

Research Article

Assessment of heavy metals pollution in the soil of Hashtgerd and Nazarabad cities after three decades of industrialization

Fateme Kakouei^{1*}, Hossein Pirkharrati¹, Manizhe Asadpour¹

1- Department of Geology, Faculty of Science, Urmia University, Iran

Keywords: *Environmental pollution, Heavy metals, Soil, Industrial towns, Hashtgerd, Nazarabad*

1-Introduction

One of the most essential types of soil pollution is heavy metal pollution, which has been increasing due to the expansion of urbanization and industrialization and has attracted much attention worldwide (Ghanavati et al., 2019). Heavy metals in the soil have turned it into a significant pollutant (Babaei et al., 2018). Knowledge of the level of heavy metal contamination in soil systems seems essential in making decisions to reduce pollution, reduce human exposure, and protect humans from the risks of heavy metal contamination.

2-Material and methods

In this regard, considering that the area of Hashtgerd and Nazarabad has different uses (many industrial towns, residential and agricultural areas), In the current research, an attempt has been made to investigate the study area from the environmental geochemistry point of view, according to the results of the analysis of 250 geochemical samples. The samples were prepared using the partial digestion method (METHOD 3050B) and analyzed using ICP-MS.

3-Results and discussions

Pollution indices were used, a valuable tool for evaluating the intensity of soil pollution and determining their origin to evaluate the level of heavy metal pollution in soil (Hamzenejad Taghliabad and Khodaverdiloo, 2020). Using these indicators can be very beneficial in managing the zoning of contaminated soils and their risk creation for plants and humans. In this research, metal enrichment factor (E.F.) and land accumulation indicators (Igeo), pollution factor (Cf), environmental risk assessment (Eri), pollution index (PINemerow), pollution load index (PLI), pollution security index (CSI)) toxicity probability index (MERMQ), ecological risk potential (R.I.) was evaluated (Gong et al., 2008; Rapant et al., 2008; Sekabira et al, 2010). By comparing the average pollution factor of heavy metals in the soil based on the classification of pollution factor value, nickel element number (6.33) shows very high pollution and chromium and arsenic values show moderate pollution. Based on the pollution security index, which provides information on determining the high toxicity limit that causes adverse effects in the soil environment, the north and south sides of the studied area are medium in terms of pollution security. The enrichment factor is a suitable method for distinguishing the natural and human origin of pollution; the higher the value of the enrichment factor, it shows that the contribution of human factors in increasing the pollution of the desired metal in the region's soil has increased.

4-Conclusion

According to the cluster diagram obtained from the statistical analysis, aluminum, iron, and magnesium elements are in one cluster and are not closely correlated with other polluting elements, so this shows that heavy metal pollution is not geogenic. In the studied area, the elements nickel > arsenic > chromium > copper > lead > zinc show significant and moderate richness, especially in the north of the region, which has led to a decrease in the quality of the soil in the region and it shows the significant contribution of

* Corresponding author: fateme.kakouei@gmail.com

DOI: 10.22055/aag.2024.46672.2451

Received: 2024-04-21

Accepted: 2024-08-12

human factors. The Pollution Load Index (PLI) evaluates the total degree of pollution and provides evidence of soil degradation due to the accumulation of heavy metals. In Hashtgerd and Nazarabad, most of the areas, especially the northern part and parts of the southern part, have seen a decrease in soil quality. Since the soil of the research area is contaminated with heavy metals in some areas, it is necessary to carry out more projects in contaminated areas to evaluate the strategic plans of soil resource management.

5-References

- Babaei, H., Ghanavati, N., Nazarpour, A., 2018. Contamination level of mercury in the street dust of ahvaz city and its spatial distribution. *Journal of Water and Soil Science*, 22(3), 249-59. (In Persian with English Abstract). <https://doi:10.29252/jstnar.22.3.249>.
- Ghanavati, N., 2018. Human health risk assessment of heavy metals in street dust in Abadan. *Iranian Journal of Health and Environment* 11(1), 63-74. (In Persian). <http://ijhe.tums.ac.ir/article-1-5972-en.pdf>.
- Hamzenejad taghliabad, R., Khodaverdiloo, H., 2020. Quantitative assessment of soil heavy metals pollution. *Applied Soil Research*, 8(2), 37-52. https://asr.urmia.ac.ir/article_120917_en.html
- Gong, Q., Deng, j., Yangchuan, X., Qingjie, W., 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/S1002-0705\(08\)60042-4](https://doi.org/10.1016/S1002-0705(08)60042-4).
- Rapant, S., Salminen, R., Tarvainen, T., Krc mova, K., Cvec Kova, V., 2008. Application of a risk assessment method to Europe–wide geochemical baseline data. *Geochemistry Exploration, Environment, Analysis* 8, 1467-7873. <https://doi.org/10.1144/1467-7873/08-176>.
- Sekabira, K., Oryem-Origa, H., Basamba, TA., Mutumba, G., Kakudidi, E., 2010. Assessment of heavy metal pollution in the urban stream sediments and its tributaries. *Journal of Environmental Science and Technology* 7(3), 435-446. <https://doi.org/10.1007/BF03326153>.
- USEPA, 1996. United States Environmental Protection Agency: Method 3050B. Acid digestion of sediments, sludges, and soils, Revision 2. SW-846 – Test Methods for Evaluating Solid Waste: Physical/Chemical Methods. U.S. Government Printing Office, Washington, DC. <https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-06/documents/epa-3050b.pdf>.

HOW TO CITE THIS ARTICLE:

Kakouei, F., Pirkharrati, H., Asadpour, M., 2025. Assessment of heavy metals pollution in the soil of Hashtgerd and Nazarabad cities after three decades of industrialization. *Adv. Appl. Geol.* 14(4), 914-932.

DOI: 10.22055/aag.2024.46672.2451

URL: https://aag.scu.ac.ir/article_19400.html

©2025 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers

ارزیابی آلاینده‌های فلزات سنگین در خاک محدوده شهرستان‌های هشتگرد و نظرآباد،

پس از سه دهه صنعتی شدن

فاطمه کاکویی*

دانشجوی دکتری زمین شناسی زیست محیطی، دانشکده علوم، دانشگاه ارومیه، ایران

حسین پیر خراطی

دانشیار گروه علوم زمین، دانشکده علوم، دانشگاه ارومیه، ایران

منیژه اسد پور

استادیار گروه زمین شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه ارومیه، ایران

* fateme.kakouei@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۰۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۵/۲۲

چکیده

مقادیر فلزات سنگین در خاک، به دلیل نهاده‌های کشاورزی، توسعه شهرنشینی و صنعتی شدن، اکوسیستم را تحت تأثیر قرار می‌دهد. محدوده شهرستان‌های هشتگرد و نظرآباد به دلیل کاربری‌های مختلف مورد ارزیابی قرار گرفت، ۲۵۰ نمونه ژئوشیمیایی برداشت شد و به روش هضم جزئی (METHOD 3050B) آماده سازی شد. آنالیز نمونه‌ها با استفاده از ICP-MS انجام شد. برای ارزیابی میزان آلودگی فلزات سنگین در خاک از شاخص‌های آلودگی استفاده شد. با مقایسه میانگین فاکتور آلودگی فلزات سنگین در خاک بر اساس رده‌بندی مقدار فاکتور آلودگی، عنصر نیکل عدد (۶,۳۳) آلودگی بسیار بالا و مقادیر کروم و آرسنیک آلودگی متوسط را نشان می‌دهند. بر اساس شاخص امنیت آلودگی، سمت شمال و بخشی از جنوب محدوده، از لحاظ امنیت آلودگی متوسط می‌باشد. با توجه به نمودار خوشه ای بدست آمده از تحلیل آماری عناصر آلومینیوم، آهن و منیزیم در یک خوشه قرار دارند و با سایر عناصر آلاینده همبستگی نزدیکی ندارند لذا این موضوع نشان می‌دهد که آلاینده‌های فلزات سنگین ژئوژنیک نمی‌باشد فاکتور غنی‌شدگی روش مناسبی جهت تفکیک منشأ طبیعی و انسان پدید آلودگی است، در محدوده مورد مطالعه به ترتیب عناصر نیکل < آرسنیک < کروم < مس < سرب < روی، غنی‌شدگی قابل توجه و متوسط را بویژه در شمال محدوده (شهرستان مهستان، هشتگرد، نظرآباد، و شهرک‌های صنعتی هشتگرد و نظرآباد) نشان می‌دهند که منجر به کاهش کیفیت خاک منطقه شده است و این نمایانگر سهم قابل توجه عوامل انسان پدید در محدوده مورد مطالعه می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: آلودگی زیست محیطی، فلزات سنگین، خاک، شهرک‌های صنعتی، هشتگرد، نظرآباد

۱-مقدمه

معضل آلودگی یکی از مهم‌ترین معضلات زیست محیطی است که به ویژه پس از انقلاب صنعتی، پیشرفت تکنولوژی و استفاده از روش‌های نوین در صنعت، ابعاد جدی زیست محیطی به خود می‌گیرد. یکی از این مشکلات زیست محیطی بسیار جدی، آلودگی به فلزات سنگین است که در نتیجه فعالیت‌های انسانی در محیط انباشته می‌شود و شامل برخی فلزات سمی بیولوژیکی (Hg, Cd, Pb, Co, Ni, Cr, As) می‌شود. با افزایش توسعه اقتصاد جهانی، محتوای این فلزات در خاک به تدریج در نتیجه

فرآیندها و فعالیت‌های مختلف انسانی افزایش یافته است (Parazanganeh et al., 2010).

برای رسیدن به توسعه پایدار بخصوص در بخش کشاورزی، جمع‌آوری اطلاعات پایه زیست محیطی برای منابع حیاتی از جمله خاک و آب لازم و ضروری است. لذا بررسی وضعیت آلودگی خاک به فلزات سنگین در مناطقی که با فعالیت‌های صنعتی و کشاورزی همراه است و احتمال انباشت فلزات سنگین در خاک و آب وجود دارد، ضروری است. اجرای برنامه‌های توسعه صنعتی صرف‌نظر از ملاحظات زیست محیطی به ورود آلاینده‌های شیمیایی به آب، خاک و هوا در مناطق مختلف منجر

ریسک خاک در نواحی صنعتی و پشتیبانی نظری از برنامه‌ریزی منطقی زمین را فراهم کند.

۲- مواد و روش ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در محدوده‌ی جغرافیایی با مشخصات طول شرقی $30^{\circ} 50'$ تا $44^{\circ} 50'$ و عرض شمالی $48^{\circ} 35'$ تا $00'$ 36° واقع شده است. این محدوده در جنوب استان البرز واقع شده و دارای اقلیم نیمه خشک و بیابانی است. حدود ۹۰٪ مساحت محدوده به صورت دشت و و مخروط افکنه‌های آبرفتی بوده و پوشیده از خاک است که این موضوع امکان نمونه‌برداری رسوبات آبراهه‌ای را ناممکن می‌سازد. لذا در این مناطق با ایجاد شبکه‌بندی منظم، اقدام به نمونه‌برداری از خاک شد.

۲-۲- نمونه برداری و آماده سازی نمونه

تراکم نمونه‌برداری با توجه به وسعت منطقه، یک نمونه در هر $2/5$ کیلومتر مربع، به صورت شبکه منظم در نظر گرفته شد. نمونه جزء ترکیبی - حجمی Bulk (که هر نمونه از ۵ نقطه در یک سلول) برداشت گردید. در مجموع ۲۵۰ نمونه خاک سطحی ($30-300$ سانتی‌متر) بر اساس طراحی شبکه انجام شده برداشت شد. نمونه‌ها پس از الک با مش ۱۰ در کیسه‌های پلی اتیلن دارای برچسب مناسب جمع‌آوری و نگهداری شد، (نقشه ۱، محدوده مورد مطالعه و شبکه نمونه برداری) و برای آنالیز به آزمایشگاه ارسال گردید. هضم نمونه‌ها بر اساس شیوه نامه USEPA, 1996)3050B انجام و برای آنالیز عناصر از دستگاه ICP-MS استفاده شد.

۲-۳- شاخص های زیست محیطی

شاخص های مختلفی وجود دارد که معمولاً برای شناسایی غلظت فلزات مربوط به محیط زیست مورد استفاده قرار می گیرد. در این پژوهش ضریب غنی سازی فلز (EF) و شاخص های زمین انباشت (Igeo)، فاکتور آلودگی (Cf)، ارزیابی خطر زیست محیطی (Eri)، فاکتور غنی شدگی زمینه (PIN)، شاخص آلودگی نمره (PINemerow)، شاخص بار آلودگی (PLI)، شاخص امنیت آلودگی (CSI) شاخص احتمال سمیت (MERMQ)، پتانسیل خطر اکولوژیکی (RI) مورد ارزیابی قرار گرفت (Gong et al., 2008; Rapant et al., 2008; Sekabira et al., 2010)

شده است. بسیاری از پژوهش‌ها نشان داده‌اند آب، خاک و هوا در مناطق مجاور فعالیت‌های صنعتی بسیار آلوده است، بنابراین فعالیت‌های صنعتی بر سلامت ساکنان مناطق پیرامون از راه هوا، آب و خاک تأثیر می‌گذارد و موجب بروز بیماری‌ها و عوارض جانبی می‌شود (Khosravi et al., 2018).

مناطق مورد مطالعه (شهرهای هشتگرد و نظرآباد) به لحاظ موقعیت جغرافیایی در غرب استان البرز واقع شده است. این مناطق به لحاظ توپوگرافی دارای دشت‌های نسبتاً وسیع و زمین‌های تپه ماهوری است. خاک سبک دشت‌های این دو شهر، برای کشاورزی مناسب است. قسمت زیادی از محدوده این دو شهر به لحاظ وجود شهرک‌های صنعتی در معرض خطر آلودگی خاک و آب به فلزات سنگین قرار گرفته‌اند. یکی از مهمترین مسایل زیست محیطی، تصفیه فاضلاب های صنعتی است که شامل فلزات سنگین نظیر سرب، نیکل، آهن، روی، آرسنیک، منگنز و جیوه، مس، کروم و کادمیوم می باشد. این فلزات به صورت محلول در آب و خاک وارد شده و باعث آلودگی آب‌های سطحی و زیر زمینی و خاک می شوند، همچنین سبب برهم زدن اکوسیستم‌هایی که به آن وارد می‌شوند، می گردند (Shakibayi et al., 2009). با توجه به اینکه محدوده این شهرها دارای کاربری‌های مختلف (شهرک‌های صنعتی، مناطق مسکونی و کشاورزی) می‌باشد، لذا ضروری است تا آلاینده‌ی فلزات سنگین در خاک منطقه، که واحدهای صنعتی متعددی بیش از سه دهه در آن فعالیت می‌کنند، مورد بررسی قرار گیرد. در محدوده مورد مطالعه به طور گسترده کشاورزی رونق دارد. لذا انتقال فلزات سنگین از طریق پساب های صنایع به مناطق کشاورزی می تواند معضلات زیست محیطی فراوانی را ایجاد کند. از آن جایی که اکثر پساب های صنعتی نهایتاً به آب های سطحی موجود در منطقه تخلیه می‌شوند، بررسی اثرات تخلیه این پساب ها به رودخانه‌ها و خاک ها اهمیت داشته و ضروری به نظر می‌رسد.

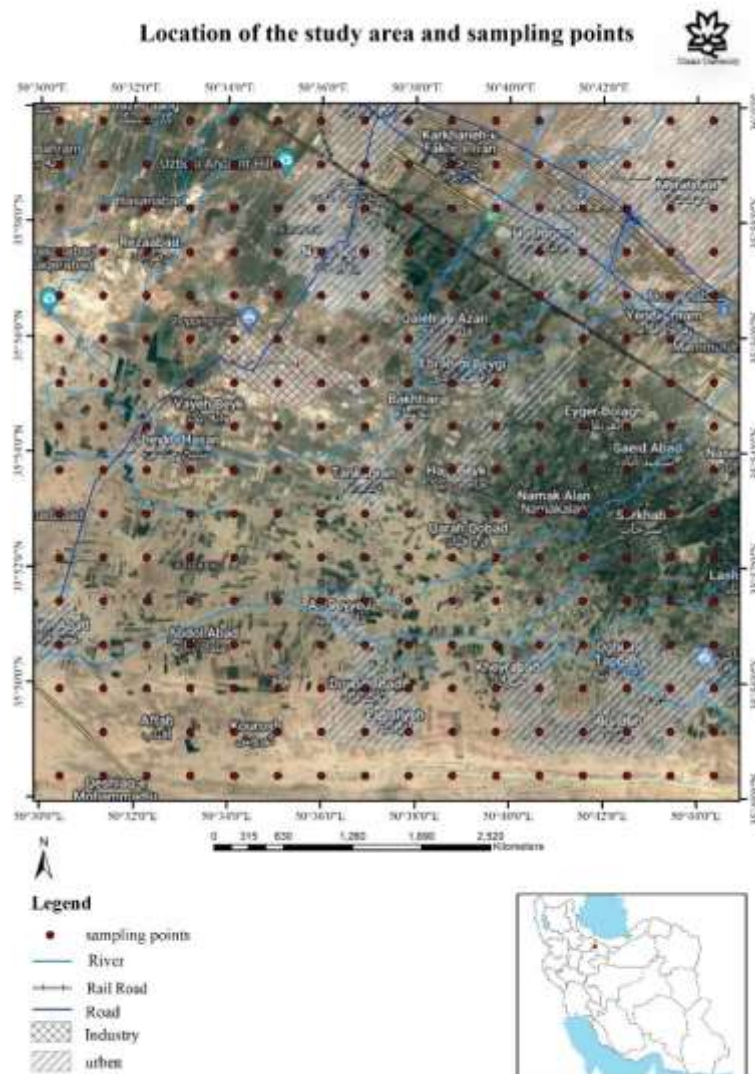
در این پژوهش هدف بررسی و ارزیابی غلظت و میزان پراکندگی برخی فلزات سنگین و تهیه نقشه پهنه‌بندی آنها در جهت شناسایی مناطق آلوده است. در دست داشتن اطلاعات در خصوص توزیع فلزات سنگین در محیط می تواند ما را جهت مدیریت توسعه پایدار و ایجاد محیط زیست امن تر کمک نماید. نتایج این مطالعه می‌تواند پایه‌ای علمی برای مدیریت و کنترل

در غلظت‌های زمینه که عموماً به تغییرات سنگ‌شناسی خاک و تاثیر عوامل انسانی نسبت داده شده است. این ضریب با تفکیک نوسانات طبیعی موجود در غلظت یک ماده معین در محیط، تغییرات اندک ناشی از اثرات انسان‌پدید را نمایان می‌سازد (Rashid Shomali and Khodaverdiloo, 2012). مولر ۷ رده مختلف را برای این شاخص عنوان کرد که مقادیر عناصر در بالاترین رده حداقل ۱۰۰ برابر مقادیر مرجع است (جدول ۱) (Zhang et al., 2007).

$$Igeo = \text{Log}_2\left[\frac{Ci}{1.5 \cdot Cri}\right] \quad (\text{رابطه ۱})$$

۲-۳-۱- شاخص زمین انباشت (Geo-accumulation Index Igeo)

یک روش متداول برای تخمین آلودگی خاک به فلزات سنگین، شاخص زمین انباشت (Igeo) می‌باشد. این شاخص از کسر مقدار غلظت فلزات سنگین در خاک به مقدار غلظت زمینه همان فلز می‌باشد که توسط مولر ارائه گردید (Muller, 1969). شاخص زمین انباشت از رابطه ۱ محاسبه می‌شود. Igeo، شاخص انباشت ژئوشیمیایی، C_i ، مقدار غلظت فلز سنگین در خاک، C_{ri} ، مقدار غلظت زمینه (پایه منطقه) و $1/5$ ، ضریب تصحیح شده می‌باشد. به منظور کمینه کردن اثر تغییر احتمالی



شکل ۱- موقعیت محدوده مورد مطالعه و شبکه نمونه‌برداری

Fig. 1. Location of the study area and sampling points

جدول ۱- کیفیت خاک بر اساس شاخص انباشتگی زمین (Igeo) (Muller, 1969)
Table 1. Soil quality according to Geoaccumulation Index (Igeo) values (Muller, 1969)

Class	Values of Igeo	Soil quality
0	$I \leq 0$	unpolluted
1	0-1	unpolluted to moderately polluted
2	1-2	moderately polluted
3	2-3	moderately to highly polluted
4	3-4	highly polluted
5	4-5	highly to extremely high polluted
6	5-6	extremely high polluted

سنگین در نمونه‌های برداشت شده است. (تعداد نمونه‌ها حداقل از ۵ نقطه برداشت شده اند)، $Cp-i$ مقدار ماده در منطقه قبل از صنعتی شدن است و به عنوان مقدار سطح مرجع در همان منطقه است. طبق طبقه بندی هاکانسون (Hakanson, 1980)، جهت ارزیابی آلاینده‌های فلزات سنگین، اگر مقدار فاکتور آلودگی بیش از یک باشد آلودگی متوسط تا بسیار بالا است که جدول ۳ رده بندی آلودگی را بر اساس فاکتور آلودگی نشان می‌دهد.

$$Cf = \frac{Cm}{Cp-i} \quad (\text{رابطه ۳})$$

۲-۳-۴- فاکتور ریسک اکولوژیکی (Ecological risk factor, Eri)

این فاکتور برای ارزیابی کنترل کیفیت آب، خاک به کار می‌رود. این فاکتور از رابطه ۴ محاسبه می‌گردد. که در آن Tri شدت آلودگی، PI_i شاخص آلودگی می‌باشد. جدول ۵ رده بندی آلودگی بر اساس فاکتور خطر اکولوژیکی را نشان می‌دهد. اعداد ردیف دوم جدول ۴ (پاسخ به سمیت Tri) را نشان می‌دهد. مقدار این متغیر ربطی به ماندگاری فلزات در خاک یا رسوب ندارد، بلکه به سمیت فلزات مربوط است.

$$E_r^i = T_r^i \cdot PI_i \quad (\text{رابطه ۴})$$

۲-۳-۲- فاکتور غنی‌شدگی (Enrichment factor, EF)

ضریب غنی‌شدگی روش مناسبی جهت تفکیک منشأ طبیعی و انسان پدید آلودگی است (Sutherland, 2000) برای تعیین این شاخص، یک عنصر را به عنوان رفرنس در نظر می‌گیرند که این عنصر باید غیرمتحرک بوده و تحت تاثیر فعالیت‌های بشر قرار نگیرد، مانند Sc, Li, Al, Fe, Ti, Zr. ضریب غنی‌شدگی از رابطه ۲ محاسبه می‌شود. که در آن C_i غلظت عنصر مورد نظر در نمونه و C_{ie} غلظت عنصر رفرنس در نمونه (که در این پژوهش آلومینیوم در نظر گرفته شد) می‌باشد. هر چه مقدار فاکتور غنی‌سازی بیشتر باشد نشان می‌دهد که سهم عوامل انسانی در افزایش آلودگی فلز مورد نظر در خاک منطقه بیشتر شده است، که رده بندی مقادیر آن در جدول ۲ آورده شده است.

$$EF = \frac{\frac{C_i}{C_{ie}}^{sample}}{\frac{C_i}{C_{ie}}^{Reference Sample}} \quad (\text{رابطه ۲})$$

۲-۳-۳- فاکتور آلودگی (Contamination factor, Cf)

این فاکتور مقدار عناصر را نسبت به مقدار طبیعی خود سنجیده و میزان آلودگی خاک را تعیین کند. این فاکتور از رابطه ۳ محاسبه می‌گردد که در آن، C_m میانگین مقدار آلاینده یا فلز

جدول ۲- مقادیر شاخص ضریب غنی‌شدگی (EF) (Kowalski et al., 2018)
Table 2. Categories of Enrichment Factor (EF) (Kowalski et al, 2018)

Class	EF Value	Enrichment of soil
0	>2	deficiency to minimal enrichment
1	2-5	moderate enrichment
2	5-20	significant enrichment
3	20-40	very high enrichment
4	$40 <$	extremely high enrichment

جدول ۳- رده بندی آلودگی بر اساس فاکتور آلودگی (Cf) (Kowalski et al., 2018)
Table 3. Contamination Factor (Cf) interpretation (Kowalski et al, 2018)

Class	Value of Cf	Soil pollution
1	<1	low contamination
2	1 - 3	moderate contamination
3	3 - 6	considerable contamination
4	>6	very high contamination

جدول ۴- مقادیر مرجع قبل از صنعتی شدن و مقادیر سمیت بر اساس طبقه بندی هاگنسون، ۱۹۸۰ - $\mu\text{g/g}$
Table 4. Ecological risk factor (Eri) interpretation (Kowalski et al, 2018)

Elements	Ni	Zn	Cr	Pb	Cu	As	Cd	Hg
Pre-industrial reference level	5	175	90	70	50	15	0.1	0.25
toxicity response	5	2	2	5	5	10	30	40

جدول ۵- رده بندی آلودگی بر اساس فاکتور ریسک اکولوژیکی (E_r^i) (Kowalski et al., 2018)
Table 5. Ecological risk factor (Eri) interpretation (Kowalski et al, 2018)

Class	E_r^i	Soil pollution
1	<40	low ecological risk
2	40 - 80	moderate ecological risk
3	80 - 160	considerable ecological risk
4	160 - 320	high ecological risk
5	>320	very high ecological risk

در آن شاخص آلودگی، ماکزیمم شاخص آلودگی فلزات سنگین و تعداد فلزات سنگین می‌باشد. بر اساس شاخص آلودگی نمر و کیفیت خاک و رسوب در ۵ سطح طبقه بندی می‌شود که در جدول ۷ آورده شده است.

$$PI_{Nemerow} = \sqrt{\frac{(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n PI)^2 + PI_{max}^2}{n}} \quad (\text{رابطه ۶})$$

۲-۳-۷- فاکتور غنی شدگی زمينه (Background enrichment factor, PIN)

برای ارزیابی غنی‌شدگی خاک توسط فلزات سنگین و بر اساس رده آلودگی PIClass و مقادیر هر یک از این عناصر Ctri از رابطه ۷ بدست می‌آید. که در آن PIClass رده آلودگی فلز سنگین (ارائه شده در جدول ۸) Ci مقدار آلودگی فلز سنگین و Ctri غلظت زمينه آن می‌باشد. تفسیر نتایج حاصل از این رابطه در جدول ۹ آورده شده است.

۲-۳-۵- شاخص بار آلودگی (Pollution load index, (PLI)

از این شاخص برای ارزیابی کل درجه آلودگی و اثبات تخریب خاک در اثر انباشت فلزات سنگین استفاده می‌شود. شاخص بار آلودگی از رابطه ۵ بدست می‌آید. که در آن n تعداد فلز سنگین مورد مطالعه و PI شاخص آلودگی است. رده آلودگی خاک در جدول ۶ آورده شده است.

$$PLI = \sqrt[n]{PI_1 * PI_2 * PI_3 * \dots * PI_n} \quad (\text{رابطه ۵})$$

۲-۳-۶- شاخص آلودگی نمر و (Nemerow pollution index, PINemerow)

این شاخص برای بررسی کمیت ریسک آلودگی و آگاهی از پتانسیل آلودگی استفاده می‌شود. این شاخص ریسک آلودگی به همه فلزاتی که در منطقه مورد مطالعه قرار می‌گیرد را مشخص می‌نماید. این شاخص از رابطه ۶ به دست می‌آید. که

$$PIN = \sum_{i=1}^n \frac{P_i \text{class}^2 * C_i}{C_{ri}} \quad (\text{رابطه ۷})$$

جدول ۶- رده بندی آلودگی بر اساس شاخص بار آلودگی (PLI) (Kowalski et al., 2018)
Table 6. Contamination categories of Pollution Load Index (PLI) (Kowalski et al., 2018)

class	PLI	Quality of soil
1	<1	denote perfection
2	1	only baseline levels of pollution
3	>1	deterioration of soil quality

جدول ۷ رده بندی آلودگی بر اساس شاخص آلودگی نمره (Kowalski et al., 2018)
Table 7 Nemerow Pollution Index (PINemerow) soil pollution classes (Kowalski et al., 2018)

Class	Value of PINemerow	Quality of soil
1	<0.7	Clean
2	0.7-1	Warning limit
3	1-2	Slight pollution
4	2-3	Moderate pollution
5	>3	Heavy pollution

جدول ۸- رده بندی آلودگی بر اساس شاخص آلودگی منفرد (PI) (Kowalski et al., 2018)
Table 8- Pollution classification based on the single pollution index(PI) (Kowalski et al., 2018)

Class	Value of PI	Quality of soil
1	<1	absent
2	1-2	Low
3	2-3	moderate
4	3-5	strong
5	<5	very strong

جدول ۹ تفسیر آلودگی بر اساس فاکتور غنی شدگی زمینه (Kowalski et al., 2018)
Table 9. Interpretation of Background Enrichment Factor (PIN) (Kowalski et al., 2018)

Class	PIN	Contaminants
1	0-70	Clean
2	70-95.1	Trace
3	95.1-518.1	Lightly
4	518.1-2548.5	Contaminant
5	>2548.5	Highly

می شود ارائه می دهد. برای محاسبه شاخص امنیت آلودگی از رابطه ۸ استفاده می شود. که در آن w وزن محاسبه شده هر فلز سنگین بر اساس مطالعه (Pejman et al., 2015) جدول ۱۰ می باشد، C_i غلظت فلز سنگین و مقادیر ERL (Effects Range low) اثرات با محدوده کم، و ERM (Effects Range Long) اثرات با محدوده متوسط که توسط

۲-۳-۸- شاخص امنیت آلودگی (Contamination Security Index, CSI)

شاخص امنیت آلودگی برای اولین بار توسط (Pejman et al., 2015) ارائه شد. این شاخص، اطلاعاتی در خصوص تعیین حد سمیت بالا که باعث ایجاد اثرات نامطلوبی در محیط خاک

$$CSI = \sum_{i=1}^n w \left(\frac{Ci}{ERL} \right)^2 + \left(\frac{Ci}{ERM} \right)^2$$
 (رابطه ۸)

(et al., 1995) که در جداول ۱۱ ارائه شده استفاده می‌شود. طبقه بندی شاخص امنیت آلودگی در جدول ۱۲ آورده شده است.

جدول ۱۰- وزن محاسبه شده فلزات سنگین بر اساس مطالعات (Pejman et al., 2015)
 Table 10. Weight of each heavy metal according to (Pejman et al, 2015)

Elements	Computed weight
Cu	0.075
Zn	0.075
Cr	0.134
Ni	0.215
Pb	0.251
Cd	0.25

جدول ۱۱- مقادیر ERL, ERM ارائه شده توسط لانگ و همکاران (Long et al., 1995)
 Table 11. ERM and ERL values given by (Long et al, 1995)

Elements	ERL	ERM
As	80	70
Cd	1.2	9.6
Cr	81	370
Cu	34	270
Pb	46.7	218
Hg	0.15	0.71
Ni	20.9	51.6
Ag	1.0	3.7
Zn	150	410

جدول ۱۲- طبقه بندی شاخص امنیت آلودگی (CSI) (Kowalski et al., 2018)
 Table 12. Classification of Contamination Security Index (CSI) (Kowalski et al, 2018)

Class	CSI	Contamination severity
1	< 0.5	uncontaminated
2	0.5-1	very low severity
3	1-1.5	low severity
4	1.5-2	low to moderate severity moderate
5	2-2.5	moderate severity
6	2.5-3	moderate to high severity
7	3-4	high severity
8	4-5	very high severity
9	> 5	ultra-high severity

(et al., 2015). این شاخص بر اساس رابطه ۹ محاسبه می‌شود. که در آن C_i غلظت فلزات سنگین، مقادیر ERM ارائه شده توسط (Long et al., 1995) در جدول ۱۱ و n تعداد فلزات

۲-۳-۹- شاخص احتمال سمیت (Probability of toxicity index, MERMQ) این شاخص به عنوان ابزاری برای تشخیص اثرات مضر فلزات سنگین در محیط خاک مورد استفاده قرار می‌گیرد (Pejman)

$$MERMQ = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{Ci}{ERM}}{n} \quad (\text{رابطه ۹})$$

سنگین مورد مطالعه است. تفسیر این شاخص در جدول ۱۳ آورده شده است.

جدول ۱۳- تفسیر شاخص احتمال سمیت (MERMQ) (Kowalski et al., 2018)

Table 13. The Probability of Toxicity Index interpretation (MERMQ) (Kowalski et al, 2018)

MERMQ value	Risk level	Probability of toxicity (%)
< 0.1	low	9
0.1-0.5	moderate	21
0.5-1.5	high	49
> 1.5	very high	76

جدول ۱۴- طبقه بندی کیفیت خاک بر اساس پتانسیل خطر اکولوژیک (RI) (Kowalski et al., 2018)

Table 14. Grades of Potential Ecological Risk (RI) Kowalski et al., (2018)

Numerical value of ecological risk potential	Soil pollution quality
<90	Low
90 -180	moderate
180-360	strong
360-720	very strong
>720	highly-strong

خوشه ۱ را تشکیل می‌دهند. در فاصله نزدیکتر عنصر Fe,Al, Mg خوشه ۲ را تشکیل می‌دهد و در فاصله دورتر با خوشه ۱ همبستگی دارد. عنصر Ca خوشه ۳ را تشکیل می‌دهند.

۵- بحث

مقایسه میانگین فاکتور آلودگی فلزات سنگین در خاک، مقدار عناصر را نسبت به مقدار طبیعی خود سنجیده و میزان آلودگی خاک را تعیین می‌کند. بر اساس رده بندی مقدار فاکتور آلودگی، عنصر نیکل عدد ۶/۳۳ آلودگی بسیار بالا و مقادیر کروم و آرسنیک آلودگی متوسط را نشان می‌دهند.

مقایسه میانگین شاخص زمین انباشت فلزات سنگین در خاک که کیفیت خاک و رسوب بر اساس شاخص انباشتگی زمین را نشان می‌دهد. بر اساس این جدول عنصر نیکل و کروم در رده ۱، با میزان آلودگی کم تا متوسط می‌باشد و بقیه عناصر در رده صفر (بدون آلودگی) قرار دارند.

با مقایسه میانگین ضرایب غنی‌شدگی فلزات سنگین در خاک، مقدار ضریب غنی‌شدگی عنصر نیکل بالاتر از ۵ می‌باشد و لذا مقدار غنی‌شدگی این عنصر در رده ۳ (آلودگی قابل توجه) است. در بقیه عناصر غنی‌شدگی متوسط تا کم می‌باشد.

۲-۳-۱۰- پتانسیل خطر اکولوژیکی (Ecological risk potential, RI)

این شاخص برای ارزیابی میزان خطر اکولوژیکی ناشی از غلظت فلزات سنگین در آب، هوا و خاک می‌باشد. اولین بار توسط (Hakanson, 1980) ارائه گردید که با استفاده از رابطه ۱۰ محاسبه می‌شود. و در آن تعداد فلزات سنگین شاخص خطر اکولوژی می‌باشد. کیفیت خاک بر اساس پتانسیل خطر اکولوژیکی به ۵ رده طبقه بندی می‌شود که در جدول ۱۴ آورده شده است.

$$RI = \sum_{i=1}^n E_r^i \quad (\text{رابطه ۱۰})$$

۴- نتایج

شکل ۲ دندوگرام خوشه‌ای را نشان می‌دهد. هر چند نتایج حاصل از تفسیر این نمودار می‌تواند مفید باشد ولی نباید بر اساس آن نتیجه‌گیری اساسی نمود زیرا اصولاً این یک واقعیت است که تجزیه و تحلیل خوشه‌ای یک روش آماری غیر قابل آزمون است، بدین معنی که هیچ راهی برای دانستن این که داده‌ها بیشتر از آن چه از یک جامعه تصادفی انتظار می‌رود خوشه بندی شده‌اند یا خیر، وجود ندارد. بر اساس این آنالیز، عناصر P, Mn ,Ba ,K ,V, Zn ,Cu ,As ,Ni ,Pb ,Co ,Cr

در رده ۱ واقع شده است و لذا از ریسک اکولوژیکی پایینی برخوردار هستند.

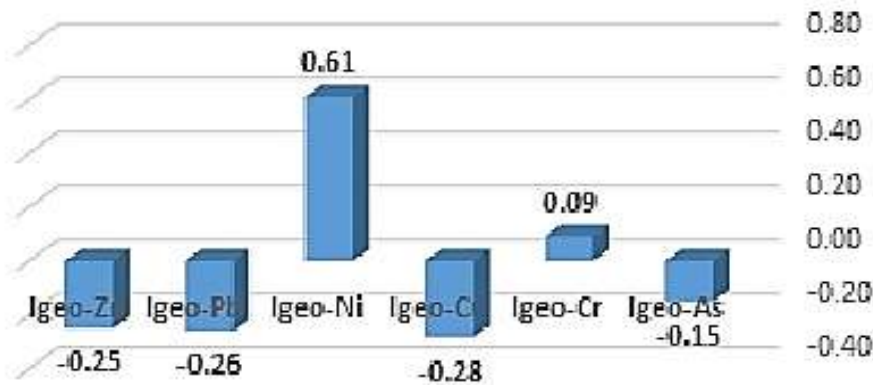
مقایسه میانگین فاکتور خطر اکولوژیکی فلزات سنگین در خاک که برای ارزیابی کنترل کیفیت آب، خاک و رسوبات به کار می رود، نشان می دهد که ریسک اکولوژیکی تمامی عناصر

Dendrogram using Average Linkage (Between Groups)



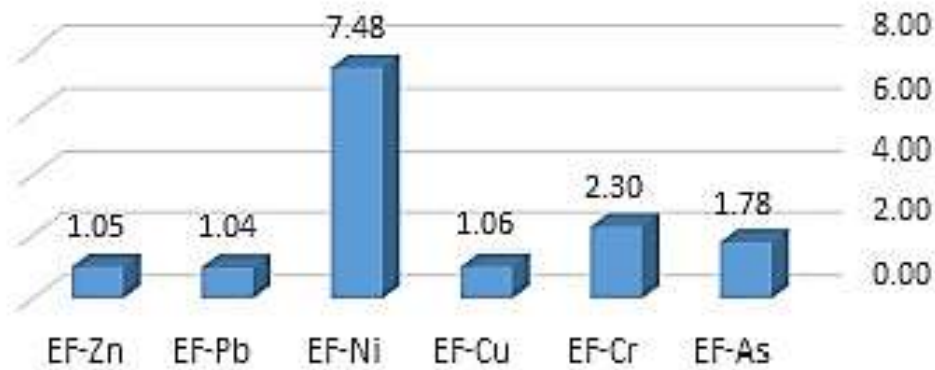
شکل ۲- نمودار دندوگرام خوشه‌ای فلزات سنگین
Figure 2. Clustering of heavy metals

Geo-accumulation Index (Igeo)



شکل ۳- مقایسه میانگین شاخص زمین انباشت فلزات سنگین در خاک
Fig. 3. Comparison of the average geo accumulation index of heavy metal in soil

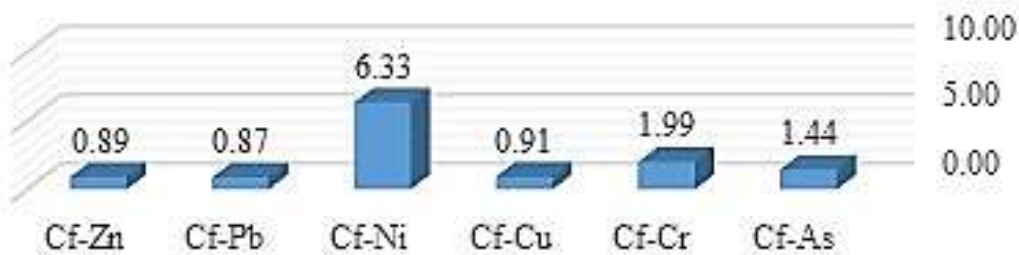
Enrichment factor (EF)



شکل ۴- مقایسه میانگین ضرایب غنی شدگی فلزات سنگین در خاک

Fig. 4. Comparison of the average enrichment factor of heavy metals in soil

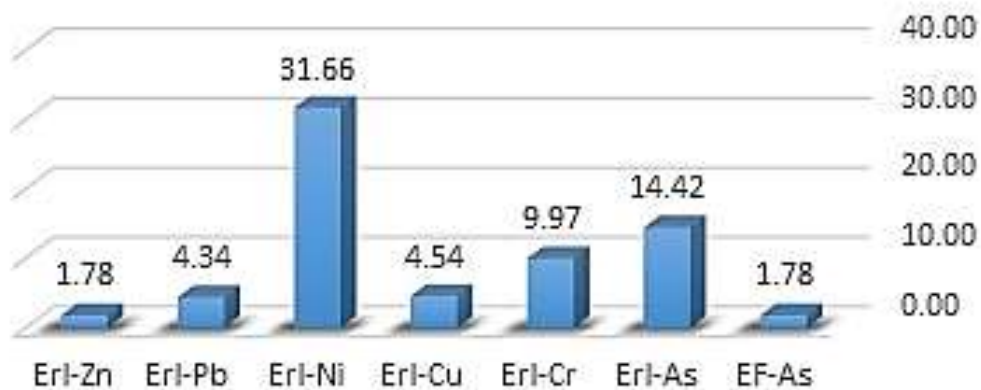
Contamination factor (C_f)



شکل ۵- مقایسه میانگین فاکتور آلودگی فلزات سنگین در خاک

Fig. 5. Comparison of the average Contamination factor of heavy metals in soil

Ecological risk factor (E_rⁱ)

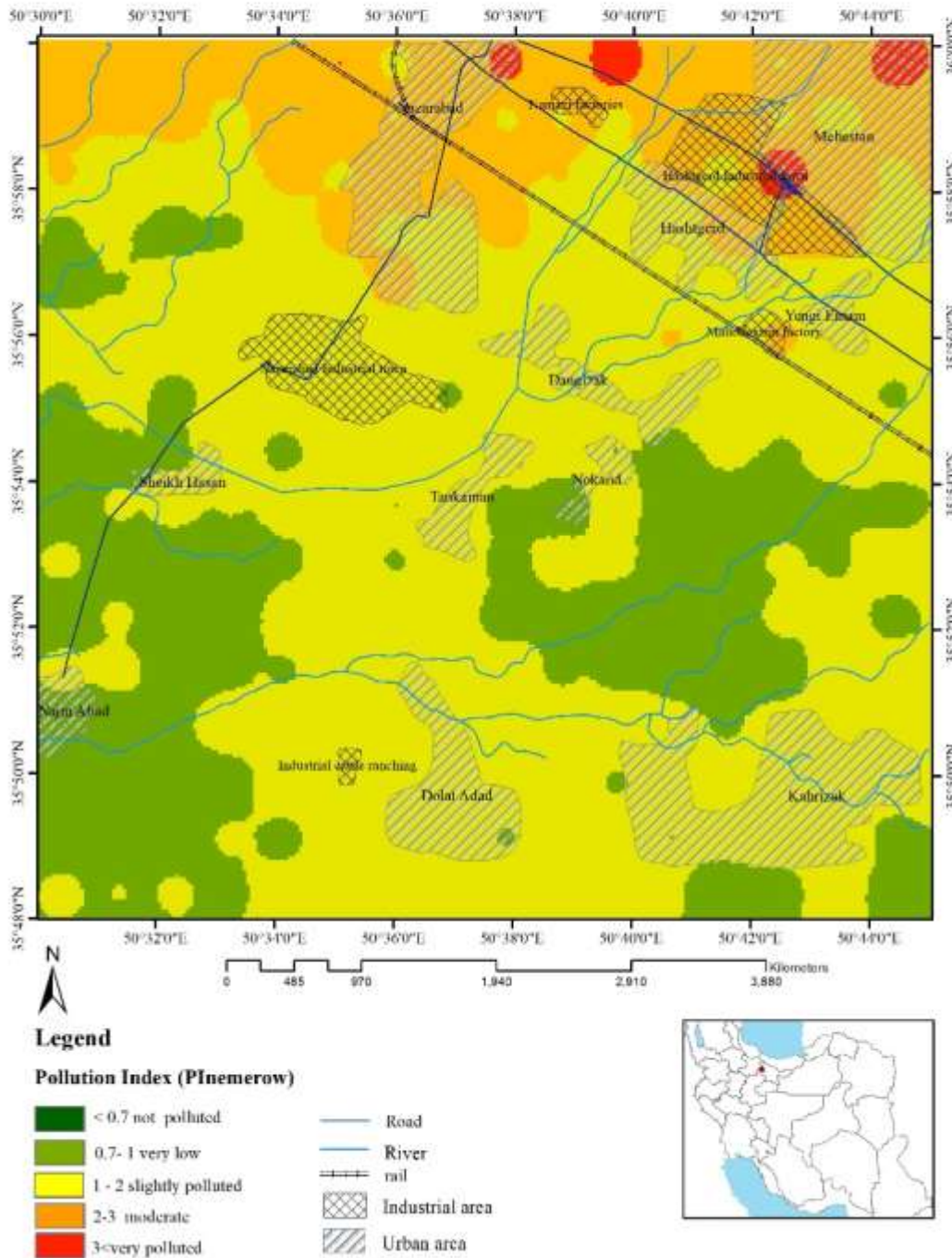


شکل ۶- نمودار مقایسه میانگین فاکتور خطر اکولوژیکی فلزات سنگین در خاک

Fig. 6. Comparison of the average ecological risk factor of heavy metals in soil

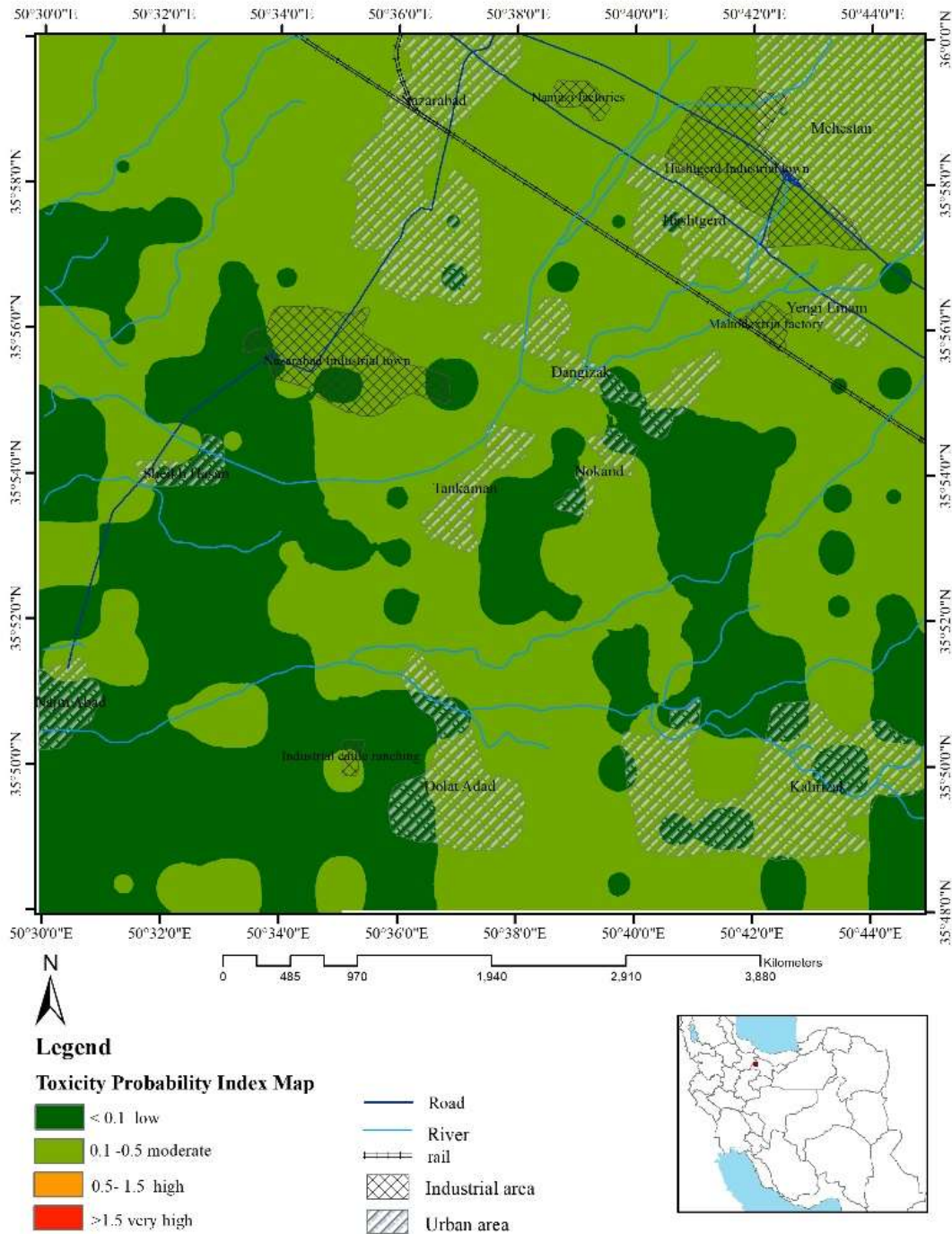


Pollution Index (PI_{nemerow})



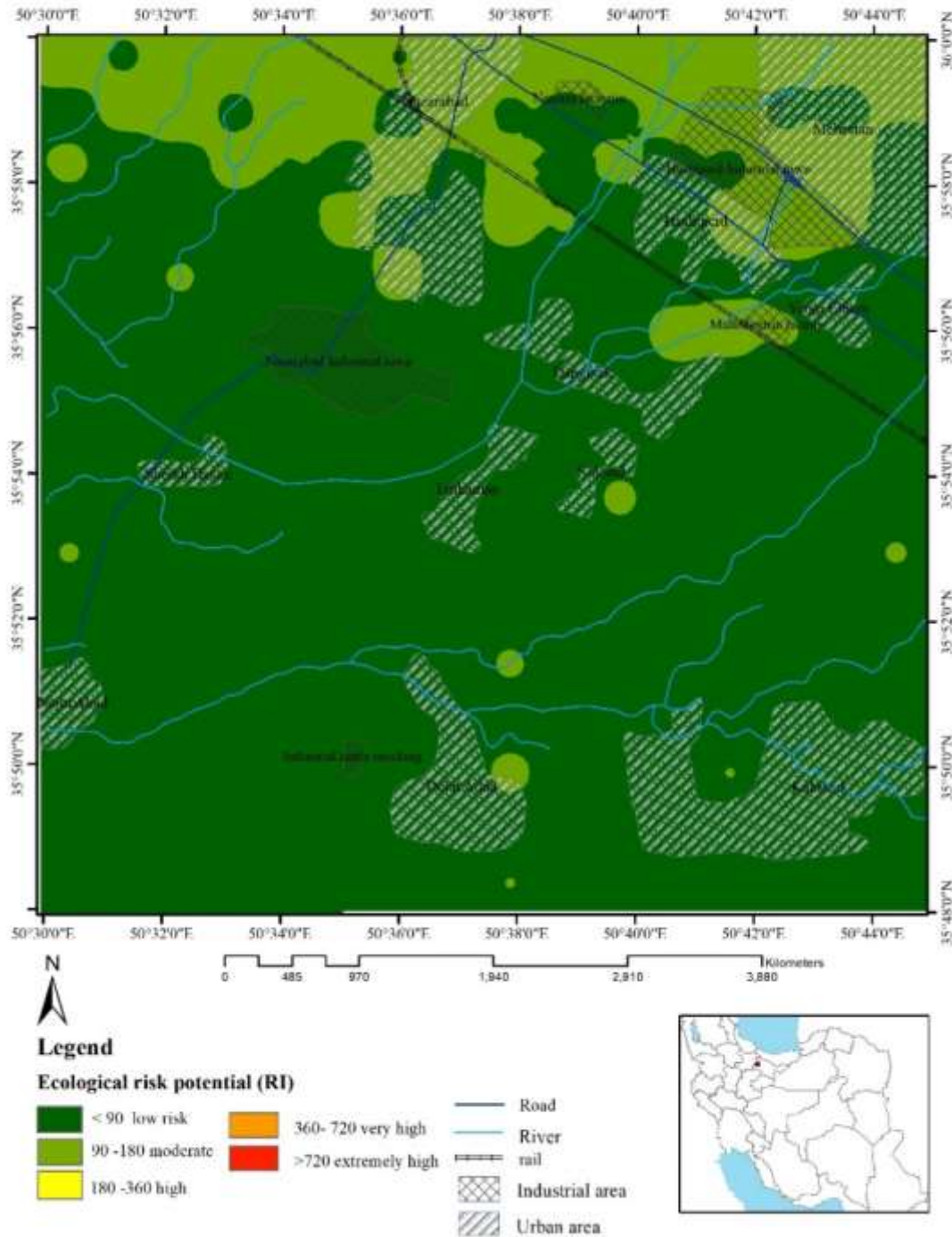
شکل ۸- نقشه شاخص آلودگی نمر (PI_{nemerow})
 Fig. 8. pollution index (PI_{nemerow}) map

Toxicity Probability Index Map (MERMQ)



شکل ۱۰- نقشه شاخص احتمال سمیت (MERMQ)
 Fig. 10. Toxicity Probability Index (MERMQ) Map

Ecological risk potential (RI)



شکل ۱۱- نقشه خطر اکولوژیکی بالقوه (RI)
 Fig. 11. Potential ecological risk (RI) map

۶- نتیجه گیری

منطقه مورد مطالعه یک سکونت گاه شهری با رشد سریع است و فعالیت‌های کشاورزی و صنعتی به ویژه مرغداری و کارخانه‌های فرآوری و ... در منطقه افزایش یافته است. این فعالیت‌ها می‌توانند خاک و منابع آب زیرزمینی را تحت تأثیر قرار دهند و بر کیفیت آن تأثیر منفی بگذارند، زیرا زباله‌های (جامد و پساب) تولید شده حاوی فلزات سنگین در نهایت به خاک و آب‌های زیرزمینی نفوذ پیدا می‌کنند. مطالعات مرتبط با آلودگی فلزات سنگین در خاک ناشی از فعالیت‌های انسانی در این منطقه بسیار محدود است، بنابراین بررسی کیفیت خاک و تعیین منابع احتمالی آلودگی این فلزات و تعیین توزیع مکانی غلظت در منطقه ضروری به نظر می‌رسد که منجر به ارائه راه‌کارهایی مدیریتی مناسب در جهت کاهش آلاینده‌های زیست‌محیطی باشد.

برای ارزیابی آلودگی فلزات سنگین در خاک، محدوده مورد مطالعه از نظر زمین شیمی زیست محیطی مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به نمودار خوشه‌ای بدست آمده از تحلیل آماری، عناصر آلومینیوم، آهن و منیزیم در یک خوشه قرار دارند و با سایر عناصر آلاینده همبستگی نزدیکی ندارند، لذا این موضوع نشان می‌دهد که آلاینده‌های فلزات سنگین در منطقه، ژئوژنیک نمی‌باشد. عنصر نیکل در این محدوده از غلظت بالایی برخوردار است از طرفی این عنصر همبستگی با سایر عناصر آلاینده دارد. با توجه به اینکه شاخص آلاینده‌های نفتی عنصر نیکل و وانادیوم می‌باشد به احتمال قوی آلودگی این محدوده می‌تواند ناشی از تردد وسایل نقلیه در سه مسیر اصلی، شهرک‌های صنعتی و کارخانجات در شمال محدوده باشد. در بخش جنوبی به دلیل جمع‌آوری پساب‌های سطحی شهرک‌های صنعتی و شهرک‌های مسکونی و هدایت آن از طریق کانال به تصفیه‌خانه مرکزی که در جنوب محدوده مورد مطالعه واقع شده است عامل آلاینده‌های این منطقه گردیده است.

بر اساس شاخص امنیت آلودگی که این شاخص، اطلاعاتی در خصوص تعیین حد سمیت بالا که باعث ایجاد اثرات نامطلوبی

۸- مراجع

- Gong, Q., Deng, J., Yangchuan, X., Qingjie, W., 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/S1002-0705\(08\)60042-4](https://doi.org/10.1016/S1002-0705(08)60042-4).
- Hakanson, L., 1980. Ecological risk index for aquatic pollution control, A sedimentological approach. Journal of Water Research 14, 975–1001. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(80\)90143-8](https://doi.org/10.1016/0043-1354(80)90143-8).

در محیط خاک و رسوب می‌شود ارائه می‌دهد، سمت شمال و بخشی از جنوب منطقه، از لحاظ امنیت آلودگی متوسط و در برخی نقاط آلودگی بالا می‌باشد، لذا تصمیم‌گیران منطقه ملاحظات زیست محیطی در این بخش از دشت را رعایت نمایند. فاکتور غنی‌شدگی روش مناسبی جهت تفکیک منشأ طبیعی و انسان پدید آلودگی است، هر چه مقدار فاکتور غنی‌سازی بیشتر باشد نشان می‌دهد که سهم عوامل انسانی در افزایش آلودگی فلز مورد نظر در خاک منطقه بیشتر شده است. در محدوده مورد مطالعه به ترتیب عناصر نیکل < آرسنیک < کروم < مس < سرب < روی، غنی‌شدگی قابل توجه و متوسط را بویژه در شمال (شهرستان مهستان، هشتگرد، نظرآباد، و شهرک‌های صنعتی هشتگرد و نظرآباد) و بخشی از جنوب محدوده مورد مطالعه نشان می‌دهند که منجر به کاهش کیفیت خاک منطقه شده است و این نمایانگر سهم قابل توجه عوامل انسان پدید در آلودگی محدوده مورد مطالعه می‌باشد. شاخص بار آلودگی (PLI)، ارزیابی کل درجه آلودگی و اثبات تخریب خاک در اثر انباشت فلزات سنگین را نشان می‌دهد، در محدوده مورد مطالعه، اکثر مناطق به ویژه بخش شمالی و قسمتی از جنوب محدوده، کاهش کیفیت خاک مشاهده می‌شود، بنابراین پیشنهاد می‌شود در مناطق نامبرده بررسی‌های دقیق‌تری انجام شود. با توجه به اینکه خاک منطقه پژوهش در برخی محدوده‌ها آلوده به فلزات سنگین می‌باشد، انجام پروژه‌های بیشتر در محدوده‌های آلوده جهت ارزیابی برنامه‌های راهبردی مدیریت منابع خاک ضروری می‌باشد.

۷- سپاس‌گزاری

سپاس از سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور که در این پژوهش از داده‌های پروژه "تهیه نقشه ژئوشیمی زیست محیطی برگه ۵۰۰۰ ۱/ هشتگرد به شماره ایندکس IV۶۱۶۱" (Kakouei et al., 2022) استفاده شد. لذا از زحمات کلیه همکارانی که در این زمینه فعالیت داشتند نیز مراتب قدردانی را به عمل می‌آورم.

- Kakouei, F., Fathabadi, Gh., Malmir, H., Motamedi, H., 2022. Preparation of environmental geochemical map of Hashtgerd 1/50000 index number 6161IV. Report of Geological and Engineering Hazards Office – Geological Survey and Mineral Exploration of Iran.
- Khosravi, N., Maeda, A., DaCosta, R.S., Davies, J.E., 2018. Nanosurfaces modulate the mechanism of peri-implant endosseous healing by regulating neovascular morphogenesis. *Communications Biology* 1(1), 72. <https://doi.org/10.1038/s42003-018-0074-y>.
- Kowalski, J.B., Mazurek, R., Gąsiorek, M., Zaleski, T., 2018. Pollution indices as useful tools for the comprehensive evaluation of the degree of soil contamination—A review. *Environmental Geochemistry and Health* 40, 2395–2420. <https://doi.org/10.1007/s10653-018-0106-z>.
- Long, E.R., MacDonald, D.D., Smith, L., Calder, F.D., 1995. Incidence of adverse biological effects within ranges of chemical concentrations in marine and estuarine sediments. *Environmental Management* 19, 81–97. <https://doi.org/10.1007/BF02472006>.
- Muller, G., 1969. Index of geo accumulation in the sediments of the Rhine River. *Geography Journal* 2, 108-118. <https://sid.ir/paper/618491/en>.
- Parazanganeh, A., Hajisoltani, P., Zamani, A., 2010. Assessment of heavy metal pollution in surficial soils surrounding Zinc Industrial Complex in Zanjan-Iran. *Procedia Environmental Sciences* 2, 162-166. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2010.10.019>.
- Pejman, A., Nabi Bidhendi, G., Ardestani, M., Saeedi, M., Baghvand, A., 2015. A new index for assessing heavy metals contamination in sediments: A case study. *Ecological Indicators* 58, 365–373. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.06.012>.
- Rapant, S., Salminen, R., Tarvainen, T., Krcmova, K., Cvec Kova, V., 2008. Application of a risk assessment method to Europe – wide geochemical baseline data. *Geochemistry Exploration, Environment, Analysis* 8, 291–299, 1467-7873. <https://doi.org/10.1144/1467-7873/08-176>.
- Rashid Shomali, A., Khodaverdiloo, H., 2012. Contamination of soils and plants along urmia-salmas highway (Iran) to some heavy metals. *Water and Soil Science*, 22(3), 157-72. <https://doi.org/650-698-325-384>.
- Sekabira, K., Oryem-Origa, H., Basamba, T.A., Mutumba, G., Kakudidi, E., 2010. Assessment of heavy metal pollution in the urban stream sediments and its tributaries. *Journal of Environmental Science and Technology* 7(3), 435-446. <https://doi.org/10.1007/BF03326153>.
- Shakibayi, MR., Khosravan A., Farahmand A., Zare S., 2009. Remove the heavy metals copper and zinc from industrial waste from factories of Kerman by bacteria resistant mutant absorbing metal. *Journal of Kerman University of Medical Sciences* 16 (1), 13-34 (in Persian).
- Sutherland, R.A., 2000. Bed Sediment Associated Trace Metals in an Urban Stream, Oahu, Hawaii. *Environmental Geology* 39, 611-627. <https://doi.org/10.1007/s002540050473>.
- USEPA, 1996. United State Environmental Protection Agency: Method 3050B. Acid digestion of sediments, sludges, and soils, Revision 2. SW-846 – Test Methods for Evaluating Solid Waste: Physical/Chemical Methods. U.S. Government Printing Office, Washington, DC. In. <https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-06/documents/epa-3050b.pdf>.
- Zhang, L., Ye, X., Feng, H., Jing, Y., Ouyang, T., Yu X., Liang, R., Gao, C., Chen, W., 2007. Heavy metal contamination in western Xiamen Bay sediments and its vicinity. *China. Marine Pollution Bulletin* 54, 974-982. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2007.02.010>.