد (Dong *et al.*, 2030). اختلاف بین میزان کادمیم مناطق مختلف مطالعه شده معنی‌دار نیست. تغییر میانگین غلظت هر کدام از فلزات در مناطق ۹ گانه از روند یکسان برخوردار نبوده و به صورت زیر متغیر می‌باشد:

Pb: 3>4>5>8>1>9>7>2>6

Zn: 8>7>3>6>9>5>1>4>2

Cu: 2>1>5>>63>7>9>8>4

Cd: 3=5>9>8>4>6>7>1>2

در ارزیابی آلودگی فلزات سنگین شاخص‌های متعددی مورد استفاده قرار می‌گیرد زیرا مقادیر مطلق غلظت فلزات نمی‌تواند اثر آلاینده‌گی آنها را نشان دهد که دلیل آن را می‌توان به تفاوت در مقادیر قاره‌ای (Taylor, 1964) و اثر سمیت متفاوت آنها نسبت داد. Pi شاخص آلودگی هر کدام از فلزات را نشان می‌دهد و نسبت به مقادیر قاره‌ای استاندارد شده است لذا تفاوت در شاخص Pi (و سایر

جدول ۱۳-مقایسه میانگین غلظت فلزات سنگین، شاخص‌های Pi، Pj، Er و RI در مناطق ۹ گانه

Table 13. ANOVA for metal concentration, Pi, Pj, Er and RI indices at 9 regions

| Sources of variation | Mean Square values | | | | | | | | | | | | | | |
|----------------------|--------------------|---------------|----------|----------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|----------|----------|
| | df | Concentration | | | | Pi | | | | Pj | Er | | | | RI |
| | | Pb | Zn | Cu | Cd | Pb | Zn | Cu | Cd | | Pb | Zn | Cu | Cd | |
| Regions | 8 | 51.40* | 507.33** | 502.37** | ns0.054 | 0.65** | 0.16** | 0.25** | 2.04** | 1.07** | 0.29 ns | 0.097** | 23.46** | 8274.45* | 7850.27* |
| Error | 37 | 17.39 | 77.42 | 161.64 | 0.028 | 0.04 | 0.003 | 0.04 | 0.55 | 0.26 | 0.79 | 0.025 | 6.66 | 3256.76 | 3260.74 |

سپاس‌گزاری

از اداره کل محیط زیست استان اردبیل که در مرحله نمونه‌برداری با محقق همکاری نمودند سپاس‌گزاری می‌گردد.

Reference

- Abbasi-Kalo A., Karimi Barzili S., Oustan Sh., and Shahab Arkhazlo H. (2023). Pollution indices of heavy metals in agricultural soils irrigated with raw sewage (Meshginshahr, Ardabil). *Water and Soil Management Modeling*, 3(4), 286-306 (In Persian)
- Afshari A., Khademi H., and Delavar MA. 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)
- Balali A. H., Gholami S., Javanmardi M.R., and Valipour, A. 2023. Assessment of heavy metal pollution in the soil of a construction and demolition waste landfill. *Environmental Nanotechnology, Monitoring and Management*, 20.100856.
- Baltas H., Sirin M., Gökbayrak E., and Ozcelik A.E. 2020. A case study on pollution and a human health risk assessment of heavy metals in agricultural soils around Sinop province, Turkey. *Chemosphere*, 241: 1-41.
- Chen M., and 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.
- Cheng B., Wang Z., Yan X., Yu Y., Liu L., Yi G., Zhang H., and 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.
- Dong Q., Wen H., Wang P, Song C., Lai S., Yang Z., Zhao Y., and Yan M. 2023. Health risk assessment of heavy metals in soils and crops in a mining area (Au-Ag-Cu-trona-oil et al.) of the Nanyang Basin, Henan Province, China. *China Geology*, 4 (6): 567–579.
- Gee G.W., and Bauder J.W. 1980. Particle-size analysis. In: Klutem A. (Ed), *Methods of soil analysis, part 1, physical and mineralogical methods*, Second edition, Agronomy, Soil Scienety of America, Madison, Wisconsin, USA.
- Jahantab E., Mahmoodi A., and Bustani, H. 2023. Investigation of Contamination of Some Heavy Metals in the Soils around the Darab Cement Factory, Fars Province. *Applied Soil Research*, 11 (3): 98-109. (In Persian)
- Keshavarzi A., and Kumar V. 2019. Ecological risk assessment and source apportionment of heavy metal contamination in agricultural soils of Northeastern Iran. *International Journal of Environmental Health Research*, 29: 544–560.
- Kumar V., Sharma A., Kaur P., Singh Sidhu G.P., Bali A.S., Bhardwaj R., Thukral A.K., and Cerda, A. 2019. Pollution assessment of heavy metals in soils of India and ecological risk assessment: A state-of-the-art. *Chemosphere*, 216: 449–462.
- Li X.Y., Ning S.Q., Zhang P., and Yang W.L. 2020. Environmental pollution and health risks of heavy metals in the soil around a construction waste landfill. *International Journal of Design and Nature and Ecodynamics*, 15(3):393-399.
- Nelson D.W., and Sommers L.E. 1996. Total Carbon, Organic Carbon, and Organic Matter. Sparks D.L. (Ed.), *Methods of Soil Analysis—Part 3. Chemical Methods—SSSA Book Series No. 5*. Soil Science Society of America and American Society of Agronomy, Madison, pp. 961-1010.
- Saeedi M., Hosseinzadeh M., Jamshidi A., and Pajooeshfar, S.P. 2009. Assessment of heavy metals contamination and leaching characteristics in highway side soils, Iran. *Environmental Monitoring and Assessment*, 151: 231–241.
- Sobhan Ardakani S., and Hesseini N. 2024. Investigating the Contamination Level and Health Risk of Potentially Toxic Elements in Surface Soil of the Roadside Environment. *Applied Soil Research*, 11(4): 112-125.(In Persian)
- Song F., Ge H.G., Zhao H, Liu Z., Si J., and Tang, B. 2021. Pollution risk assessment of heavy metals in the sediments of upstream Hanjiang River, China. *Earth Science Informatics*, 14: 655–668.
- Stefanowicz A.M., Kapusta P., Zubek S., Stanek M., and Woch, M.W. 2020. Soil organic matter prevails over heavy metal pollution and vegetation as a factor shaping soil microbial communities at historical Zn–Pb mining sites. *Chemosphere* (240), 124922.
- Sun Z., Xie X., Wang P., Hu Y., and Cheng H. 2018. Heavy metal pollution caused by small-scale metal ore mining activities: A case study from a polymetallic mine in South China. *Science of the Total Environment*. 636: 217-227.
- Taylor S.R. (1964). Abundance of chemical elements in the continental crust: a new table. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 28(8): 1273–1285.

- Wu J., Lu J., Li L., Min X., and Luo Y. 2018. Pollution, ecological-health risks, and sources of heavy metals in soil of the northeastern Qinghai-Tibet Plateau. *Chemosphere*, 201: 234-242.
- Yan T., Zhao W., Yu X., Li H., Gao Z., Ding M., and Yue, J. 2022. Evaluating heavy metal pollution and potential risk of soil around a coal mining region of Tai'an City, China. *Alexandria Engineering Journal*, 61: 2156-2165.
- Yang Q., Lu Z. Li X., Duan Q., Huang L., and Bi, J. 2018. A review of soil heavy metal pollution from industrial and agricultural regions in China: Pollution and risk assessment. *Science of the Total Environment*, 642: 690-700.
- Zhang Y., Zhang H., Zhang Z., Liu C., Sun C., Zhang W., and Marhaba, T. 2018. PH Effect on Heavy Metal Release from a Polluted Sediment. *Journal of Chemistry*, 1-7.