Integrated Watershed Management, Autumn, 2026, 6(3), 149-164 **Article Type: Research**

doi: 10.22034/iwm.2026.2077942.1253 **Online ISSN: 2783-4581**

Environmental Assessment of Heavy Metals in Water Resources of the Karaj Watershed: Toward Sustainable Water Resources Management

Mohamadreza Raeisi Dehkordi*, Amir Hossein Yeganeh Mazhar

Department of Civil Engineering Science and Research Branch Islamic Azad University, Tehran, Iran

*** Corresponding author**: mohammadreza.raeisi@srbiau.ac.ir

(Received: 18 November 2025 Revised: 06 February 2026 Accepted: 01 June 2026)

Extended Abstract

Introduction: Contamination of water resources by heavy metals, due to their high persistence, bioaccumulation potential, and toxic effects, is considered to be one of the serious challenges for sustainable water resources management in urban-industrial watersheds. The Karaj watershed, because of its population density, industrial and agricultural activities, is among the areas prone to this type of contamination. However, a comprehensive assessment of the spatial distribution and environmental status of heavy metals in the water resources of this watershed has received less attention. Therefore, the overall aim of this study is to spatially analyze and assess the risk of heavy metals in the groundwater resources of the Karaj watershed in order to provide management strategies for sustainable water resources development.

Materials and methods: Water samples were collected from 22 monitoring stations distributed across the Karaj watershed, covering the upstream, midstream, and downstream reaches. Sampling and analyses were conducted in collaboration with the Alborz Province Water and Wastewater Company. Concentrations of Arsenic (As), Nickel (Ni), and Chromium (Cr) were determined using standard methods recommended by the World Health Organization (WHO) and the Iranian National Standards (ISIRI 1053). Geographic coordinates of sampling points were recorded using GPS devices. To assess the spatial variability of metal concentrations, the Inverse Distance Weighting (IDW) interpolation method was applied in the ArcGIS environment. Three pollution indices were used to quantify the contamination levels: (1) the single-factor Pollution Index (PI), (2) the Heavy Metal Pollution Index (HPI), and (3) the Contamination Degree (Cd). The results of these indices were compared with the permissible limits of WHO and ISIRI standards. Statistical analyses were conducted using descriptive statistics and correlation analysis to evaluate the relationships among metals and identify potential pollution sources.

Results and Discussion: The concentrations of As, Ni, and Cr in all sampling sites were below the permissible limits of the WHO and ISIRI drinking water standards. Spatial interpolation maps revealed that the concentration gradients of heavy metals were generally uniform across the watershed, with slightly elevated values near agricultural and urban zones the downstream of the Karaj River. The calculated pollution indices indicated low contamination risk in all sampling locations: the maximum PI values were below 1, the mean HPI was significantly lower than the critical value of 100, and the Cd index approached zero. These findings suggest that the water quality in the Karaj watershed is within a safe range with respect to heavy metal pollution. The spatial uniformity of contamination patterns reflects the absence of major point-source pollution, implying that the detected concentrations primarily result from natural geochemical processes and limited non-point sources. The integration of GIS-based spatial analysis with pollution indices proved effective for identifying potential vulnerable zones and for supporting watershed-scale environmental management.

Conclusion: The concentrations of As, Ni, and Cr in the surface water resources of the Karaj watershed were below the applicable national and international permissible limits. Furthermore, the calculated pollution indices indicated no significant contamination. These findings suggest that heavy metal contamination in the surface water resources of the Karaj watershed is currently limited. The key findings are summarized as follows:

1. Water quality in the study area was within acceptable limits with respect to the heavy metals investigated.
2. Spatial variations in heavy metal concentrations were limited and appeared to be primarily associated with natural geological factors.
3. The PI, HPI, and Cd indices consistently indicated low levels of contamination, suggesting relatively good water quality with respect to heavy metal pollution.
4. Continued periodic monitoring, combined with spatial analysis techniques, could help identify potential changes in heavy metal concentrations associated with urban and agricultural development.

The analytical approach adopted in this study provides a preliminary framework for assessing heavy metal contamination in other watersheds across the country.

Keywords: Heavy metals, Heavy Metal Pollution Index (HPI), Inverse Distance Weighting (IDW), Karaj Watershed, Sustainable Water Resources Management.

Citation: Raeisi dehkordi, M. R. & Yeganeh Mazhar, A. H. (2026). Environmental Assessment of Heavy Metals in Water Resources of the Karaj Watershed: Toward Sustainable Water Resources Management. *Integrated Watershed Management*, 6(3), 149-164. https://doi.org/10.22034/iwm.2026.2077942.1253

Copyrights:
Copyright for this article is retained by the author(s), with publication rights granted to Integrated Watershed Management. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (http://creativecommons.org/licenses/ by/4.0).

مدیریت جامع حوزه‌های آبخیز، سال ششم، شماره سوم، پاییز ۱۴۰۵، صفحات (۱۶۴-۱۴۹) نوع مقاله: پژوهشی

شاپا الکترونیکی: ۴۵۸۱-۲۷۸۳ doi: 10.22034/iwm.2026.2077942.1253

ارزیابی محیط زیستی فلزات سنگین در منابع آب حوزه آبخیز کرج با رویکرد مدیریت پایدار منابع آب

محمدرضا رئیسی دهکردی*، امیرحسین یگانه مظهر

گروه عمران مدیریت ساخت و آب، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، تهران

***نویسنده مسئول:** mohammadreza.raeisi@srbiau.ac.ir

(**تاریخ دریافت:** ۱۴۰۴/۰۸/۲۷ **تاریخ بازنگری:** ۱۴۰۴/۱۱/۱۷ **تاریخ پذیرش:** ۱۴۰۵/۰۳/۱۱)

چکیده مبسوط

مقدمه: آلودگی منابع آب به فلزات سنگین به دلیل پایداری بالا، خاصیت تجمع‌زیستی و اثرات سمی، یکی از چالش‌های جدی مدیریت پایدار منابع آب در حوزه‌های آبخیز شهری-صنعتی محسوب می‌شود. حوزه آبخیز کرج به دلیل تراکم جمعیت، فعالیت‌های صنعتی و کشاورزی، از مناطق مستعد این نوع آلودگی است. با این حال، ارزیابی جامع از پراکنش مکانی و وضعیت محیط‌زیستی فلزات سنگین در منابع آب این حوزه کمتر مورد توجه قرار گرفته است. بنابراین، هدف کلی این پژوهش، تحلیل مکانی و ارزیابی خطر فلزات سنگین در منابع آب زیرزمینی حوزه آبخیز کرج به منظور ارائه راهکارهای مدیریتی برای توسعه پایدار منابع آب است.

مواد و روش‌ها: در این پژوهش از داده‌های پایش شرکت آب‌وفاضلاب استان البرز استفاده شد. نمونه‌برداری از ۱۲ ایستگاه در دو فصل در نقاط مختلف حوزه آبخیز کرج شامل بخش‌های بالادست، میانی و پایین‌دست انجام گرفت. مختصات جغرافیایی ایستگاه‌ها با استفاده از دستگاه GPS ثبت شد. غلظت فلزات سنگین آرسنیک، نیکل و کروم با بهره‌گیری از روش‌های استاندارد سازمان بهداشت جهانی (WHO) و مؤسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران (ISIRI 1053) اندازه‌گیری گردید. برای تحلیل مکانی، داده‌های مربوط به غلظت فلزات وارد محیط سامانه اطلاعات جغرافیایی (ArcGIS) شد و از روش درون‌یابی IDW جهت تهیه نقشه‌های توزیع مکانی استفاده گردید. به‌منظور ارزیابی سطح آلودگی از سه شاخص عددی استفاده شد. (۱)شاخص آلودگی تک عنصری (PI) جهت سنجش میزان آلودگی هر فلز نسبت به حد مجاز. (۲) شاخص آلودگی فلزات سنگین(HPI) برای ارزیابی آلودگی کلی چند فلز. (۳) شاخص درجه آلودگی (Cd) برای برآورد سطح کلی آلودگی محیطی. مقادیر این شاخص‌ها با حدود مجاز استانداردهای WHO و ISIRI مقایسه گردید. همچنین، از روش‌های آماری توصیفی و تحلیل همبستگی برای بررسی ارتباط میان غلظت فلزات استفاده شد.

نتایج و بحث: نتایج اندازه‌گیری‌ها نشان داد که غلظت فلزات سنگین آرسنیک، نیکل و کروم در کلیه ایستگاه‌های نمونه‌برداری کمتر از حدود مجاز استانداردهای WHOو ISIRI است. نقشه‌های درون‌یابی مکانی نیز حاکی از یکنواختی نسبی توزیع فلزات در سطح حوزه بوده و غلظت‌های بالاتر به طور جزئی در نواحی پایین‌دست و مجاور مناطق کشاورزی و شهری مشاهده شد. بر اساس محاسبات، مقادیر شاخص آلودگی PI برای تمام فلزات کمتر از ۱ بود که بیانگر وضعیت ایمن از نظر آلودگی فلزات سنگین است. مقدار میانگین شاخص آلودگی فلزات سنگین (HPI) بسیار پایین‌تر از مقدار بحرانی ۱۰۰ به دست آمد که نشانگر نبود خطر جدی آلودگی فلزی است. شاخص درجه آلودگی (Cd) نیز در تمامی ایستگاه‌ها نزدیک به صفر بود و حاکی از وضعیت بسیار مطلوب منابع آب سطحی از نظر تجمع فلزات سنگین می‌باشد. تحلیل همبستگی بین فلزات نشان داد که رابطه معنی‌دار بین آرسنیک و نیکل وجود ندارد و منشأ آلودگی‌ها بیشتر طبیعی و ناشی از ویژگی‌های زمین‌شناسی منطقه است تا منابع انسانی. در مجموع، نتایج نشان می‌دهد که حوزه آبخیز کرج در حال حاضر از نظر آلودگی فلزات سنگین در وضعیت پایدار قرار دارد و خطر محیط‌زیستی قابل‌توجهی مشاهده نمی‌شود.

نتیجه‌گیری: بر اساس یافته‌های این پژوهش، نتیجه‌گیری شد که غلظت فلزات آرسنیک، نیکل و کروم در منابع آب سطحی حوزه آبخیز کرج پایین‌تر از حدود مجاز بین‌المللی و ملی است و شاخص‌های آلودگی محاسبه‌شده نیز نشانگر نبود آلودگی معنی‌دار هستند. این نتایج تأکید می‌کند که حوزه آبخیز کرج در وضعیت محیط‌زیستی مطلوبی قرار دارد و از منظر فلزات سنگین تهدیدی متوجه منابع آب آن نیست. مهم‌ترین نتایج به‌دست‌آمده عبارت‌اند از:

۱) وضعیت کیفی آب در محدوده مورد مطالعه در سطح ایمن و قابل‌قبول است.

۲) تغییرات مکانی فلزات سنگین ناچیز و به طور عمده تحت‌تأثیر عوامل زمین‌شناسی طبیعی می‌باشد.

۳) شاخص‌های PI، HPI و Cd هر سه مؤید پایین‌بودن سطح آلودگی و پایداری کیفی منابع آب هستند.

۴) تداوم پایش‌های دوره‌ای و استفاده از روش‌های مکانی می‌تواند در شناسایی تغییرات احتمالی ناشی از توسعه شهری و کشاورزی مؤثر باشد.

روش تحلیلی مورداستفاده در این پژوهش می‌تواند به‌عنوان الگویی مقدماتی برای ارزیابی آلودگی فلزات سنگین در سایر حوزه‌های آبخیز کشور مورد استفاده قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: فلزات سنگین، شاخص آلودگی فلزات، درون‌یابی فاصله معکوس، حوزه آبخیز کرج، مدیریت پایدار منابع آب

استناد: رئیسی‌دهکردی، م.ر.، و یگانه مظهر، ا.ح. (۱۴۰۵). ارزیابی محیط زیستی فلزات سنگین در منابع آب حوزه آبخیز کرج با رویکرد مدیریت پایدار منابع آب. *مدیریت جامع حوزه های آبخیز*، ۶(۳)، ۱۶۴-۱۴۹. https://doi.org/10.22034/iwm.2026.2077942.1253

حق چاپ:

حق چاپ برای نویسنده (گان) این مقاله محفوظ است. بر اساس قوانین انتشارات با دسترسی آزاد، تمام مطالعات چاپ شده در این نشریه به‌صورت آزاد در وب‌سایت نشریه برای عموم بدون پرداخت هزینه قابل‌دسترس است.

مقدمه

در دهه‌های اخیر، رشد شتابان شهرنشینی و فعالیت‌های صنعتی سبب شده است که کیفیت منابع آب در بسیاری از مناطق کشور با چالش جدی روبه‌رو شود. از طرفی منابع آب سطحی به‌عنوان یکی از ارکان اصلی نظام‌های محیط‌زیستی و توسعه پایدار، نقش مهمی در تأمین آب شرب، کشاورزی و صنعت دارند (Raeisi dehkordi *et al*., 2023). بااین‌حال، افزایش جمعیت، توسعه شهری و فعالیت‌های صنعتی در دهه‌های اخیر موجب ورود انواع آلاینده‌ها ازجمله فلزات سنگین به منابع آب شده است (Singh *et al*., 2024). فلزات سنگین نظیر سرب (Pb)، کادمیوم (Cd)، نیکل (Ni)، مس (Cu) و روی (Zn) به دلیل پایداری بالا، خاصیت تجمع زیستی و اثرات سمی بر موجودات زنده، از مهم‌ترین آلاینده‌های غیرآلی محسوب می‌شوند که می‌توانند تعادل بوم‌شناختی حوزه‌های آبخیز را مختل کنند (Huang *et al*., 2024).

در حوزه‌های آبخیز شهری و نیمه‌صنعتی، ترکیب پیچیده‌ای از منابع آلاینده شامل پساب‌های صنعتی، فاضلاب شهری، رواناب‌های سطحی و فرسایش خاک منجر به ورود تدریجی فلزات سنگین به شبکه‌های آب سطحی می‌شود. این پدیده نه‌تنها کیفیت آب را کاهش می‌دهد، بلکه چرخه‌های زیستی را در نظام‌های رودخانه‌ای تحت‌تأثیر قرار می‌دهد (Crispin & Parthasarathy, 2025). ازاین‌رو، شناسایی الگوی مکانی آلودگی و ارزیابی میزان خطرات محیط‌زیستی ناشی از آن، گامی اساسی در مدیریت کیفی منابع آب و تصمیم‌سازی‌های حوزه آبخیز است.

تحلیل مکانی با استفاده از سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی (GIS) و شاخص‌های آلودگی نظیر (PI[1])، (HPI[2]) و(Cd[3]) ابزاری کارآمد برای تعیین گستره، شدت و منشأ احتمالی آلودگی در محیط‌های آبی به شمار می‌رود. این روش‌ها با تلفیق داده‌های مکانی و کیفی، امکان شناسایی نواحی بحرانی و اولویت‌بندی مدیریتی را فراهم می‌سازند (Aparisi-Navarro *et al*., 2025). افزایش فعالیت‌های صنعتی و تمرکز جمعیتی در سال‌های اخیر، موجب رشد قابل‌توجه آلاینده‌های محیطی و به‌ویژه تغییرات کیفی در منابع آب‌وخاک کشور شده است. بررسی‌های انجام‌شده در مناطق صنعتی ایران نیز نشان داده‌اند که آلودگی‌های محیط‌زیستی صرفاً پیامدهای بوم‌شناختی ندارند، بلکه بر ابعاد اجتماعی و سلامت جامعه نیز تأثیرگذارند (Mousavipoor *et al*., 2022).

حوزه آبخیز کرج به دلیل موقعیت خاص جغرافیایی، تراکم بالای جمعیت، فعالیت‌های صنعتی و وجود مسیرهای انتقال پساب‌های شهری، یکی از مناطق مستعد آلودگی فلزات سنگین در کشور محسوب می‌شود. بررسی‌های پراکنده در سال‌های گذشته عمدتاً به جنبه‌های کمی منابع آب پرداخته‌اند و ارزیابی جامع از وضعیت کیفی و پراکنش فلزات سنگین در این حوزه کمتر موردتوجه قرار گرفته است (Borji Hassangavyar *et al*., 2021).

براین‌اساس، هدف از پژوهش حاضر تحلیل مکانی و ارزیابی محیط‌زیستی فلزات سنگین در منابع آب سطحی حوزه آبخیز کرج با رویکرد مدیریت پایدار منابع آب است. این مطالعه با ترکیب داده‌های اندازه‌گیری میدانی و تحلیل‌های جغرافیایی، به دنبال تبیین وضعیت کنونی آلودگی فلزات سنگین، شناسایی مناطق بحرانی و ارائه راهکارهایی جهت مدیریت کیفی پایدار منابع آب می‌باشد.

در راستای درک بهتر از وضعیت آلودگی فلزات سنگین در منابع آب و جایگاه این مسئله در مدیریت حوزه‌های آبخیز، مرور پژوهش‌های انجام‌شده در داخل و خارج از کشور می‌تواند به تبیین رویکردها، شاخص‌ها و نتایج مطالعات پیشین کمک نماید.

[1] Pollution Index

[2] Heavy Metal Pollution Index
[3] Contamination Degree

در مطالعه‌ای که توسط Fazel Tavassol و همکاران (۲۰۱۷) انجام شده است، ۳۲ نمونه آب زیرزمینی را طی فصول مختلف با استفاده از دستگاه طیف‌سنجی جذب اتمی (AAS[۴]) بررسی کردند و غلظت فلزات جیوه (Hg)، کُبالت (Co)، مس، روی، نیکل، کروم و سرب را با حدود مجاز WHO و استانداردهای ایران سنجیدند. نتیجه‌ی کلیدی آن بود که به طور میانگین اغلب فلزات زیر حدود مجاز بودند، اما در برخی نقاط جیوه و آرسنیک از حد مجاز فراتر رفتند؛ نویسندگان منشأهای انسانی (ازجمله گذر کانال فاضلاب رواناب شهری حِصارک–قزلحصار) را در آلودگی‌های موضعی محتمل دانستند. Ghalandarzadeh و همکاران (2020) رودخانه کرج را به عنوان یکی از مؤلفه‌های کلیدی حوزه آبخیز کرج مورد مطالعه قرار دادند. این تحقیق در سال ۲۰۱۸ و در ۷ ایستگاه انجام شد. آن‌ها غلظت فلزات کادمیوم، کروم و روی را در آب و رسوب با استفاده از دستگاه ICP اندازه‌گیری کردند. همچنین شاخص زیستی Z محاسبه گردید. یافته مهم این پژوهش نشان داد که غلظت فلزات از بالادست به پایین‌دست افزایش معنی‌داری دارد. همچنین وضعیت آلودگی در تابستان بدتر از زمستان بود. نویسندگان علت این پدیده را تخلیه‌های شهری، صنعتی و کشاورزی در مناطق پایین‌دست دانستند. این نتایج شواهد تجربی قوی از تأثیر تراکم جمعیت، فعالیت‌های خدماتی-صنعتی و مسیرهای پساب بر بدنه‌های آبی حوزه کرج ارائه می‌دهد و تصویر کیفی منطقه را تکمیل می‌کند. Eslami و همکاران (2022) در تحقیق خود نمونه‌های آب زیرزمینی آشامیدنی منطقه جنوب‌شرقی ایران را مورد بررسی قرار دادند و غلظت فلزات سمی مانند سرب، کادمیوم، نیکل، روی و غیره را اندازه‌گیری کردند. علاوه بر آن، توزیع فضایی (نقشه‌برداری) و ارزیابی ریسک سلامت بر اساس مصرف آب انجام شد. نتایج نشان داد که در بعضی مناطق سطح فلزات نزدیک یا فراتر از حد مجاز است و ریسک برای بعضی گروه‌ها قابل‌توجه محسوب می‌شود. Aghamirzadeh و همکاران (2022) به بررسی تغییرات غلظت عنصر آلومینیوم در منابع آب سطحی (رودخانه شور) و زیرزمینی (قنوات و چاه‌ها) در حوزه آبخیز سرچشمه کرمان پرداختند. نمونه‌برداری در دو فصل تر و خشک انجام و با استفاده از آزمون آماری t-test، تفاوت‌های فصلی و مکانی بررسی شد. نتایج نشان داد که بیشترین غلظت آلومینیوم در نزدیکی معدن مس سرچشمه مشاهده شده (بین ۱ تا ۱/۷۷ میلی‌گرم بر لیتر) و با افزایش فاصله از معدن، غلظت کاهش می‌یابد. همچنین غلظت آلومینیوم در آب‌های سطحی فصل تر و در آب‌های زیرزمینی فصل خشک بالاتر از سایر مقاطع بود. میزان آلومینیوم در بیشتر نمونه‌ها از حد مجاز سازمان جهانی بهداشت فراتر رفت و آب منطقه برای شرب نامناسب ارزیابی شد. Raeisi Dehkordi & Yeganeh Mazhar (2023) به‌منظور بهینه‌سازی ضرایب پویآبی[۵] و شبیه‌سازی جریان و انتقال آلودگی در آبخوان دامنه–داران از مدل عددی GMS[۶] و ماژول‌های MODFLOW، MT3DMS و MODPATH استفاده کردند. نتایج مدل نشان داد دقت شبیه‌سازی بسیار بالا بوده (ضریب تعیین بیش از ۰/۹۹) و در بخش‌هایی از آبخوان غلظت نیترات تا بیش از ۸۰ میلی‌گرم بر لیتر افزایش یافته است که بیانگر گسترش ناحیه آلودگی و تأثیر مستقیم بهره‌برداری بی‌رویه و خشکسالی بر افت سطح آب و تشدید آلودگی می‌باشد. این پژوهش با ترکیب مدل جریان و مدل انتقال، الگویی کاربردی برای تحلیل رفتار آلودگی در آبخوان‌های مشابه، ازجمله حوزه آبخیز کرج فراهم می‌کند. در مطالعه‌ای دیگر که توسط Younesi Baneh و همکاران (2024) در استان کردستان انجام شده، ۱۵۵ نمونه‌ی چاه‌ها و چشمه‌ها با دستگاه ICP-MS برای ۲۰ فلز ردیابی شدند؛ سپس ارزیابی ریسک

[4] Atomic Absorption Spectrometry
[5] Hydrodinamic
[6] Groundwater Modeling System

سلامت (HQ/HI و ریسک سرطان‌زایی) برای گروه‌های سنی انجام شد. نتایج نشان داد برخی فلزات مثل آرسنیک و Li ریسک غیرسرطان‌زایی قابل ملاحظه‌ای ایجاد می‌کنند و ریسک سرطان‌زاییِ سرب از حدود راهنما فراتر است.

باتوجه‌به اهمیت مدیریت کیفی منابع آب و لزوم شناسایی دقیق مناطق بحرانی در حوزه آبخیز کرج، انجام تحلیل‌های مکانی و شاخصی می‌تواند تصویری جامع از وضعیت کنونی آلودگی فلزات سنگین ارائه دهد. براین‌اساس، در ادامهٔ این پژوهش، با بهره‌گیری از داده‌های میدانی و ابزارهای سامانه اطلاعات جغرافیایی، شاخص‌های کمی آلودگی شامل PI، HPI و Cd محاسبه و توزیع مکانی آن‌ها در محدوده مورد مطالعه تحلیل شده است. نوآوری و اهمیت پژوهش حاضر در آن است که برای نخستین بار در منطقه مورد مطالعه، وضعیت فلزات سنگین در منابع آب با رویکردی ترکیبی شامل ۱) سنجش آزمایشگاهی غلظت عناصر، ۲) تحلیل سه شاخص تجمیعی HPI، PImax و CD، و ۳) مدل‌سازی و نمایش الگوی مکانی غلظت فلزات با استفاده از GIS و روش درون‌یابی معکوس وزنی فاصله[۷] ارزیابی شد. نتایج این مطالعه به‌عنوان یک داده پایه[۸] می‌تواند در برنامه‌ریزی‌های مدیریتی و پایش بلندمدت کیفیت آب منطقه مورد استفاده قرار گیرد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

حوزه آبخیز کرج در شمال‌غربی استان تهران و بخشی از استان البرز کنونی واقع شده است. این حوزه از نظر موقعیت جغرافیایی بین طول‌های جغرافیایی "۲۳ '۵۴ °۵۰ تا "۵۹ '۵۷ °۵۰ شرقی و عرض‌های جغرافیایی "۳۴ '۴۲ °۳۵ تا "۳۲ '۴۶ °۳۵ شمالی گسترش یافته است. محدوده ارتفاعی حوزه از حدود۸۰۰ متر در پایین‌دست تا ۴۹۰۰ متر در ارتفاعات البرز مرکزی متغیر است. میانگین بارندگی سالانه در این حوزه حدود ۶۲۵ میلی‌متر گزارش شده است که عمدتاً به صورت برف در ارتفاعات و باران در مناطق پست فرو می‌ریزد (BorjiHassangavyar *et al.*, 2023). از نظر اقلیمی، حوزه آبخیز کرج در پهنه‌ای با شرایط نیمه‌مرطوب تا نیمه‌خشک قرار دارد؛ به‌طوری که مناطق مرتفع شمالی دارای اقلیم سرد کوهستانی و بخش‌های جنوبی آن از اقلیم نسبتاً خشک برخوردار هستند (Masoodiyan, 2003). میانگین دمای سالانه در محدوده مورد مطالعه بین ۸ تا ۲۱ درجه سلسیوس در نوسان است. حوزه آبخیز کرج در بخش‌های شهری و روستایی پیرامون شهر کرج واقع شده و به دلیل نزدیکی به مراکز جمعیتی، توسعه سریع شهرنشینی و استقرار فعالیت‌های خدماتی و صنعتی، تحت فشارهای متعددی از نظر بهره‌برداری و کیفیت منابع آب قرار دارد. مساحت کل حوزه حدود ۱۰۰۰ کیلومترمربع برآورد شده است. منابع آب مورد بررسی در این مطالعه عمدتاً چاه‌های تأمین آب هستند که در محدوده امور فردیس پراکنده‌اند و به‌عنوان یکی از مهم‌ترین منابع تأمین آب منطقه نقش دارند (Aghamirzadeh *et al.*, 2022).

روش تحقیق

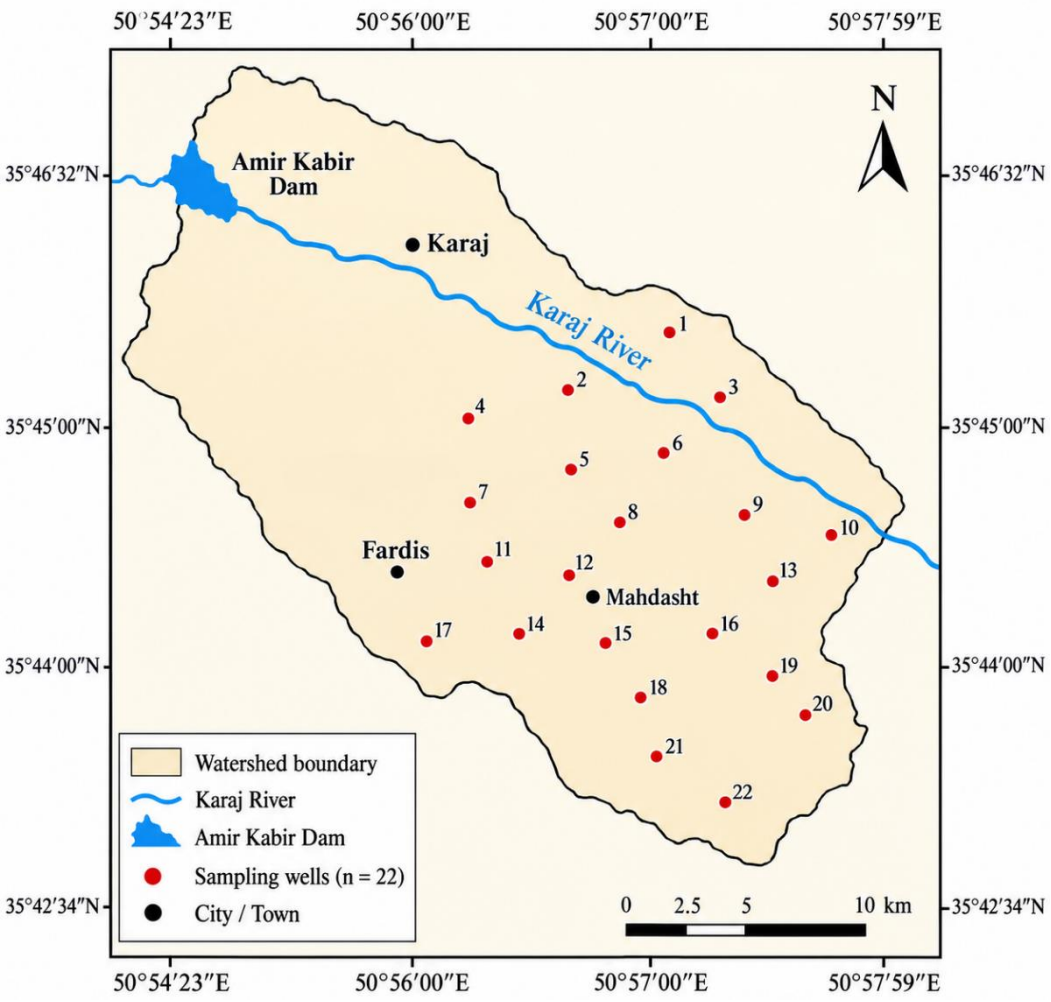
داده‌های مورد استفاده در این پژوهش، حاصل پایش‌های دوره‌ای شرکت آب‌وفاضلاب استان البرز است که از ۲۲ حلقه چاه تأمین آب در محدوده امور فردیس در دو فصل تر و خشک (فروردین و مهر ۱۴۰۲) جمع‌آوری شده است. بدین ترتیب امکان مقایسه تغییرات فصلی فراهم گردید. موقعیت مکانی چاه‌ها به‌صورت دقیق ثبت شده است و این اطلاعات در مرحله تحلیل‌های مکانی و تهیه نقشه‌های توزیع فضایی فلزات سنگین در محیط GIS مورد استفاده قرار گرفت.

به دلیل محدودیت دسترسی به داده‌های پایش، پراکنش نقاط نمونه‌برداری کاملاً یکنواخت نمی‌باشد. با

[۷] IDW

[۸] Baseline

این وجود، ایستگاه‌های موجود نماینده شرایط غالب کاربری زمین در محدوده امور فردیس هستند و امکان ارزیابی واقع‌بینانه از وضعیت منابع آب زیرزمینی را فراهم می‌کنند. موقعیت منطقه و ایستگاه‌های نمونه‌برداری در شکل ۱ نمایش داده شده است. از نظر اقلیمی، منطقه مورد مطالعه در پهنه‌ای با شرایط نسبتاً خشک تا نیمه‌خشک قرار دارد که نوسانات بارندگی و تفاوت محسوس بین فصل‌های تر و خشک می‌تواند بر سطح ایستابی، میزان تغذیه آبخوان و همچنین غلظت املاح و عناصر در آب زیرزمینی اثرگذار باشد. علاوه بر عوامل طبیعی، فشارهای انسانی ناشی از توسعه سکونتگاه‌ها، فعالیت‌های صنعتی و خدماتی، تردد و حمل‌ونقل شهری، و همچنین ورود احتمالی پساب‌های شهری و رواناب‌های سطحی می‌توانند به عنوان منابع بالقوه ورود فلزات سنگین به منابع آب زیرزمینی مطرح شوند. با توجه به نقش کلیدی چاه‌های تأمین آب در تأمین آب شرب و مصارف شهری محدوده فردیس، ارزیابی غلظت فلزات سنگین و تحلیل شاخص‌های مدیریتی در این منطقه می‌تواند اطلاعات پایه و کاربردی برای برنامه‌ریزی‌های پایش دوره‌ای، مدیریت کیفیت منابع آب و کاهش ریسک‌های بالقوه محیط‌زیستی و بهداشتی فراهم کند.



شکل ۱ – موقعیت منطقه مورد مطالعه (دشت تهران–کرج)

Figure 1 – Geographic location of the study area (Tehran–Karaj Plain)

داده‌های مورد استفاده در این تحقیق از شرکت آب‌وفاضلاب استان البرز دریافت شده است. مجموعه داده شامل ۲۲ نمونه از ۲۲ منبع و کُد یکتای بهره‌برداری (MIS) است که در بازه زمانی

۱۴۰۱/۰۸/۲۸ تا ۱۴۰۴/۰۱/۳۱ برداشت و آزمون شده‌اند. در مجموع ۲۴ نمونه آب در دو دوره زمانی برداشت شد؛ به‌طوری‌که ۱۲ نمونه در فصل‌تر (اوایل فصل بهار، ماه فروردین) و ۱۲ نمونه در فصل خشک (اوایل فصل پاییز، ماه مهر) جمع‌آوری و آنالیز گردید. از نظر کاربری محل، ۱۵ نمونه شهری و ۷ نمونه روستایی گزارش شده است. برای هر نمونه، مختصات طول و عرض جغرافیایی، تاریخ آزمون، و نتایج سنجش فلزات و ریزآلایش‌ها ثبت شده است. فلزات و عناصر اندازه‌گیری‌شده در این پژوهش عبارت‌اند از آرسنیک، کروم‌کل، کادمیوم، مس، سرب، نیکل، روی، آهن و منگنز که غلظت کلیه فلزات سنگین اندازه‌گیری‌شده در این پژوهش بر حسب میکروگرم بر لیتر (µg/L) گزارش شده است تا امکان مقایسه مستقیم با حدود مجاز استانداردهای ملی (ISIRI 1053) و بین‌المللی WHO فراهم گردد.

در این مجموعه، مقادیر آهن برای اغلب نمونه‌ها ثبت نشده و در تحلیل‌های شاخصی لحاظ نشده است. برای اندازه‌گیری غلظت فلزات، از دستگاه ICP-MS استفاده شده است. نمونه‌ها پس از برداشت، در ظروف پلی‌اتیلنی از پیش اسیدشویی شده نگهداری و به منظور حذف ذرات معلق، از فیلتر غشایی عبور داده شدند. باتکیه‌بر پروتکل‌های آزمایشگاهی آبفا و استانداردهای مرجع آزمون آب، فرایند کنترل کیفیت به‌صورت زیر در نظر گرفته شد(Al-Hakkani, 2019):

۱) استفاده از محلول‌های استاندارد گواهی‌شده برای سامانکاری[9] دستگاه؛
۲) اجرای شاهد واقعی و میانی در هر شیفت؛
۳) اندازه‌گیری نمونه تکراری[10] برای حداقل ۱۰ درصد نمونه‌ها؛
۴) پایش خطی‌بودن منحنی سامانکاری ($R^2 \geq 0.995$)؛
۵) گزارش و حذف مقادیر خارج از محدوده تشخیصی دستگاه (LOD/LOQ) یا جای‌گذاری آن‌ها بر مبنای روال‌های پذیرفته (مثلاً LOQ/√2) در تحلیل‌های آماری، در صورت نیاز.

استانداردهای مرجع و حدود مجاز

برای قضاوت مدیریتی درباره کیفیت، غلظت فلزات با راهنمای سازمان بهداشت جهانی[11] و استاندارد ملی آب شرب ایران (استاندارد ۱۰۵۳ مؤسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران) مقایسه می‌شود. به‌منظور تبدیل داده‌های تک پارامتری به ارزیابی مدیریتی - ترکیبی، از شاخص‌های رایج کیفیت آلودگی فلزات استفاده شد:

۱) شاخص آلودگی تک‌عاملی (Single-Factor PI)

شاخص آلودگی تک‌عاملی (PI) برای هر فلز مطابق رابطه (۱) از نسبت غلظت اندازه‌گیری‌شده به حد مجاز استاندارد محاسبه شد:

$$\frac{C_i}{S_i} = PI_i \qquad (۱)$$

که در رابطه ۱ C_i غلظت اندازه‌گیری‌شده و S_i حد راهنمای استاندارد (WHO) است. برای ارزیابی کلی، از آمارهایی مانند PI_{max} (بدترین حالت)، $\bar{PI}$ (میانگین شاخص‌ها) یا توزیع فراوانی PI استفاده می‌شود.

شاخص آلودگی فلزات سنگین (HPI)

شاخص HPI معیاری جامع برای تعیین میزان تأثیر همزمان چند فلز سنگین بر کیفیت محیط مورد مطالعه بوده و مقادیر بالای آن نشان‌دهنده آلودگی شدیدتر است. این شاخص با در نظر گرفتن غلظت اندازه‌گیری‌شده هر فلز، حداکثر مجاز آن (Standard) و وزن سمیت (Wi) مرتبط با هر عنصر، یک عدد واحد ارائه می‌دهد که امکان مقایسه کمی بین ایستگاه‌های مختلف را فراهم می‌کند. به عبارت دیگر، HPI نه‌تنها

[9] calibtation
[10] Duplicate
[11] WHO

شدت آلودگی بلکه سهم هر فلز را در آلودگی کل منعکس می‌سازد و مقادیر کمتر از ۱۰۰ بیانگر آلودگی قابل قبول و مقادیر بالاتر از ۱۰۰ نشان‌دهنده آلودگی بحرانی است (Mohan *et al*., 1996).

برای محاسبه شاخص کیفیت هر فلز (Q_i) در شاخص HPI، از رابطه (۲) استفاده شد و همچنین پس از محاسبه شاخص کیفیت هر عنصر، مقدار شاخص آلودگی فلزات سنگین (HPI) بر اساس میانگین وزنی شاخص‌های کیفیت مطابق رابطه (۳) محاسبه گردید:

$$\frac{M_i - I_i}{S_i - I_i} = Q_i \qquad (۲)$$

$$\frac{\sum_{i=1}^{n} W_i Q}{\sum_{i=1}^{n} W_i} = HPI \qquad (۳)$$

که در آن M_i غلظت مشاهده‌شده، S_i حد استاندارد و I_i مقدار ایده‌آل (معمولاً صفر برای اغلب فلزات) است. وزن‌ها W_i بر پایه اهمیت نسبی یا رویکرد وزن‌دهی برابر تعیین می‌شوند (با گزارش شفاف روش وزن‌دهی).

درجه آلودگی(Cd Index)

شاخص درجه آلودگی (Cd) برخلاف HPI که جنبه وزنی دارد، بر پایه جمع ساده نسبت غلظت هر فلز به مقدار مجاز یا زمینه آن بنا شده و برای شناسایی نواحی با آلودگی بحرانی به کار می‌رود. در این روش ابتدا برای هر فلز، فاکتور آلودگی (Cf) محاسبه شده و سپس مجموع این فاکتورها، شاخص نهایی Cd را به دست می‌دهد. بر اساس طبقه‌بندی رایج، مقادیر Cd کمتر از ۱/۵ نشان‌دهنده آلودگی خیلی کم، ۱/۵ تا ۲ آلودگی کم، ۲ تا ۴ آلودگی متوسط، ۴ تا ۸ آلودگی زیاد و بیشتر از ۸ نشان‌دهنده آلودگی بسیار زیاد است. (Hakanson, 1980)

در مرحله نخست، فاکتور آلودگی هر فلز (C_f^i) مطابق رابطه (۴) محاسبه شد و سپس با جمع فاکتورهای آلودگی تمامی عناصر، مقدار شاخص درجه آلودگی (CD) مطابق رابطه (۵) به‌دست آمد:

برای مقادیر $S_i < C_i$

$$C_f^i \sum_{i=1}^{n} = CD \qquad (۴)$$

$$1 - \frac{C_i}{S_i} = C_f^i \qquad (۵)$$

این شاخص، میزان مازاد غلظت فلزات سنگین نسبت به حدود استاندارد را به‌صورت تجمیعی نشان می‌دهد و برای اولویت‌بندی نقاط بحرانی آلودگی مناسب است.

پردازش داده‌ها و تحلیل آماری

پیش‌پردازش شامل پالایش مقادیر صفر، یکسان‌سازی واحدها و محاسبه شاخص‌ها بود. آمار توصیفی (میانگین، میانه، انحراف معیار و دامنه) برای هر عنصر استخراج شد. برای بررسی نرمال بودن توزیع داده‌ها، از آزمون Shapiro-Wilk استفاده گردید. نتایج آزمون نشان داد که داده‌های آرسنیک (p=0.083)، کروم (p=0.112) و نیکل (p=0.067) در سطح اطمینان ۹۵ درصد دارای توزیع نرمال هستند (p>0.05)؛ بنابراین نیازی به تبدیل لگاریتمی داده‌ها نبود. اختلافات بین نمونه‌های شهری و روستایی با استفاده از آزمون t-test (به دلیل نرمال بودن داده‌ها) بررسی شد. تمام محاسبات عددی اولیه در نرم‌افزارهای Excel و Python انجام گردید.

تحلیل مکانی

به منظور نمایش الگوهای فضایی غلظت فلزات سنگین آرسنیک، کروم و نیکل و شاخص‌های آلودگی (PI~max~ HPI)، از روش‌های درون‌یابی در محیط ArcGIS استفاده گردید. ابتدا واریوگرافی تجربی برای هر سه فلز محاسبه شد. مدل‌های نظری کروی[۱۲]، نمایی[۱۳] و گوسی[۱۴] بر داده‌ها برازش یافتند و بر اساس کمترین مقدار RSS[۱۵] و بالاترین R^2، مدل کروی به عنوان مدل برتر انتخاب گردید. نسبت اثر قطعه‌ای به آستانه (Nugget/Sill) برابر ۰/۲۲ محاسبه شد که نشان‌دهنده همبستگی فضایی قوی در دامنه تقریبی

[12] Spherical
[13] Exponential
[14] Gaussian
[15] Residual Sum of Squares

۳۸۵۰ متر می‌باشد. سپس سه روش درون‌یابی IDW با توان‌های ۱، ۲ و ۳، کریجینگ معمولی[16] و کریجینگ ساده[17] با یکدیگر مقایسه شدند. ارزیابی دقت با استفاده از اعتبارسنجی متقابل[18] انجام گرفت. معیارهای ارزیابی شامل ریشه میانگین مجذور مربعات خطا[19]، میانگین خطای مطلق[20]، ضریب تعیین[21] و میانگین خطای اریبی[22] محاسبه گردید. نتایج اعتبارسنجی متقابل در جدول ۱ ارائه شده است. روش IDW با توان ۲ با کمترین مقدار RMSE (۰/۳۹ میکروگرم بر لیتر)، کمترین MAE (۰/۳۰ میکروگرم بر لیتر) و بالاترین R^2 (۰/۸۵) نسبت به سایر روش‌ها عملکرد بهتری داشت. همچنین مقدار MBE نزدیک به صفر (۰/۰۱- میکروگرم بر لیتر) نشان‌دهنده عدم وجود اریبی Systematic در تخمین‌ها است. بر این اساس و با توجه به سادگی محاسباتی IDW در مقایسه با کریجینگ، روش IDW با توان ۲ برای تهیه نقشه‌های توزیع مکانی فلزات سنگین و شاخص‌های آلودگی انتخاب گردید.

جدول ۱- ارزیابی دقت روش‌های درون‌یابی برای فلز آرسنیک با اعتبارسنجی متقابل

Table 1- Accuracy assessment of interpolation methods for Arsenic using cross-validation

روش درون‌یابی	MBE (µg/L)	R^2	MAE (µg/L)	RMSE (µg/L)
IDW (Power=1)	-0.03	0.74	0.41	0.52
IDW (Power=2)	**-0.01**	**0.85**	**0.30**	**0.39**
IDW (Power=3)	-0.02	0.79	0.37	0.46
کریجینگ معمولی - مدل کروی	-0/04	0/82	0/34	0/44
کریجینگ ساده - مدل کروی	0/03	0/8	0/36	0/47

مقایسه و داوری مدیریتی

نتایج شاخص‌ها و نقشه‌های خطر به‌صورت دوگانه گزارش می‌شوند:

۱) در سطح هر نقطه نمونه‌برداری شده برای شناسایی نقاط بحرانی؛

۲) در سطح خُردحوضه/محدوده خدماتی برای توصیه‌های مدیریتی.

آستانه‌های تصمیم‌گیری (مثلاً $HPI>100$، $PI_{max}>1$ یا $Cd>0$) برای علامت‌گذاری وضعیت‌های نیازمند مداخله استفاده می‌شود، سپس پیامدهای مدیریتی (پایش افزوده، مدیریت پساب، بهسازی سامانه‌های تصفیه، مدیریت بهره‌برداری) تدوین می‌گردد.

بحث

نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل آماری و شاخصیِ داده‌های ۲۲ نمونه چاه‌های آب در محدوده امور فردیس (مشکین‌دشت) نشان داد که وضعیت فلزات سنگین در منابع آب سطحی بهره‌برداری‌شده به‌طورکلی مطلوب است و از حدود راهنمای WHO و استاندارد ملی ایران (۱۰۵۳) تجاوزی مشاهده نشد. میانگین و بیشینه عناصر کلیدی به‌صورت زیر گزارش شد: آرسنیک با میانگین ۱/۳۹ و بیشینه ۲/۲ میکروگرم بر لیتر (µg/L)، نیکل با میانگین ۷/۴۸ و بیشینه ۲۷/۳ µg/L حد مجاز ۷۰، کروم کل با میانگین ۶/۸۹ و بیشینه ۱۶/۱ µg/L حد مجاز ۵۰، روی با میانگین ۳/۴۸ و بیشینه ۸/۸۴ µg/L حد مجاز ۳۰۰۰ و منگنز با میانگین ۰/۱۰ و بیشینه ۱ µg/L حد مجاز ۴۰۰. مقادیر مس در همه نمونه‌ها بسیار پایین (میانگین ۰/۱۶، بیشینه ۲ µg/L در برابر حد مجاز ۲۰۰۰) و مقادیر سرب و کادمیوم در این مجموعه صفر گزارش شده‌اند. این الگوی کمّی، در کنار فقدان هرگونه رخداد

[16] Ordinary Kriging
[17] Simple Kriging
[18] Leave-One-Out Cross-Validation)
[19] RMSE
[20] MAE
[21] R^2
[22] MBE

تجاوز از استاندارد برای تمام پارامترها، دلالت بر خطر پایینِ آلودگی فلزات سنگین در مقطع زمانی نمونه‌برداری دارد. برای بررسی وضعیت فلزات سنگین در منابع آب زیرزمینی منطقه، پارامترهای آماری اصلی شامل حداقل، حداکثر، میانگین، میانه و انحراف معیار برای هر عنصر به دست آمد. نتایج این محاسبات در جدول ۲ ارائه شده است. همچنین حدود مجاز سازمان جهانی بهداشت (WHO, 2022) و استاندارد ملی ایران (ISIRI 1053) جهت مقایسه آورده شده‌اند.

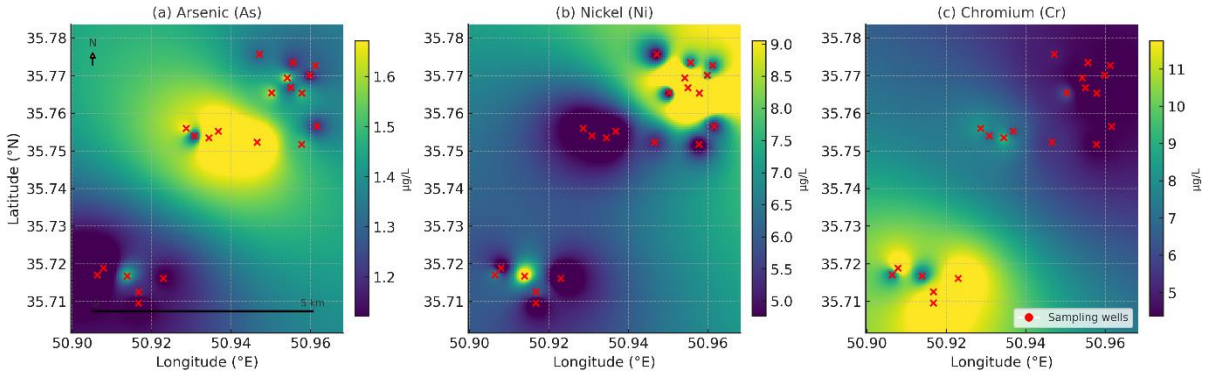
جدول ۲- شاخص‌های آماری غلظت فلزات سنگین بر حسب میکروگرم بر لیتر (µg/L) در نمونه‌های آب زیرزمینی حوزه آبخیز کرج و مقایسه با حدود مجاز ملی و بین‌المللی

Table 2- Statistical parameters of heavy metal concentrations (µg/L) in groundwater samples of the Karaj watershed and comparison with national and international standards

ISIRI limit	WHO limit	Std. Dev	Median	Mean	Max	Min	Metal
10	10	0.47	1.3	1.39	2.2	0.2	As
50	50	3.15	6.2	6.89	16.1	2.1	Cr
3	3	0	0	0	0	0	Cd
2000	2000	0.37	0	0.16	2	0	Cu
10	10	0	0	0	0	0	Pb
70	70	5.02	6.9	7.48	27.3	2.2	Ni
3000	3000	7.61	2.1	3.48	84.8	0.3	Zn
400	400	0.27	0	0.10	1	0	Mn
300	300	0.06	0.05	0.07	0.2	0	Fe

همان‌طور که مشاهده می‌شود، غلظت تمام فلزات اندازه‌گیری‌شده کمتر از حدود مجاز استانداردهای ملی و جهانی است. بیشترین مقادیر مربوط به نیکل و کروم بوده که در هیچ نمونه‌ای از حد مجاز فراتر نرفته‌اند. در مقابل، سرب و کادمیوم در تمامی نمونه‌ها کمتر از حد تشخیص گزارش شده‌اند.

از منظر شاخص‌های تجمیعی، مقدار HPI با وزن‌دهی برابر و $I_i = 0$ در دامنه ۳/۱۰ تا ۶/۴۹ با میانگین ۴/۲۸ برآورد شد؛ که فاصله معنی‌دار با آستانه‌های هشدار مدیریتیِ رایج (مثلاً $HPI \approx 100$) دارد و در طبقه خطر پایین قرار می‌گیرد. شاخص PI_{max}(بدترین نسبت S_i و C_i در هر نمونه) نیز در بازه ۰/۱۱ تا ۰/۳۹ قرار گرفت و هرگز به ۱ نزدیک نشد؛ بدین معنی که حتی بیشترین نسبت مشاهده‌شده هم کمتر از ۴۰ درصد حد مجاز بوده است. همچنین شاخص CD (درجه آلودگی به‌معنای مجموع مازادها) برای همه نمونه‌ها صفر به دست آمد، زیرا هیچ پارامتری از حد استاندارد فراتر نرفت. این هم‌گراییِ سه شاخص < 1، پایین HPI و PI_{max}=0 تصویری سازگار و اطمینان‌بخش از کیفیت مطلوب آب از نظر غلظت فلزات سنگین ترسیم می‌کند. به‌منظور نمایش الگوی مکانی غلظت فلزات، از روش IDW در محیط GIS استفاده شد. نقشه‌های حاصل برای سه فلز شاخص آرسنیک، نیکل و کروم در شکل ۲ ارائه شده‌اند.



شکل ۲- نقشه‌های توزیع مکانی فلزات سنگین منتخب (آرسنیک، نیکل و کروم) در آب‌های زیرزمینی حوزه آبخیز کرج

Figure 2- Spatial distribution maps of selected heavy metals (As, Ni, and Cr) in groundwater of the Karaj Watershe

الگوهای مکانی حاکی از پراکنش نسبتاً یکنواخت فلزات در سطح حوزه آبخیز است و در کلیه نقاط نمونه‌برداری، غلظت تمام فلزات کمتر از حدود مجاز استاندارد می‌باشد. مقادیر برآوردشده در نقشه‌های درون‌یابی نیز (با احتیاط در مورد نواحی فاقد داده) از حد مجاز پایین‌تر هستند. این موضوع با نتایج آماری جدول ۲ نیز هم‌خوانی دارد و حاکی از خطر پایین آلودگی فلزات سنگین در زمان پایش است. برای ارزیابی وضعیت کلی آلودگی، شاخص‌های مختلف شامل شاخص آلودگی منفرد (PI)، شاخص کلی آلودگی فلزات سنگین (HPI) و شاخص درجه آلودگی (Cd) محاسبه شد. نتایج به‌دست‌آمده در جدول ۳ آمده است.

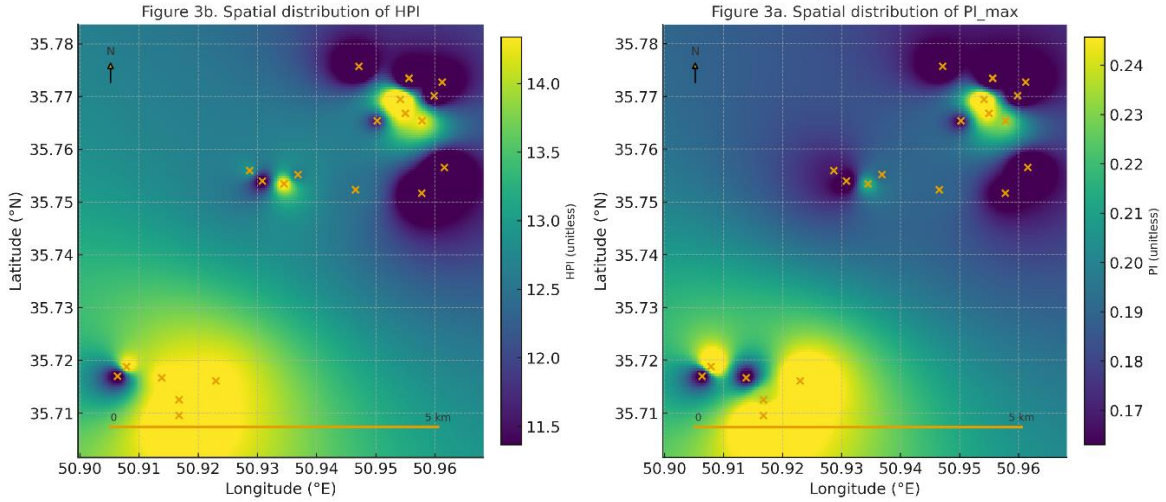
جدول ۳- مقادیر محاسبه‌شده شاخص‌های آلودگی (PI، HPI و Cd) در نمونه‌های آب زیرزمینی حوزه آبخیز کرج

Table 3- Calculated pollution indices (PI, HPI, and Cd) in groundwater samples of the Karaj Watershed

Cd	PImax	HPI	Sample Code
0	0.39	4.28	S1
0	0.35	3.85	S2
0	0.31	4.12	S3
0	0.29	4.45	S4
0	0.28	4.08	S5
0	0.27	4.36	S6
0	0.32	4.28	Mean

مقادیر شاخص‌های HPI و PI در تمام نمونه‌ها کمتر از ۱۰۰ و ۱ بوده و شاخص Cd نیز در تمام نقاط صفر به دست آمد که نشان‌دهنده عدم وجود آلودگی قابل‌ملاحظه در آب زیرزمینی منطقه است. مقدار میانگین HPI برابر ۴/۲۸ به دست آمد که مطابق طبقه‌بندی استاندارد، در محدوده پاک قرار می‌گیرد. باوجود این سطح کلیِ مطلوب، تحلیل حساسیتِ محرک‌های محلی نشان داد که در اغلب نمونه‌ها نیکل عاملِ غالب در تعیین PI_{max} بوده و در تعداد معدودی نمونه آرسنیک نقشِ محرکِ اصلی را ایفا کرده است. این نکته از منظر مدیریتی مهم است؛ زیرا در شرایط تغییرات هیدرولوژیکی (افزایش برداشت، افت سطح آب، تغییر مسیرهای جریان یا رخدادهای بارشی شدید که می‌تواند الگوهای انتقال را دگرگون کند)، نیکل و آرسنیک محتمل‌ترین نامزدها برای نزدیک‌شدن به حدود هشدار خواهند بود. از طرف دیگر، مقادیر بسیار پایین سرب و کادمیوم (صفر در این مجموعه) می‌تواند بازتاب پایش مؤثر منابع نقطه‌ای مرتبط یا شرایط زمین‌شیمیایی محلی باشد که تحرک‌پذیری آن‌ها را محدود می‌کند. مقدار پایین منگنز و آهن (دومی در بسیاری از ردیف‌ها ناموجود) نیز نشان می‌دهد دست‌کم در زمان نمونه‌برداری، شرایط کاهنده قوی یا حل‌شدگی ناشی از کانی‌زایی آهن و منگنز، مسئله‌ساز نبوده است. به‌منظور ارزیابی الگوهای مکانی شاخص‌های آلودگی، مقادیر PI_{max} و HPI برای هر ایستگاه محاسبه و با

استفاده از روش IDW در محیط GIS ترسیم شد و در شکل ۳ نمایش داده شده است. نقشه‌های حاصل نشان می‌دهند که مقدار PI_{max} در هیچ‌یک از ایستگاه‌ها به آستانه بحرانی ۱ نزدیک نشده و شاخص HPI نیز در تمامی نقاط محدوده مطالعه در بازه‌ای پایین‌تر از مقدار بحرانی ۱۰۰ قرار دارد. این موضوع دلالت بر نبود آلودگی معنی‌دار فلزات سنگین در زمان پایش دارد و با نتایج عددی جدول ۳ مطابقت کامل دارد. ازآنجاکه شاخص‌های PI و HPI از شناخته‌شده‌ترین ابزارهای کمی برای ارزیابی وضعیت کیفی منابع آب از نظر فلزات سنگین محسوب می‌شوند، تحلیل مکانی آن‌ها در محیط GIS می‌تواند به درک بهتر از پراکنش آلاینده‌ها و شناسایی نواحی بالقوه حساس کمک کند (Li & Heap, 2014). روش IDW با فرض کاهش شدت آلودگی متناسب با افزایش فاصله از منبع آلاینده، یکی از متداول‌ترین روش‌های درون‌یابی در مطالعات آلودگی آب‌وخاک است که دقت بالایی در مقیاس‌های محلی دارد (Sanad *et al.*, 2024). مطالعات متعددی نشان داده‌اند که ترکیب شاخص‌های کمی آلودگی فلزات با روش‌های مکانی در GIS می‌تواند به طور مؤثر الگوهای فضایی آلودگی را آشکار سازد و در طراحی راهکارهای پایش و مدیریت پایدار منابع آب نقش مهمی ایفا کند (Alzahrani *et al.*, 2024)؛ بنابراین، نتایج این پژوهش ضمن تأیید پایین‌بودن سطح آلودگی فلزات سنگین در حوزه آبخیز کرج، بر ضرورت تداوم پایش مکانی این شاخص‌ها برای پیشگیری از تغییرات احتمالی ناشی از توسعه فعالیت‌های کشاورزی و شهری تأکید دارد.



شکل ۳- نقشه‌های مکانی شاخص‌های آلودگی فلزات سنگین در آب‌های زیرزمینی حوزه آبخیز کرج: (الف) PI_{max} و (ب) HPI

Figure 3- Spatial distribution maps of heavy metal pollution indices in groundwater of the Karaj Watershed: (a) PI_{max} , (b) HPI

از دیدگاه فرایندی، پایینیِ نسبت‌های S_i و C_i برای همه عناصر نشان می‌دهد انتقال سطحی و نفوذیِ آلاینده‌ها دست‌کم در موقعیت و بازه زمانیِ این پایش در سطح پس‌زمینه قرار داشته است. باتوجه‌به اینکه نقاط نمونه‌برداری، چاه‌های بهره‌برداری هستند، کیفیت مشاهده‌شده علاوه بر منابع آلودگی، تحت‌تأثیر جریان‌های زیرسطحی، ویژگی‌های زمین‌شناسی رسوبی، تبادل آب سنگ، و زمان ماند نیز قرار می‌گیرد؛ عواملی که می‌توانند موجب رقیق‌سازی[۲۳] یا بازدارندگی مهاجرت فلزات شوند. در چنین بستری، پایداری کیفی

[23] Dilution

فعلی نباید به‌عنوان تضمین قطعی در همه فصول سال‌ها تلقی شود؛ زیرا تغییرات فصلی (بارش، رواناب، نفوذ)، عملیات بهره‌برداری (پمپاژ و افت سطح)، و ورودهای جدید نقطه‌ای و غیرنقطه‌ای می‌تواند الگوی ریسک را جابجا کند(Ha *et al.*, 2021).

همچنین پویایی بلندمدت کیفیت آب‌های زیرزمینی تابعی از برهم‌کنش میان عوامل اقلیمی، زمین‌شناسی و انسانی است. تغییرات اقلیمی و افزایش نوسانات بارش می‌تواند منجر به جابه‌جایی فلزات در ستون خاک و تغییر مسیر جریان‌های زیرسطحی شود (Wu *et al.*, 2022) در کنار این، بهره‌برداری مفرط از منابع آب زیرزمینی و افت سطح ایستابی، احتمال ورود آلاینده‌ها از لایه‌های سطحی به سفره را افزایش می‌دهد. ازاین‌رو، استمرار پایش کمی و کیفی همراه با تحلیل‌های زمانی ضروری است تا رفتار بلندمدت فلزات سنگین در سیستم آبخیز به‌درستی شناسایی و مدیریت شود.

بررسی همبستگی بین فلزات سنگین می‌تواند اطلاعات مفیدی در خصوص منشأ آلودگی‌ها ارائه دهد. در جدول ۴ ضریب همبستگی پیرسون بین فلزات مختلف آورده شده است.

جدول ۴- ضرایب همبستگی پیرسون بین فلزات سنگین اندازه‌گیری‌شده در منابع آب زیرزمینی حوزه آبخیز کرج

Table 4- Pearson correlation coefficients among heavy metals measured in groundwater sources of the Karaj Watershed

Fe	Mn	Zn	Cu	Ni	Cr	As	
0.05	0.15	0.23	0.10	0.56	0.42	1.00	**As**
0.09	0.19	0.31	0.12	0.61	1.00	0.42	**Cr**
0.13	0.21	0.38	0.18	1.00	0.61	0.56	**Ni**
0.08	0.03	0.05	1.00	0.18	0.12	0.10	**Cu**
0.11	0.25	1.00	0.05	0.38	0.31	0.23	**Zn**
0.32	1.00	0.25	0.03	0.21	0.19	0.15	**Mn**
1.00	0.32	0.11	0.08	0.13	0.09	0.05	**Fe**

نتایج نشان می‌دهد که بین عناصر نیکل و کروم (r = 0.61) همبستگی نسبتاً بالایی وجود دارد که احتمال منشأ زمین‌شناختی مشترک یا فرآیندهای انحلال مشابه را تقویت می‌کند. سایر همبستگی‌ها در حد ضعیف تا متوسط بوده و نشان‌دهنده تنوع منابع احتمالی فلزات است.

پیامد مدیریتی نتایج حاضر برای مدیریت پایدار منابع آب در حوزه آبخیز کرج را می‌توان در سه محور جمع‌بندی کرد:

۱) تداوم پایش هدفمند با تمرکز بر نیکل و آرسنیک: باتوجه‌به نقش این دو در تعیین PI_{max}، پیشنهاد می‌شود بسامد پایش و حد تشخیص گزارش‌ها برای آن‌ها بازنگری و در صورت امکان کاهش داده شود تا تغییرات ظریف قابل کشف باشد.

۲) یکپارچه‌سازی پایش کیفی آب، خاک، پساب: اگرچه غلظت‌های کنونی پایین است، اتصال داده‌های آب با پروفیل‌های خاک و رسوبات ریزدانه (به‌عنوان مخازن بالقوه فلزات) و پساب‌های شهری و صنعتی می‌تواند منشأیابی را دقیق‌تر کند و احتمال خیزش‌های موضعی را به‌موقع آشکار سازد.

۳) رویکرد پیشگیرانه در سطح حوزه آبخیز: حفظ وضعیت موجود نیازمند اقداماتی با هزینه فایده مناسب است: بهبود نگهداشت شبکه جمع‌آوری و دفع پساب، حوضچه‌های ته‌نشینی در خروجی زیرحوضه‌های حساس، مدیریت رواناب‌های نخستین‌بارش[۲۴] و تدوین پروتکل‌های پایش فصلی در دوره‌های تر و خشک.

[24] First flush

باتوجه‌به مجموع شواهد، پژوهش حاضر نشان می‌دهد که کیفیت فلزات سنگین در محدوده مورد مطالعه، در زمان پایش، در سطح مطمئن قرار دارد؛ بااین‌حال، با درنظرگرفتن پویایی آب‌شناختی[۲۵] و فشارهای شهری و صنعتی در حوزه آبخیز کرج، اتخاذ راهبرد پایش تقویت‌شده و پیشگیرانه برای نیکل و آرسنیک، و پیگیری منشأیابی یکپارچه، شرط لازم برای پایداری کیفی بلندمدت و کاهش ریسک‌های بالقوه است.

کمبود داده آهن و به‌طورکلی تک فصلی و غیرپیوسته بودن سری زمانی، امکان تحلیل روندهای زمانی را محدود می‌کند. رفع این محدودیت‌ها باعث تقویت اعتبار استنباط‌ها و ارتقای قدرت تصمیم‌سازی مدیریتی خواهد شد همچنین به دلیل محدودیت داده‌ها، تحلیل فصلی انجام نشد و پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آتی، نمونه‌برداری فصلی انجام گیرد تا نوسانات زمانی بررسی شود.

نتیجه‌گیری کلی

نتایج این پژوهش که با هدف تحلیل مکانی و ارزیابی محیط‌زیستی فلزات سنگین در منابع آب سطحی حوزه آبخیز کرج و با رویکرد مدیریت پایدار منابع آب انجام شد، تأیید می‌کند که استفاده از شاخص‌های مکانی در تصمیم‌سازی مدیریتی، ابزار مؤثری برای پایش پایدار منابع آب است (Murariu et al., 2025) و همچنین نشان می‌دهد کیفیت آب از نظر عناصر فلزی در وضعیت مطلوب قرار دارد. مقادیر اندازه‌گیری‌شده برای تمامی فلزات ازجمله آرسنیک، نیکل، کروم، مس، روی، منگنز، سرب الگوی ریسک و کادمیوم کمتر از حدود مجاز استانداردهای ملی (استاندارد ۱۰۵۳ ایران) و بین‌المللی (WHO) بوده و هیچ نمونه‌ای تجاوز از حد مجاز را نشان نداد. مقدار میانگین شاخص آلودگی فلزات سنگین (HPI=4.28) و شاخص آلودگی تک‌عاملی (PI<1) نیز حاکی از سطح آلودگی بسیار پایین و قابل‌قبول در تمامی نقاط موردبررسی است.

بررسی الگوی مکانی آلودگی‌ها نشان داد که نیکل و آرسنیک بیشترین سهم را در مقدار شاخص PI_{max} داشتند؛ هرچند غلظت آن‌ها همچنان پایین‌تر از حد استاندارد است. این موضوع نشان‌دهنده‌ی اهمیت پایش هدفمند این دو عنصر در آینده است، زیرا در شرایط تغییرات هیدرولوژیکی و افزایش فشارهای شهری و صنعتی می‌توانند به شاخص‌های حساس در کیفیت آب تبدیل شوند.

یافته‌های این مطالعه بیانگر آن است که اگرچه وضعیت کنونی فلزات سنگین در منابع آب حوزه آبخیز کرج رضایت‌بخش است، اما پایداری این شرایط نیازمند استمرار پایش منظم، شناسایی منابع بالقوهٔ آلودگی، و اجرای راهبردهای پیشگیرانه است. در این راستا، پیشنهاد می‌شود اقدامات زیر در برنامه‌های مدیریتی حوزه آبخیز لحاظ گردد:

۱) تدوین و اجرای نظام پایش فصلی و بلندمدت با تمرکز بر عناصر نیکل و آرسنیک؛
۲) یکپارچه‌سازی پایش آب، خاک و پساب‌ها جهت شناسایی منشأهای نقطه‌ای و غیرنقطه‌ای آلودگی؛
۳) مدیریت رواناب‌های سطحی از طریق احداث حوضچه‌های ته‌نشینی، مناطق بافر گیاهی و کنترل رواناب نخستین‌بارش؛
۴) بازنگری در پروتکل‌های آزمایشگاهی جهت ثبت حدود تشخیص (LOD/LOQ) و افزایش دقت سنجش در غلظت‌های پایین.

در مجموع، نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که حوزه آبخیز کرج از منظر آلودگی فلزات سنگین در محدودهٔ ایمن قرار دارد؛ بااین‌حال، به دلیل توسعهٔ سریع شهری و تغییرات اقلیمی محتمل، اتخاذ رویکرد مدیریت جامع و پایدار منابع آب، با تأکید بر پیشگیری و پایش مستمر، برای حفظ سلامت اکوسیستم آبی و پایداری کیفیت منابع آب در بلندمدت ضروری است.

[25] Hhdrologic

سپاسگزاری

نویسندگان این مقاله مراتب قدردانی و سپاس خود را از شرکت آب‌وفاضلاب استان البرز و به‌ویژه آزمایشگاه کنترل کیفی آب‌وفاضلاب این شرکت به دلیل همکاری ارزشمند در تأمین داده‌های کیفی، انجام آزمون‌های فلزات سنگین و فراهم‌سازی بستر اجرای این پژوهش ابراز می‌دارند. بدون همراهی و حمایت فنی این مجموعه، انجام دقیق مراحل اندازه‌گیری و تحلیل داده‌ها میسر نمی‌بود.

References

Aghamirzadeh,S. , Ganjei zadeh Rouhani,F. , Saeediyan,H. & Ganjeizadeh,K. (2022). Investigation of Aluminum Element Changes in Surface and Groundwater of Sarcheshmeh Watershed in Kerman Province. *Integrated Watershed Management*, 2(1), 61-72. https://doi.org/10.22034/iwm.2022.551640.1026 (In Persian)

Al-Hakkani, M.F. (2019). Guideline of inductively coupled plasma mass spectrometry “ICP–MS”: fundamentals, practices, determination of the limits, quality control, and method validation parameters. *SN Applied Sciences*1, 791. https://doi.org/10.1007/s42452-019-0825-5

Alzahrani, H., El-Sorogy, A. S., Okok, A., & Shokr, M. S. (2024). GIS- and Multivariate-Based Approaches for Assessing Potential Environmental Hazards in Some Areas of Southwestern Saudi Arabia. *Toxics*, 12(8), 569.https://doi.org/10.3390/toxics12080569

Aparisi-Navarro, S., Moncho-Santonja, M., Defez, B., Candeias, C., Rocha, F., & Peris-Fajarnés, G. (2025). Assessing heavy metal contamination in agricultural soils: a new GIS-based Probabilistic Pollution Index (PPI) – case study: Guarda Region, Portugal. *Annals of GIS*, 31(1), 143–162. https://doi.org/10.1080/19475683.2025.2452256

Borji Hassangavyar, M. , Nazari Samani, A. A. , Feiznia, S. & Fathabadi, A. (2023). Investigating the Risk of Heavy Metal Contamination in Suspended Sediments and Surface Soil of Laniz Watershed, Karaj. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 53(12), 2937-2954. https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.351189.669395 (In Persian)

Crispin, A., & Parthasarathy, P. (2025). Understanding the Impact of Heavy Metals on the Environment and Human Life in a Non-Perennial River Basin South India – A Multi-Index Geochemical Analysis . *Environmental Forensics*, 26(4), 529–544. https://doi.org/10.1080/15275922.2025.2459412

Eslami, H., Esmaeili, A., Razaeian, M., Salari, M., Nassab Hosseini, A., Mobini, M., & Barani, A. (2022). Potentially toxic metal concentration, spatial distribution, and health risk assessment in drinking groundwater resources of southeast Iran. *Geoscience Frontiers*, 13(1), 101276. https://doi.org/10.1016/j.gsf.2021.101276

Fazel Tavassol, S., Ashamanjari, K. G., & Dehghan, M. (2017). Assessment of heavy metal contamination of groundwater in Karaj Plain, Iran. *International Journal of Geology & Earth Science*, 3(3), 33–38.

Ghalandarzadeh, F. , Rezaei Tavabe, K. , Haji seyed Mohammad Shirazi, R. & Samadi Kuchaksaraei, B. (2020). An investigation on heavy metal (cadmium, chromium, zinc) concentration changes in water and sediment, and assessing the biological value index (Z) in Karaj River. *Journal of Fisheries*, 73(2), 199-212. https://doi.org/10.22059/jfisheries.2020.302397.1164 (In Persian)

Ha, K., Lee, E., An, H., Kim, S., Park, C., Kim, G.-B., & Ko, K.-S. (2021). Evaluation of Seasonal Groundwater Quality Changes Associated with Groundwater Pumping and Level Fluctuations in an Agricultural Area. *Korea. Water*, 13(1), 51. https://doi.org/10.3390/w13010051

Hakanson, L. (1980). An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach. *Water Research*, 14 (8), 975-1001. https://doi.org/10.1016/0043-1354(80)90143-8

Huang, S., Han, M., Chen, P., Feng, W., Li, G., Zhang, H., Peng, H., & Huang, T. (2024). Assessing health risks from bioaccessible PM2.5-bound toxic metals in Nanchang metro: Implications for metro workers and emissions control. Environmental research, 258, 119284.

https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.119284

Li, J., & Heap, A. D. (2014). A review of spatial interpolation methods for environmental scientists. *Geoscience Australia Record, 2014/05*, 1–137. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2013.12.008

Masoodiyan, S. A. (2003). Investigation of Precipitation Geographical Dispersion In Iran through Rotated Factor Analysis. *Geography and Development*, 1(1), 79-87. https://doi.org/10.22111/gdij.2003.3642

Mohan, S. V., Nithila, P., & Reddy, S. J. (1996). Estimation of heavy metal in drinking water and development of heavy metal pollution index. *Journal of Environmental Science & Health*, Part A, 31 (2), 283-289. https://doi.org/10.1080/10934529609376357

Mousavipoor,F. , Kazemi,A. , Hadipour,M. & Hedayati Aghmashhadi,A. (2022). The Role of Pollutants on Health and the Environment with Emphasis on Social Resilience (A Study Based on Pollutants in Arak). *Integrated Watershed Management*, 2(2), 75-93. https://doi.org/10.22034/iwm.2022.552129.1027 (In Persian)

Murariu, G., Stanciu, S., Dinca, L., & Munteanu, D. (2025). GIS Applications in Monitoring and Managing Heavy Metal Contamination of Water Resources. *Applied Sciences*, 15(19), 10332. https://doi.org/10.3390/app151910332

Raeisi Dehkordi, M. R. & Yeganeh Mazhar, A. H. (2023). Optimization of aquifers' hydrodynamic coefficients by numerical modeling (Case study: Damaneh-Daran Plain Aquifer). *Water and Soil Management and Modelling*, 3(1), 262-278. https://doi.org/10.22098/mmws.2022.11683.1155 (In Persian)

Raeisi dehkordi,M. R. , Yeganeh Mazhar,A. H. & Kheradzare,F. (2023). Investigating Effects of lateral Inflow Characteristics on Main flow using Numerical Modeling. *Integrated Watershed Management*, 3(1), 54-71. https://doi.org/10.22034/iwm.2023.1990397.1064 (In Persian)

Sanad, H., Moussadek, R., Dakak, H., Zouahri, A., Oueld Lhaj, M., & Mouhir, L. (2024). Ecological and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Groundwater within an Agricultural Ecosystem Using GIS and Multivariate Statistical Analysis (MSA): A Case Study of the Mnasra Region, Gharb Plain, Morocco. *Water*, 16(17), 2417. https://doi.org/10.3390/w16172417.

Singh, V., Ahmed, G., Vedika, S., Yadav, S., Pandey, S., Kumar, A., & Dhiman, N. (2024). Toxic heavy metal ions contamination in water and their sustainable reduction by eco-friendly methods: isotherms, thermodynamics and kinetics study. *Scientific Reports*, 14(1), 7595. https://doi.org/10.1038/s41598-024-58061-3

Wu, Q., Cui, Y., Zhao, Y., & Li, W. (2022). Spatial–temporal variations and risk assessment of heavy metals in river water using GIS-based methods. *Environmental Pollution*, 295, 118683. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.118683

Younesi Baneh, P., Ahmadi, B., Salehzadeh, H., Mohammadi, H., Shahmoradi, B., & Ghaderi, B. (2024). Assessment of heavy metal contamination in groundwater of rural areas of Kurdistan Province Iran: A comprehensive study. *Heliyon*, 10(21), e39833. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e39833