



Spatial distribution assessment of heavy metal concentrations in subsurface waters utilized within the research areas of Zabol research institute

Sahel Pakzad-Toochaeei¹✉ | Roghayeh Karami² | Hashem Khandan Barani³

1. Corresponding Author, Department of Natural Ecosystems, Hamoon International Wetland Research Institute, Research Institute of Zabol, Zabol, Sistan and Baluchestan, Iran. E-mail: sahelpakzad@rizabol.ac.ir

2. Department of Natural Ecosystems, Hamoon International Wetland Research Institute, Research Institute of Zabol, Zabol, Sistan and Baluchestan, Iran. E-mail: roghayekarami@rizabol.ac.ir

3. Department of Aquatic Science, Hamoon International Wetland Research Institute, Research Institute of Zabol, Zabol, Sistan and Baluchestan, Iran. E-mail: hashem.barani@uoz.ac.ir

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received 10 October 2025

Received in revised form 16
November 2025

Accepted 26 November 2025

Keywords:

Groundwater,

Heavy metals,

Irrigation,

Inverse Distance Weighting
(IDW),

Water quality indices.

ABSTRACT

In this study, we evaluated the water quality of sources used in the experimental fields of Zabol Research Institute, with a focus on potential environmental and health risks. The concentrations of heavy metals—including mercury (Hg), lead (Pb), arsenic (As), chromium (Cr), nickel (Ni), cadmium (Cd), iron (Fe), and copper (Cu) were measured, alongside key physicochemical parameters of groundwater from wells and drainage systems within the institute. Water samples were collected from eight stations during two seasons, February 2024 (winter) and August 2024 (summer), with three replicates per sampling event. To assess water quality, indices such as the Metal Index (MI) and Poseidon Index (PoS) were calculated, and the Inverse Distance Weighting (IDW) method was used to produce spatial distribution maps, highlighting the variation of heavy metal concentrations across the study area. Mercury and lead were below detection limits and therefore not recorded. The concentrations ($\mu\text{g/L}$) of arsenic, chromium, nickel, cadmium, iron, and copper were 6.44–13.11, 18.36–83.76, 1.44–9.8, 1.31–6.3, 194–976.66, and 12.53–39.9, in summer respectively. In winter, concentrations increased to 8.21–21.73 for arsenic, 44.43–96.06 for chromium, 3.34–11.86 for nickel, 2.33–8.83 for cadmium, 1253.33–4893.33 for iron, and 55.01–91.67 for copper. Results indicated significant spatial and seasonal variations, with most metals showing higher levels in winter. The spatial maps of water quality parameters provided an effective overview of their distribution across the study area in different seasons. Although no immediate environmental risk was detected, as these water sources are used temporarily and mainly for tree irrigation, the findings highlight the importance of regular monitoring and the implementation of proper management strategies to ensure the safe and sustainable use of water resources under conditions of scarcity.

Cite this article: Pakzad-Toochaeei, S., Karami, R., & Khandan Barani, H. (2025). Spatial distribution assessment of heavy metal concentrations in subsurface waters utilized within the research areas of Zabol research institute. *Journal of Natural Environment*, 78 (4), 663-688.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jne.2025.405899.2861>



بررسی توزیع مکانی غلظت فلزات سنگین در آب‌های زیرسطحی مورد استفاده در اراضی تحقیقاتی پژوهشگاه زابل

ساحل پاکزاد توچایی^۱ | رقیه کرمی^۲ | هاشم خندان بارانی^۳

۱. نویسنده مسئول، گروه اکوسیستم‌های طبیعی، پژوهشکده تالاب بین‌المللی هامون، پژوهشگاه زابل، زابل، ایران. رایانامه: sahelpakzad@rizabol.ac.ir

۲. گروه اکوسیستم‌های طبیعی، پژوهشکده تالاب بین‌المللی هامون، پژوهشگاه زابل، زابل، ایران. رایانامه: roghayekarami@rizabol.ac.ir

۳. گروه علوم آبریزان، پژوهشکده تالاب بین‌المللی هامون، پژوهشگاه زابل، زابل، ایران. رایانامه: hashem.barani@uoz.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	در پژوهش حاضر، به منظور ارزیابی کیفی منابع آب مورد استفاده در اراضی تحقیقاتی پژوهشگاه زابل و خطرات بالقوه محیط‌زیستی و بهداشتی، غلظت فلزات سنگین جیوه (Hg)، سرب (Pb)، آرسنیک (As)، کروم (Cr)، نیکل (Ni)، کادمیم (Cd)، آهن (Fe) و مس (Cu) به همراه تأثیر احتمالی پارامترهای فیزیکی و شیمیایی آب‌های زیرسطحی (چاه‌ها و زهکش‌های پژوهشگاه) بررسی گردید. جهت انجام پژوهش، نمونه‌های آب در دو فصل زمستان ۱۴۰۲ (بهمن ماه) و تابستان ۱۴۰۳ (مرداد ماه) از ۸ ایستگاه مختلف و با ۳ تکرار در هر دوره نمونه‌برداری جمع‌آوری شد. شاخص‌های کیفی و Poseidon Index (PoS) محاسبه شده و جهت ترسیم نقشه‌های پراکنش، از روش درون‌یابی وزنی معکوس فاصله (IDW) استفاده گردید. با توجه به آنکه غلظت سرب و جیوه کمتر از حد تشخیص بود، این دو عنصر ثبت نشدند. در فصل تابستان، غلظت آرسنیک، کروم، نیکل، کادمیم، آهن و مس به ترتیب ۱۳/۱۱-۶/۴۴، ۸۳/۷۶-۱۸/۳۶، ۱/۴۴-۹/۸، ۱/۳۱-۶/۳، ۱۹۴-۹۷۶/۶۶ و ۱۲/۵۳-۳۹/۹ میکروگرم در لیتر اندازه‌گیری شد. در زمستان نیز، دامنه غلظت آرسنیک ۲۱/۷۳-۸/۲۱، کروم ۹۶/۰۶-۴۴/۴۳، نیکل ۱۱/۸۶-۳/۳۴، کادمیم ۸/۸۳-۲/۳۳، آهن ۴۸۹۳/۳۳-۱۲۵۳/۳۳ و مس ۹۱/۶۷-۵۵/۰۱ میکروگرم در لیتر متغیر بود. نتایج حاصل نشان‌دهنده وجود تغییرات مکانی و فصلی معنی‌دار در غلظت فلزات سنگین بود. به گونه‌ای که اغلب عناصر در فصل زمستان مقادیر بالاتری داشتند. نقشه‌های مکانی ترسیم‌شده از پارامترهای کیفیت آب، نمایی جامع از الگوی پراکنش آنها در محدوده مطالعه، طی فصل‌های نمونه‌برداری فراهم آورد. به دلیل استفاده موقت این منابع آبی و تمرکز بر آبیاری درختان، در حال حاضر خطر محیط‌زیستی مشاهده نمی‌شود. درعین حال، نتایج مطالعه بر ضرورت پایش مستمر و به کارگیری راهبردهای مدیریتی مناسب به منظور تضمین بهره‌برداری ایمن و پایدار منابع آب در شرایط تنش آبی تأکید دارد.
کلیدواژه‌ها: آب‌های زیرسطحی، آبیاری، درون‌یابی فاصله معکوس (IDW)، شاخص، فلزات سنگین.	

استناد: پاکزاد توچایی، ساحل؛ کرمی، رقیه؛ و خندان بارانی، هاشم (۱۴۰۴). بررسی توزیع مکانی غلظت فلزات سنگین در آب‌های زیرسطحی مورد استفاده در اراضی تحقیقاتی پژوهشگاه زابل. محیط زیست طبیعی، ۷۸ (۴)، ۶۸۸-۶۶۳.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jne.2025.405899.2861>



© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

مقدمه

امروزه، مسئله کمبود و همچنین افت کیفی آب از عوامل محدود کننده پیشرفت و توسعه کشاورزی محسوب می‌شوند. از این رو، مدیریت صحیح آب جهت دستیابی به توسعه پایدار، ضروری است. در بسیاری از کشورهای خشک جهان، به‌ویژه ایران، ذخایر آبی زیرزمینی و زیرسطحی از جمله منابع اصلی تأمین آب است (Amjadian and Ardakani, 2022). در این مناطق، بررسی روند تغییرات کیفی منابع آبی مذکور می‌تواند به تبیین سیاست‌های کاربردی و عملی برای مدیریت این منابع در مسیر بهره‌برداری پایدار کمک کند. بنابراین هر ساله طی تحقیقات گسترده‌ای کیفیت آب‌های سطحی و زیرسطحی بررسی می‌شود. از طرفی دیگر، با توجه به اینکه کیفیت آب هر منطقه می‌تواند تحت تأثیر عوامل گوناگون از قبیل زمین‌شناسی، جنس خاک بستر، فعالیت‌های انسانی آلاینده محیط و شرایط اقلیمی باشد، کیفیت آب از نظر ترکیبات مختلف بایستی بررسی شود (Rashid et al., 2022).

به‌طور معمول جهت ارزیابی کیفیت آب، پارامترهایی از قبیل انواع آنیون‌ها و کاتیون‌ها، pH، جامدات محلول (TDS) کدورت، دما و غلظت فلزات سنگین سنجش می‌گردد. فلزات سنگین به‌دلیل داشتن نیمه‌عمر طولانی، پایداری، سمیت و زیست تخریب‌ناپذیر بودن، خاصیت تجمع‌زیستی دارند. در نتیجه با توجه اثرات مخرب، از اهمیت و توجه ویژه‌ای برخوردار هستند. چراکه فلزات سنگین براساس نوع و اثر بر سلامت موجودات زنده در دو دسته ضروری و غیر ضروری دسته‌بندی می‌شوند. فلزات ضروری در برخی عملکردهای بیوشیمیایی و فیزیولوژیکی گیاهان و جانوران نقش مهمی را ایفا می‌کنند (Kashtabeh et al., 2025; Mahmoudabadi et al., 2023). درحالی‌که برخی از عناصر از قبیل کادمیم، سرب، آرسنیک و وانادیم در دسته عناصر غیر ضروری قرار گرفته و نقشی در انجام صحیح عملکردهای حیاتی موجودات زنده ندارند. یون‌های این فلزات قادرند با ترکیبات سلولی مانند DNA و هسته واکنش داده و آسیب‌های متعددی از قبیل سرطان را ایجاد کنند. از این رو به‌منظور حفظ محیط زیست، کنترل آلودگی احتمالی و سلامت محصولات حاصل از این منابع باید اطلاع دقیقی از غلظت فلزات فراهم شود. چراکه منابع آبی سطحی و زیرزمینی در صورت آلوده بودن به فلزات سنگین می‌توانند موجب انتقال آنها به بخش‌های دیگر شوند (Scutarasu and Trinca, 2023).

کیفیت آب آشامیدنی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین مؤلفه‌های بهداشت عمومی و توسعه پایدار، همواره مورد توجه پژوهشگران بوده است. مطالعات متعدد نشان داده‌اند که عوامل فیزیکی‌وشیمیایی نقش تعیین‌کننده‌ای در ارزیابی ایمنی و بهداشت آب دارند و می‌توانند تحت تأثیر فعالیت‌های انسانی، کاربری اراضی، بهره‌برداری از منابع آب و شرایط محیطی قرار گیرند. بدین ترتیب، کیفیت منابع آبی زیرسطحی بر اساس غلظت ترکیبات فیزیکی‌وشیمیایی آب از قبیل انواع آنیون‌ها و کاتیون‌ها و به‌ویژه انواع آلاینده‌های آلی و معدنی از قبیل فلزات سنگین مورد بررسی قرار گرفته است. به‌عنوان مثال، Hassanzadeh و همکاران (۲۰۱۰) در بررسی آلودگی آب‌های زیرزمینی در محدوده شهر کرمان نشان دادند که غلظت عناصر غیرضروری این منابع بالاتر از حد استاندارد قرار دارد. Amin و همکاران (۲۰۱۱) نیز سلامت ذخایر آب زیر زمینی شیراز از نظر غلظت فلزات سنگین را مطالعه کردند. Khashi و Malakoutian (۲۰۱۴) در پژوهشی دیگر نشان دادند که غلظت فلزات سنگین آرسنیک، سرب و کادمیم در منابع آب زیرزمینی (چشمه، چاه و قنات) ناحیه جنوب شرقی دشت رفسنجان بالا است. Asrari و Amizadegan (۲۰۱۸) نیز ۳۹ حلقه چاه آب شرب روستاهای شهرستان جهرم را از نظر غلظت فلزات سنگین بررسی کردند. همچنین Nouri و Montazer Faraj (۲۰۲۲) طی پژوهشی به ارزیابی کیفیت آب آشامیدنی در ۳۰ منطقه از شهر تهران پرداختند. در این مطالعه، مجموعه‌ای از شاخص‌های فیزیکی‌وشیمیایی، میکروبی و فلزات سنگین مطابق با استانداردهای ملی مورد سنجش قرار گرفت. نتایج نشان داد که مقادیر pH، کدورت، کلرید و نیترات در محدوده مجاز قرار داشتند، اما هدایت الکتریکی، کلیفرم‌های گرمایی و غلظت برخی فلزات سنگین از جمله مس و سرب در بخشی از نمونه‌ها بالاتر از حدود استاندارد بود. یافته‌های این تحقیق بر ضرورت ارتقای پایش و مدیریت کیفیت آب آشامیدنی در تهران تأکید داشت.

ارزیابی کیفیت منابع آب غالباً منجر به وجود آمدن داده‌های پیچیده‌ای می‌شود که دربردارنده اطلاعات مفیدی درباره رفتار منابع آبی بوده و به شیوه مناسبی برای تحلیل و تفسیر نیاز دارند. از مهم‌ترین موارد تحلیل کیفیت آب، طبقه‌بندی آن به کمک

¹Total Suspended Solid

شاخص‌های کیفی آب (WQI^۲) است. از کاربردی‌ترین شاخص‌های ارزیابی کیفی منابع آب سطحی می‌توان به NSFQWI^۳، Liou و BCWQI^۴ اشاره کرد، که برای طبقه‌بندی کیفی آب‌های سطحی استفاده می‌شوند. جهت بررسی آب‌های زیرزمینی و طبقه‌بندی کیفی آن نیز به‌طور معمول شاخص‌های آلودگی (Cd^۵)، شاخص آلودگی فلزات سنگین (HPI^۶)، ارزیابی فلزات سنگین (HEI^۷)، شاخص فلزات سنگین (MI^۸) و PoS^۹ استفاده می‌شود (Shokoohi and Bahmani, 2021). شاخص‌های کیفی آب ابزاری مفید و کارآمد برای پایش و تعیین کیفیت آب بوده که به‌وسیله آنها، داده‌های چند پارامتر کیفیت آب به کمک رابطه ریاضی، می‌تواند منجر به برآورد میزان سلامتی آب شود. عددی که گویای کیفیت آب از عالی تا بسیار بد است، با یک مقیاس نسبی دسته‌بندی می‌شود (Amjadian and Ardakani, 2022). به‌طور کلی بسته به نوع شاخص و کاربرد آن، از پارامترهای متنوعی در بررسی شاخص‌های کیفی آب استفاده می‌گردد. به‌طور مثال پارامترهایی که در شاخص کیفی آب شرب استفاده می‌شوند، شامل دو دسته پارامترهای مقبولیت و دسته پارامترهای دارای اثرات بهداشتی بوده و محاسبه شاخص مربوطه، با در نظر گرفتن آنها انجام می‌شود (Nawaz *et al.*, 2023). در مورد شاخص آلودگی آب‌ها نیز دو پارامتر به‌صورت جدا محاسبه می‌شوند که شامل پارامترهای فیزیکی و شیمیایی مانند فسفر، ازت و میزان غلظت آلاینده‌ها از قبیل فلزات سنگین است.

پهنه‌بندی عناصر و پارامترهای کیفی آب نیز به بررسی وضعیت پراکنش فاکتورهای مورد بررسی در منابع آب کمک کرده و با به تصویر کشیدن نحوه پراکنش آلاینده‌ها، می‌تواند نقش مؤثری در پایش این منابع و مدیریت بهتر آنها داشته باشد (Hassan *et al.*, 2023). به‌طور معمول از روش‌های وزن‌دهی از قبیل کریجینگ جهت پهنه‌بندی آلاینده‌ها استفاده می‌شود و نتایج خروجی این روش می‌تواند برای محققین در دستیابی به وضعیت کیفی و سلامت آب از منظر آلودگی مطالعه شده بسیار مؤثر باشد. روش کریجینگ یک تکنیک زمین آماری است که با استفاده از یک مجموعه از نقاط پراکنده شناخته شده، درون‌یابی یک سطح را جهت به‌دست آوردن ارزش مناطق بین نقاط شناخته شده انجام می‌دهد. استفاده از این تکنیک، نشان‌دهنده دقت بالای روش کریجینگ برای درون‌یابی وضعیت آب از لحاظ ترکیبات مورد بررسی است (Thomas, 2023).

در منطقه سیستان، قسمت اعظم آب مورد نیاز به‌ویژه در بخش کشاورزی و شرب تنها از طریق جریانات آب سطحی رودخانه هیرمند تأمین می‌شود. بنابراین، تغییرات سطح زیر کشت محصولات زراعی در این منطقه تا حد زیادی وابسته به میزان آب ورودی از کشور همسایه (افغانستان) است. این امر، سبب شده تا با ایجاد نوسان در آورد رودخانه هیرمند، سطح زیر کشت محصولات زراعی در منطقه سیستان متغیر باشد. در نتیجه با توجه به در دسترس نبودن همیشگی آب این رودخانه و خشکسالی‌های بیست ساله اخیر سیستان، استفاده از منابع زیرسطحی در منطقه رواج یافته است (Enayat *et al.*, 2022). پژوهشگاه زابل نیز به‌منظور انجام فعالیت‌های کشاورزی و باغبانی خود، جهت تأمین آب، مجبور به استفاده از منابع آبی زیر سطحی در اراضی خود شده است. بدین ترتیب که با حفر چاه، استفاده از آب زهکش‌ها و همچنین حفر کانال، منابع آبی مورد نیاز فعالیت‌های کشاورزی خود را فراهم ساخته است. از آنجا که بررسی‌های لازم از منظر کیفیت منابع آبی زیرسطحی اراضی تحقیقاتی پژوهشگاه زابل از لحاظ غلظت فلزات سنگین و فاکتورهای کیفی آب صورت نگرفته است، بررسی کیفیت این منابع آبی مورد استفاده در اراضی پژوهشگاه از لحاظ غلظت فلزات سنگین و فاکتورهای کیفی آب ضروری به‌نظر می‌رسید. بر این اساس در تحقیق حاضر غلظت فلزات سنگین فلزات جیوه (Hg)، سرب (Pb)، آرسنیک (As)، کروم (Cr)، نیکل (Ni)، کادمیم (Cd)، آهن (Fe)، مس (Cu) و برخی فاکتورهای کیفی آب اندازه‌گیری و توسط شاخص‌های MI^{۱۰} و PoS^{۱۱} بررسی شد.

^۲Water Quality Index

^۳National Sanitation Foundation Water Quality Index

^۴British Columbia Water Quality Index

^۵Contamination Index

^۶Heavy Metal Pollution Index

^۷Heavy Metal Evaluation Index

^۸Metal Index

^۹Poseidon

^{۱۰}Metal Index

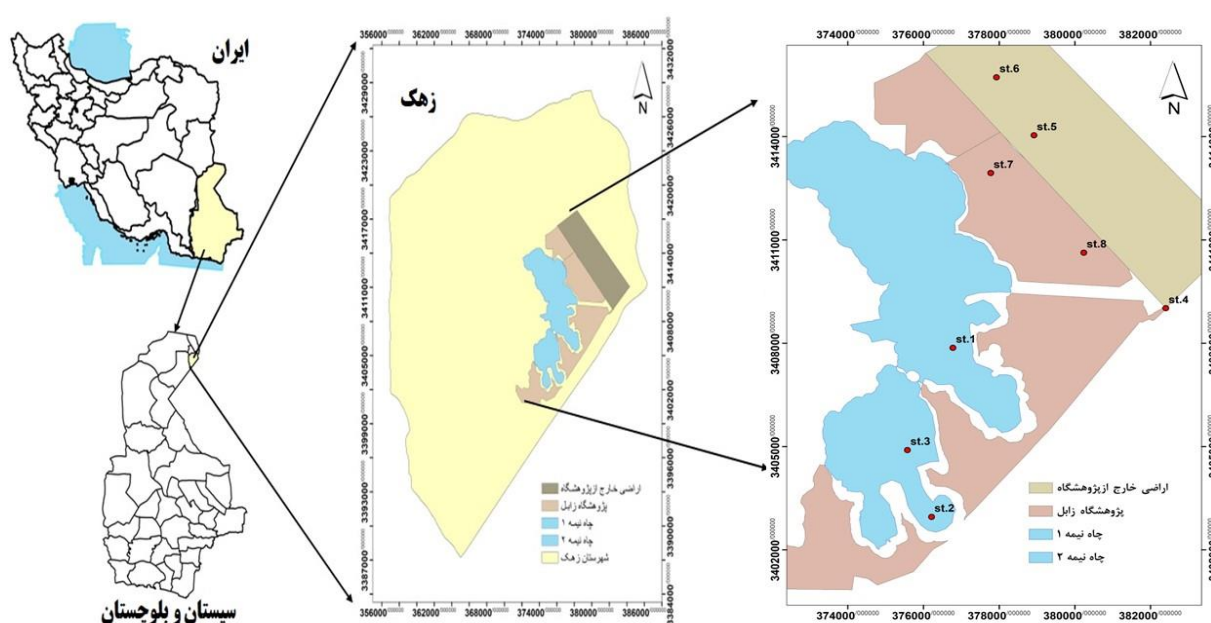
^{۱۱}Poseidon Index

همچنین به‌منظور تعیین پراکنش فاکتورهای مورد بررسی، نتایج حاصل به کمک روش کریجینگ پهنه‌بندی گردید. بنابراین انتظار می‌رود، نتایج این پژوهش بتواند به‌عنوان مبنایی علمی برای مدیریت پایدار منابع آب زیرسطحی منطقه، برنامه‌ریزی دقیق کشاورزی، ارزیابی ریسک‌های محیط‌زیستی و بهینه‌سازی بهره‌برداری از منابع آبی پژوهشگاه زابل در شرایط تنش آبی منطقه سیستان مورد استفاده قرار گیرد.

روش‌شناسی پژوهش

منطقه مورد مطالعه: تحقیق حاضر در اراضی پژوهشگاه زابل انجام شد. این پژوهشگاه با وسعت دوازده هزار هکتار، در ۳۵ کیلومتری شهرستان زابل (استان سیستان و بلوچستان) و ۵ کیلومتری شهرستان زهک، در مجاورت مرز افغانستان و در کنار مخازن آبی چاه‌نیمه واقع شده است. با توجه به خشک شدن کامل چاه‌نیمه شماره ۲ و رودخانه سیستان، تعدادی چاهک و زهکش جهت تأمین آب مورد نیاز آبیاری درختان پژوهشگاه، در این مناطق حفر گردید. به‌طوری‌که، ایستگاه‌های ۱ تا ۳، در بستر خشک شده چاه‌نیمه شماره ۲ حفر گردید. ایستگاه ۵ و ۶ نیز در بستر خشک رودخانه سیستان حفر شدند. سایر ایستگاه‌ها نیز در اراضی کشاورزی حفر گردیدند. این منابع آبی از زهکش (عمق ۳/۵ متر) تا عمیق (۷۰ متر) دسته‌بندی می‌شوند.

نمونه‌برداری و سنجش غلظت فلزات سنگین: در این پژوهش، از آب چاه‌ها، چاهک‌ها و زهکش‌های اراضی پژوهشگاه زابل طی دو فصل زمستان ۱۴۰۲ (بهمن ماه) و تابستان ۱۴۰۳ (مردادماه) نمونه آب برداشت شد (۸ ایستگاه و ۳ تکرار در هر بار نمونه‌برداری) (شکل ۱). موقعیت جغرافیایی و ویژگی‌های هر یک از ایستگاه‌های نمونه‌برداری در جدول ۱ نشان داده شده است. روش انجام نمونه‌برداری و آزمایش، به کمک روش استاندارد انجمن بهداشت عمومی آمریکا (APHA, 2023) انجام گردید. بدین‌ترتیب که در حین نمونه‌برداری هریک از پارامترهای pH و شوری توسط دستگاه کالیبره شده پرتابل، مطابق با استانداردهای موجود سه بار ثبت گردید. سپس نمونه‌های برداشت شده به‌منظور اندازه‌گیری غلظت فلزات سنگین و TDS به آزمایشگاه پژوهشکده تالاب بین‌المللی هامون منتقل شدند. پس از آماده‌سازی، مقدار TDS در نمونه‌های برداشت شده اندازه‌گیری گردید. همچنین به‌منظور سنجش غلظت فلزات سنگین، نمونه‌ها ابتدا توسط کاغذ فیلتر واتمن ۴۲ میکرومتر فیلتر و سپس توسط اسیدنتیریک رقیق تا pH برابر ۲، تثبیت شد. سپس غلظت فلزات جیوه، سرب، آرسنیک، کروم، نیکل، کادمیم، آهن و مس توسط دستگاه ICP مدل Pekin Elmer Optima DV2000 (ساخت ایالات متحده آمریکا) برحسب میکروگرم بر لیتر ($\mu\text{g/l}$) سنجش شد.



شکل ۱- منطقه نمونه‌برداری در اراضی پژوهشگاه زابل

جدول ۱- موقعیت جغرافیایی و ویژگی‌های ایستگاه‌های برداشت آب اراضی پژوهشگاه زابل

شماره ایستگاه	عرض (شمالی)	طول (شرقی)	ویژگی ایستگاه
ایستگاه ۱	۳۰°۴۷'۵۰/۹"	۶۱°۴۲'۴۳/۳"	ایستگاه ساحل: نزدیک به فیدرکانال (ورودی چاه‌نیمه از رودخانه هیرمند). چاله حفر شده توسط بیل مکانیکی به عمق ۳/۵ متر.
ایستگاه ۲	۳۰°۴۵'۱۱/۳"	۶۱°۴۲'۲۴/۱"	ایستگاه چاله برق: حاشیه چاه‌نیمه ۲، نزدیک به مرز افغانستان. چاله حفر شده توسط بیل مکانیکی به عمق ۳/۵ متر.
ایستگاه ۳	۳۰°۴۶'۱۴"	۶۱°۴۱'۵۹/۳"	ایستگاه آل گرگ: تقریباً وسط چاه‌نیمه ۲ (خشک شده). نزدیک به جزایر مرکزی چاه‌نیمه. چاله حفر شده توسط بیل مکانیکی به عمق ۳/۵ متر.
ایستگاه ۴	۳۰°۴۸'۳۰/۳"	۶۱°۴۶'۱۴/۵"	ایستگاه چاه برجک مرزی: حفر شده توسط دستگاه حفر چاه تا عمق ۱۶ متر که در ۱۲ متری به آب رسیده است (دقیقاً در فاصله ۱۰ متری نقطه صفر مرزی).
ایستگاه ۵	۳۰°۵۱'۱۲/۱"	۶۱°۴۴'۱۲/۲"	ایستگاه فلفلی: حاشیه رودخانه کنار پمپاژ پژوهشگاه زابل. زهکشی به عمق ۲ متر که توسط بیل مکانیکی حفر شده و حاوی زه آب است.
ایستگاه ۶	۳۰°۵۲'۶/۵"	۶۱°۴۳'۲۳/۲"	ایستگاه جی سرخ: در حاشیه رودخانه سیستم در مجاورت پمپاژ پژوهشگاه. زهکش‌هایی به عمق ۲ متر که توسط بیل مکانیکی حفر شده و حاوی زه آب است.
ایستگاه ۷	۳۰°۵۰'۳۶/۱"	۶۱°۴۳'۱۸/۷"	ایستگاه چاه عمیق نهالستان: چاه عمیقی به عمق ۵۰ متر که با پمپ شافت و غلافی کار می‌کند. در مواقع کم‌آبی استفاده شده و در کنار مجموعه نهالستان و گیاهان دارویی پژوهشگاه قرار دارد.
ایستگاه ۸	۳۰°۴۹'۲۱/۹"	۶۱°۴۴'۵۲/۳"	ایستگاه چاه عمیق نقلیه: در مجاورت نقلیه پژوهشگاه احداث شده و بطور مداوم برداشت می‌شود. عمق آبدی ۵۰ تا ۶۰ متر.

بررسی شاخص‌های کیفی آب: جهت بررسی قابلیت استفاده از آب هر یک از ایستگاه‌های مورد بررسی و همچنین وضعیت نمونه‌های آب، از شاخص‌های MI تجمیعی برای مصرف کشاورزی و PoS (روابط ۱ تا ۳) استفاده شد (Amjadian and Ardakani, 2022). بدین ترتیب که ابتدا، استانداردهای MAC براساس FAO برای هر یک از این فلزات برای کاربرد کشاورزی تعیین شد. این مقادیر برای عناصر Cu و Fe، Cd، Ni، Cr، As به ترتیب ۱۰۰، ۱۰۰، ۲۰۰، ۱۰، ۵۰۰۰ و ۲۰۰ میکروگرم بر لیتر لحاظ شد (FAO Guidelines).

$$MI = \sum_{i=1}^n \frac{Ci}{MiCI} \quad (1)$$

در رابطه ۱، Ci: غلظت اندازه‌گیری شده فلز i در نمونه آب و MiCI: حداکثر مورد قبول غلظت فلز i بر حسب میکروگرم بر لیتر براساس استانداردهای موجود از قبیل استاندارد ملی آب آشامیدنی ایران، WHO و EPA و MI شاخص کلی فلزات مورد بررسی است. شاخص MI برای ارزیابی کلی کیفیت آب با در نظر گرفتن اثرات احتمالی فلزات سنگین بر سلامت انسان معرفی شده است. این شاخص هر چه بالاتر باشد، کیفیت آب از نظر فلزات سنگین بدتر است و مقدار بالاتر از ۱ به عنوان آستانه هشدار در نظر گرفته می‌شود. مقادیر شاخص MI در ۶ طبقه کلی خیلی پاک $MI < 0.3$ ، پاک $0.3 < MI \leq 1$ ، تحت تأثیر متوسط $1 < MI \leq 2$ ، تحت تأثیر زیاد $2 < MI \leq 4$ و $4 < MI \leq 6$ ، تحت تأثیر شدید دسته‌بندی می‌شود. برای محاسبه شاخص‌های MI و PoS برای فلزات سنگین در آب، به غلظت اندازه‌گیری شده هر فلز و همچنین استانداردهای مجاز آن فلز در آب نیاز است. این شاخص‌ها ابزارهایی برای ارزیابی کلی کیفیت آب از نظر آلودگی فلزات سنگین هستند. شاخص PoS نیز بر اساس رابطه ۲ محاسبه شد.

$$PoS = \sum_j^M QFi \quad (2)$$

$$QFi = 10^3 \times [Mj \times Wj] / Sj \quad (3)$$

در روابط شماره ۲ و ۳، Mj: نشان‌دهنده مقادیر پارامترهای کیفی مورد ارزیابی و Wj: بیان‌گر میانگین وزنی پارامترهای کیفی مورد ارزیابی است. Sj نیز بیشترین مقدار قابل قبول (Maximum permissible concentration) پارامتر کیفی مورد ارزیابی در آب است. جدول ۲ طبقه‌بندی شاخص PoS را نشان می‌دهد.

جدول ۲- طبقه‌بندی کیفیت آب براساس شاخص PoS

مقدار شاخص PoS	شدت آلودگی	توضیحات
کمتر از ۰/۱	بسیار کم	تقریباً بدون آلودگی قابل توجه
۰/۱-۰/۵	کم	آلودگی خفیف و قابل مدیریت
۰/۵-۱	متوسط	آلودگی قابل توجه، نیاز به کنترل
۱-۲	زیاد	آلودگی شدید، خطر برای سلامت
بیشتر از ۲	خیلی زیاد	آلودگی بسیار شدید

پهنه‌بندی فاکتورهای مورد بررسی: جهت به‌دست آوردن نقشه پیش‌بینی تغییرات فاکتورهای مورد نظر در این مطالعه با توجه به تعداد نقاط نمونه‌برداری، محدوده مطالعاتی و ویژگی‌های منطقه از روش درون‌یابی فاصله معکوس یا IDW^{۱۲} در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی Arc GIS استفاده شد (Belkhiri et al., 2020). این روش یکی از پرکاربردترین روش‌های مورد استفاده جهت درون‌یابی در مطالعات مختلف است. از روش IDW برای تخمین مقدار یک سطح پیوسته در مکان‌های نمونه‌برداری نشده براساس مقادیر نقاط نمونه اطراف استفاده می‌شود. اساس این روش براساس فاصله است. به این معنی که نمونه‌هایی که دارای فاصله نزدیک‌تری هستند، بایستی ارزش و تأثیر بیشتری داشته باشند. IDW با تخصیص وزن به هر نقطه نمونه براساس فاصله آن تا محل مورد نظر عمل کرده و وزن نهایی بر اساس فاصله نقاط اطراف تعیین می‌گردد. از آنجائیکه در منطقه مورد مطالعه، تمامی منابع تأمین آب مورد بررسی قرار گرفته و دارای فاصله نسبی مناسبی است، استفاده از IDW می‌تواند اطلاعات صحیحی از پراکنش آلاینده‌های مورد بررسی را نشان دهد. از طرفی دیگر، با توجه به عدم نیاز این روش به ترسیم واریوگرام و ترسیم پراکنش آلاینده‌ها به کمک فاصله نقاط، می‌تواند روش مناسبی جهت تعیین وضعیت پراکنش آلاینده‌ها باشد (Khouini et al., 2021).

اعتبارسنجی روش IDW: برای صحت‌سنجی روش IDW و مقایسه نتایج آن با مقادیر واقعی از چهار شاخص ضریب تبیین (R^2) رگرسیون خطی برای تخمین طول و اریبی روابط، شاخص توافق (d) رابطه ۴، جهت اندازه‌گیری توافق بین داده‌ها، میانگین خطای اریبی ($MBE^{۱۳}$) رابطه ۵ و مجذور میانگین مربعات خطا ($RMSE^{۱۴}$) رابطه ۶ استفاده شد (Esfandiyari et al., 2020).

$$d = 1 - \frac{\sum (st_i - Ag_i)^2}{\sum (|Ag_i - \bar{st}| + |st_i - \bar{st}|)^2} \quad (\text{رابطه ۴})$$

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^N (St_i - Ag_i)}{N} \quad (\text{رابطه ۵})$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Ag_i - St_i)^2}{N}} \quad (\text{رابطه ۶})$$

تجزیه و تحلیل داده‌ها: برای انجام کلیه آنالیزهای آماری از نرم‌افزار SPSS و برای رسم نمودارها از نرم‌افزار Origin استفاده شد. جهت انتخاب نوع آزمون آماری پارامتریک یا غیر پارامتریک، ابتدا داده‌ها از نظر نرمال و همگن بودن واریانس، به‌وسیله آزمون Kolmogorov-Smirnov بررسی شدند. پس از حصول اطمینان از نرمال بودن پراکنش داده‌ها، جهت بررسی تفاوت معنی‌دار غلظت فلزات سنگین در بین ایستگاه‌های مورد بررسی، از آزمون ANOVA با ضریب اطمینان ۹۵٪ ($P=0/05$) استفاده شد. همچنین پس از مشاهده اختلاف بین ایستگاه‌ها، جهت جداسازی گروه‌های مختلف، از پس آزمون Tukey استفاده گردید. تفاوت غلظت فلزات سنگین در بین دو فصل نمونه‌برداری نیز توسط آزمون t-test بررسی شد.

¹²Inverse Distance Weighted

¹³Mean Bias Error

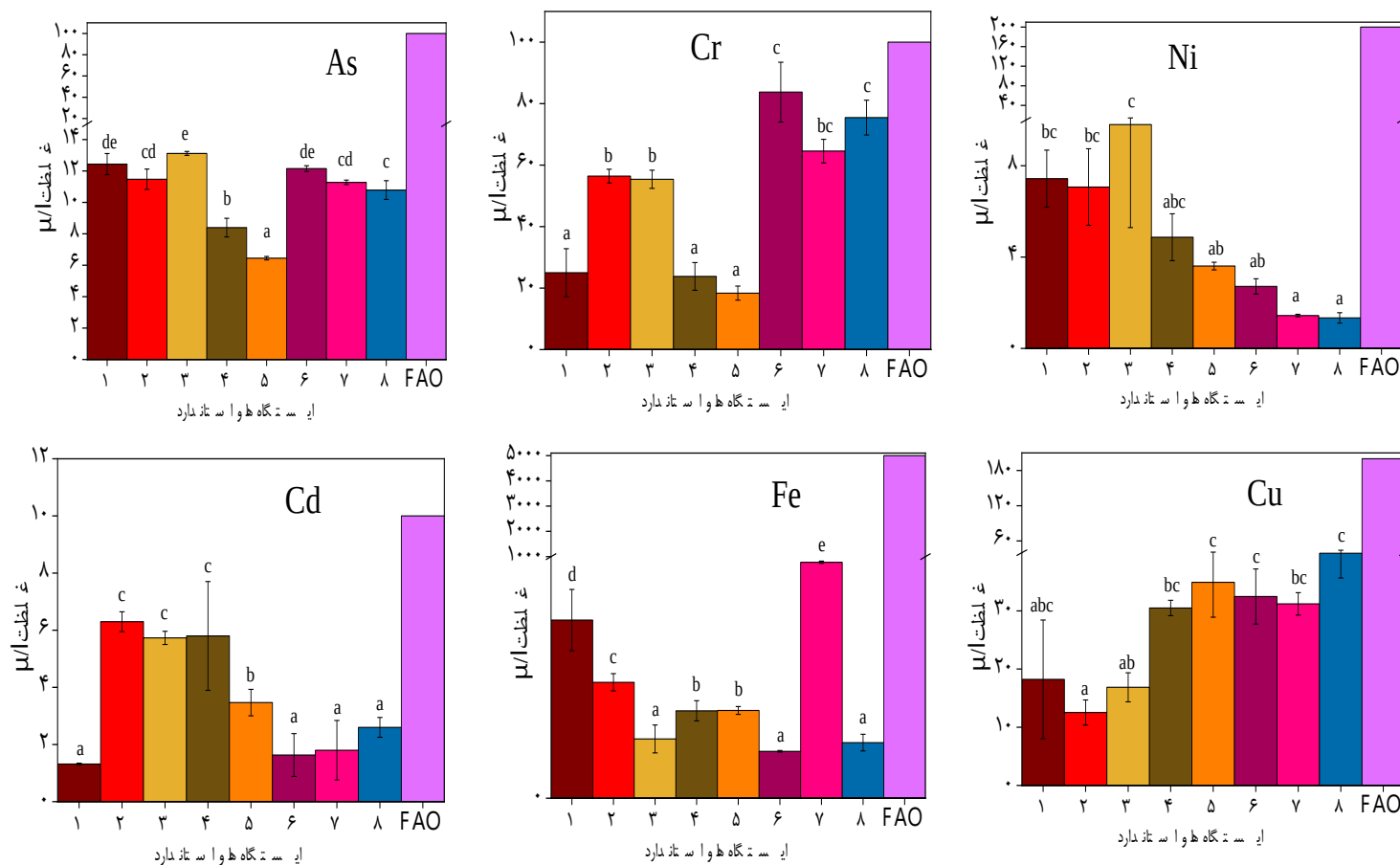
¹⁴Root Mean Square Error

یافته‌های پژوهش

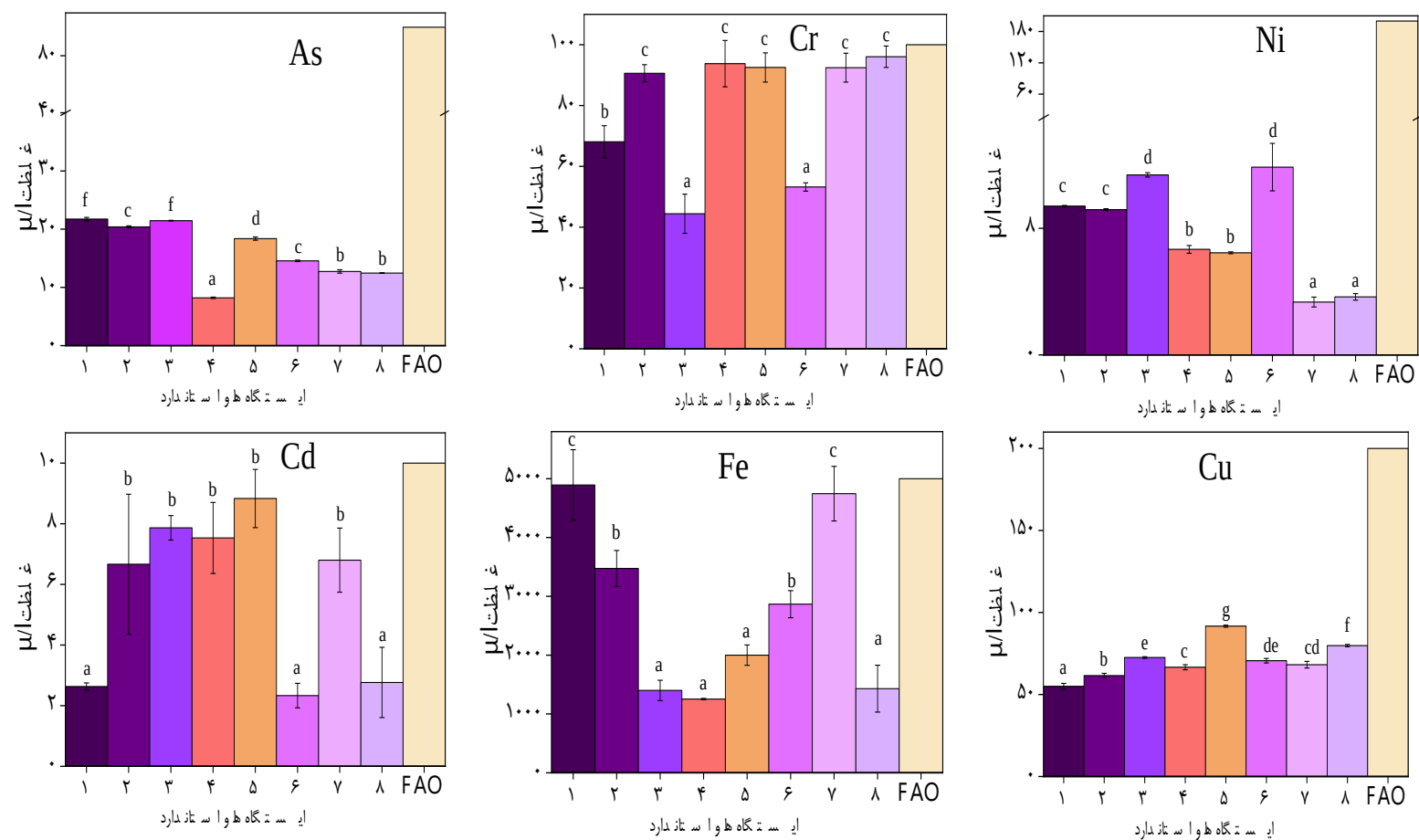
مقایسه غلظت فلزات سنگین: نتایج حاصل از مقایسه غلظت فلزات سنگین در بین ایستگاه‌های نمونه‌برداری در فصول تابستان و زمستان در شکل‌های ۲ و ۳ نشان داده شده است. غلظت فلزات سنگین جیوه و سرب در هر دو فصل نمونه‌برداری به دلیل مقدار ناچیز، قابل خوانش نبود. در فصل تابستان غلظت عناصر آرسنیک، کروم، نیکل، کادمیم، آهن و مس به ترتیب با دامنه‌های $۱۱/۴۴ \pm ۰/۱۲$ تا $۱۳/۱۱ \pm ۰/۱۲$ میکروگرم بر لیتر، $۲/۲۸ \pm ۱۸/۳۶$ تا $۹/۷۲ \pm ۸۳/۷۶$ میکروگرم بر لیتر، $۱/۴۴ \pm ۰/۰۵$ تا $۴/۵۰ \pm ۹/۸$ میکروگرم بر لیتر، $۰/۳ \pm ۱/۳۱$ تا $۰/۳۴ \pm ۶/۳$ میکروگرم بر لیتر، $۳/۴۶ \pm ۱۹۴$ تا $۴/۶۱ \pm ۹۷۶/۶۶$ میکروگرم بر لیتر و $۲/۱۵ \pm ۱۲/۵۳$ تا $۴/۲۵ \pm ۳۹/۹$ میکروگرم بر لیتر به دست آمد. غلظت فلزات مورد بررسی در بین ایستگاه‌های مختلف در فصل تابستان تفاوت معنی‌داری داشت. به طوری که، هر یک از عناصر مورد بررسی، در بین ایستگاه‌ها متغیر بود (شکل ۲). به عنوان مثال، براساس نتایج حاصل از آزمون ANOVA و پس‌آزمون Tukey، بیشترین غلظت فلز آرسنیک در این فصل، در نمونه آب ایستگاه ۵ و کمترین مقدار نیز در ایستگاه ۳ اندازه‌گیری شد. درحالی که سایر ایستگاه‌ها با اختلاف معنی‌داری در بین ایستگاه‌های مذکور قرار گرفتند ($P < ۰/۰۵$).

تفاوت غلظت عناصر در بین ایستگاه‌های مختلف در فصل زمستان در شکل ۳ نشان داده شده است. در فصل زمستان دامنه غلظت آرسنیک با مقادیر $۱۲/۲۱ \pm ۸/۲۱$ تا $۲۸/۷۳ \pm ۲۱/۷۳$ میکروگرم بر لیتر در ایستگاه‌های نمونه‌برداری سنجش شد که نمونه آب در بین ایستگاه‌های مختلف دارای تفاوت معنی‌داری بود. دامنه $۴۳/۴۳ \pm ۴۴/۴۳$ تا $۵۲/۵۲ \pm ۹۶/۰۶$ میکروگرم بر لیتر نیز با اختلاف معنی‌دار در بین ایستگاه‌های مختلف، برای عنصر کروم سنجش شد. نمونه آب در بین ایستگاه‌های مختلف دارای غلظت متفاوتی از فلز نیکل نیز بودند. به طور کلی دامنه عنصر نیکل در بین ایستگاه‌های مختلف $۳۱/۳۴ \pm ۳/۳۴$ تا $۱۱/۸۶ \pm ۱/۵$ میکروگرم بر لیتر سنجش گردید. مقادیر $۴۰/۳۳ \pm ۲/۳۳$ تا $۹۶/۸۳ \pm ۸/۸۳$ میکروگرم بر لیتر نیز برای عنصر کادمیم در بین ایستگاه‌های مختلف به دست آمد. مقایسه آماری عنصر کادمیم در بین ایستگاه‌های مختلف نیز حاکی از وجود تفاوت معنی‌دار بود. همچنین غلظت عنصر آهن با دامنه $۱۱/۵۴ \pm ۱۲۵۳/۳۳$ تا $۶۰/۴۴ \pm ۴۸۹۳/۳۳$ میکروگرم بر لیتر در بین ایستگاه‌های مختلف، دارای تفاوت معنی‌داری بود. عنصر مس نیز با مقادیر مختلفی در نمونه‌های آب سنجش شد. به طوری که این عنصر با دامنه $۱۱/۷۷ \pm ۵۵/۰۱$ تا $۶۳/۹۱ \pm ۹۱/۶۷$ میکروگرم بر لیتر در بین ایستگاه‌های مختلف به دست آمد ($P < ۰/۰۵$).

مقادیر عناصر و فاکتورهای کیفی آب با استاندارد FAO مقایسه شد (جدول ۳). مقدار شوری و TDS در برخی ایستگاه‌های مورد بررسی بویژه در فصل زمستان بالاتر از حد مجاز کاربری کشاورزی بود. افزایش شوری منابع آب در منطقه مورد مطالعه در برخی ایستگاه‌ها شامل چاله برق، فلفلی، آل گرگ، جی سرخ به دلیل محدودیت وجود ماشین‌آلات لایروبی به‌ویژه بیل مکانیکی بوده که به علت عدم برداشت آب، موجب افزایش شوری آب شده است و مورد استفاده قرار نگرفته است. همچنین براساس نتایج به دست آمده (شکل ۴)، بیشترین غلظت عناصر در فصل زمستان و کمترین غلظت در فصل تابستان مشاهده شد ($P < ۰/۰۵$). این نتیجه حاکی از افزایش غلظت فلزات سنگین در فصل زمستان و تأثیر احتمالی کاهش سطح آب باشد. کاهش معنی‌دار غلظت فلزات از فصل زمستان به تابستان احتمالاً به دلیل آبیگری مجدد چاه‌نیمه‌ها و احیای سایر منابع آبی اطراف از طریق ورودی آب جدید است.



شکل ۲- مقایسه فلزات در بین ایستگاه‌های نمونه‌برداری در فصل تابستان

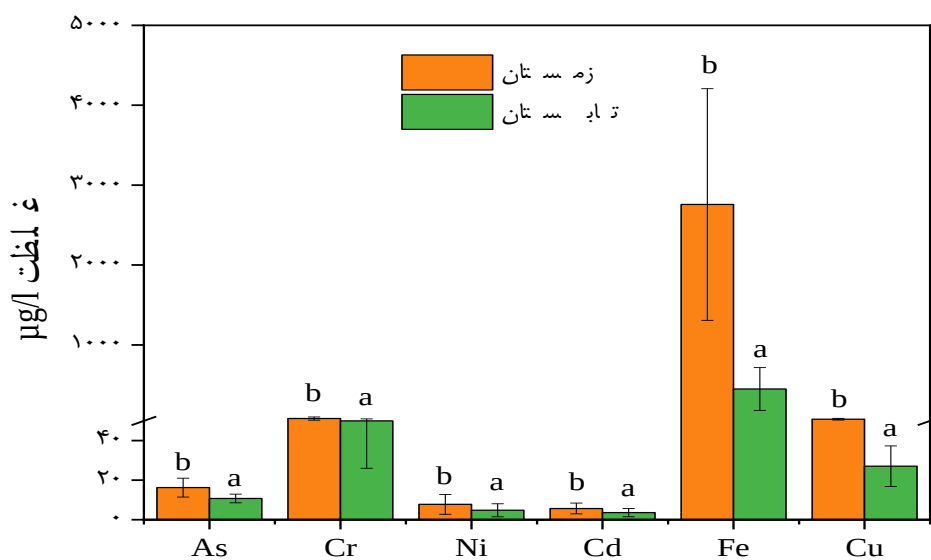


شکل ۳- مقایسه فلزات در بین ایستگاه‌های نمونه‌برداری در فصل زمستان

جدول ۳- مقایسه متوسط فاکتورهای کیفی آب با استاندارد کشاورزی (Ayers) FAO (Irrigation and Drainage Paper No. 29) (and Westcot, 1994)

پارامتر	ایستگاه	تابستان	زمستان	FAO	توضیح
As (میکروگرم بر لیتر)	۱	۱۲/۴۴	۲۱/۷۳	۱۰۰	در صورت بالاتر بودن از استاندارد، سمیت بالا برای گیاهان
	۲	۱۱/۴۷	۲۰/۳۹		
	۳	۱۳/۱۲	۲۱/۴۶		
	۴	۸/۳۹	۸/۲۱		
	۵	۶/۴۵	۱۸/۳۷		
	۶	۱۲/۱۵	۱۴/۵۶		
	۷	۱۱/۲۷	۱۲/۷۳		
	۸	۱۰/۷۸	۱۲/۴۶		
Cr (کل) (میکروگرم بر لیتر)	۱	۲۵	۶۸/۱	۱۰۰	تنها کروم VI حتی در غلظت پایین نیز سمی است.
	۲	۵۶/۴۳	۹۰/۶۳		
	۳	۵۵/۴	۴۴/۴۳		
	۴	۲۳/۸	۹۳/۸		
	۵	۱۸/۳۶	۹۲/۵۳		
	۶	۸۳/۷۶	۵۳/۲۳		
	۷	۶۴/۵۶	۹۲/۴۶		
	۸	۴۶/۷۵	۹۶/۰۶		
Cd (میکروگرم بر لیتر)	۱	۱/۳۱	۲/۶۳	۱۰	در صورت بالاتر بودن از استاندارد، سمیت شدید برای گیاهان
	۲	۶/۳	۶/۶۶		
	۳	۵/۷۳	۷/۸۶		
	۴	۵/۸	۷/۵۳		
	۵	۳/۴۶	۸/۸۳		
	۶	۱/۶۳	۲/۳۳		
	۷	۱/۸	۶/۸		
	۸	۲/۶	۲/۷۶		
Ni (میکروگرم بر لیتر)	۱	۷/۴۳	۹/۴۰	۲۰۰	در صورت بالاتر بودن از استاندارد دارای سمیت متوسط
	۲	۷/۰۶	۹/۱۸		
	۳	۹/۸	۱۱/۳۷		
	۴	۴/۸۶	۶/۶۷		
	۵	۳/۶۰	۶/۴۶		
	۶	۲/۷۱	۱۱/۸۶		
	۷	۱/۴۴	۳/۳۴		
	۸	۱/۳۳	۳/۶۶		
Fe (میکروگرم بر لیتر)	۱	۷۳۷/۳۳	۴۸۹۳/۳۳	۵۰۰۰	در مقادیر بالا موجب گرفتگی سیستم آبیاری قطره‌ای می‌شود
	۲	۴۷۹/۶۶	۳۴۷۳/۳۳		
	۳	۲۴۵/۳۳	۱۴۰۰		
	۴	۳۶۱/۶۶	۱۲۵۳/۳۳		
	۵	۳۶۳/۳۳	۲۰۰۰		
	۶	۱۹۴	۲۸۶۶/۶۶		
	۷	۹۷۶/۶۶	۴۷۴۵/۳۳		
	۸	۲۳۰	۱۴۳۰		
Cu (میکروگرم بر لیتر)	۱	۱۸/۲۳	۵۵/۰۱	۲۰۰	سمیت بالا برای گیاهان در مقادیر بیش از حد
	۲	۱۲/۵۳	۶۱/۵۵		
	۳	۱۶/۸۶	۷۲/۵۴		
	۴	۳۰/۵	۶۶/۶۳		
	۵	۳۴/۹	۹۱/۶۷		
	۶	۳۲/۴۶	۷۰/۶۰		

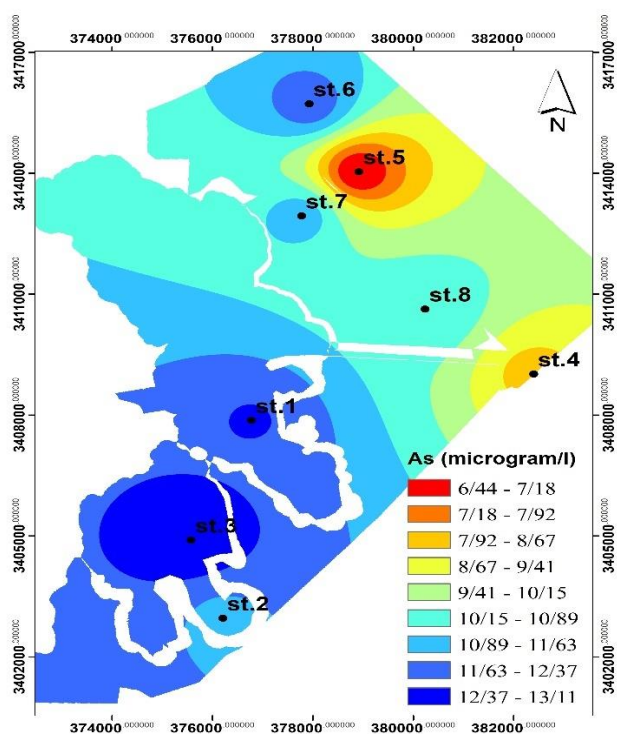
		۸۶/۱۶	۳۱/۲	۷	
		۷۹/۸	۳۹/۹	۸	
		۹/۷	۱۰/۱۱	۱	
		۱۳/۴	۸/۸	۲	
		۶۰/۵	۲۸	۳	
۰/۴۵ درجه عالی و ۲ قابل قبول است. بالاتر از ۲ گرم بر لیتر ممکن است موجب تنش شوری شود.	۰/۴۵ - ۲	۱/۵	۱/۷	۴	TDS (گرم بر لیتر)
		۲۸/۳	۳/۷	۵	
		۷/۵	۲/۷	۶	
		۴/۴۰	۵	۷	
		۴	۳/۹	۸	
		۰/۶۸	۰/۶۹	۱	
		۱۲/۹	۷/۳۱	۲	
		۵۲/۸	۲۰/۹	۳	
در شوری بالا، استفاده در محصولات زراعی می‌تواند موجب کاهش محصولات شود.	۰/۷	۱/۱۲	۱/۲۶	۴	شوری (گرم بر لیتر)
		۲۵	۲/۹۰	۵	
		۶	۶/۰۹	۶	
		۳/۴۶	۳/۹۴	۷	
		۳/۱۵	۳/۱۴	۸	
		۸/۶۵	۸/۷	۱	
		۸/۹۸	۹/۴۴	۲	
		۸/۸۵	۹/۳۲	۳	
دامنه مناسب برای بیشتر محصولات و جذب عناصر غذایی	۵/۴ - ۶/۸	۷/۹۶	۸/۰۴	۴	pH
		۹/۶۷	۹/۳۲	۵	
		۹/۰۵	۹/۱۲	۶	
		۸/۷۹	۹/۰۱	۷	
		۸/۲	۸/۸۷	۸	



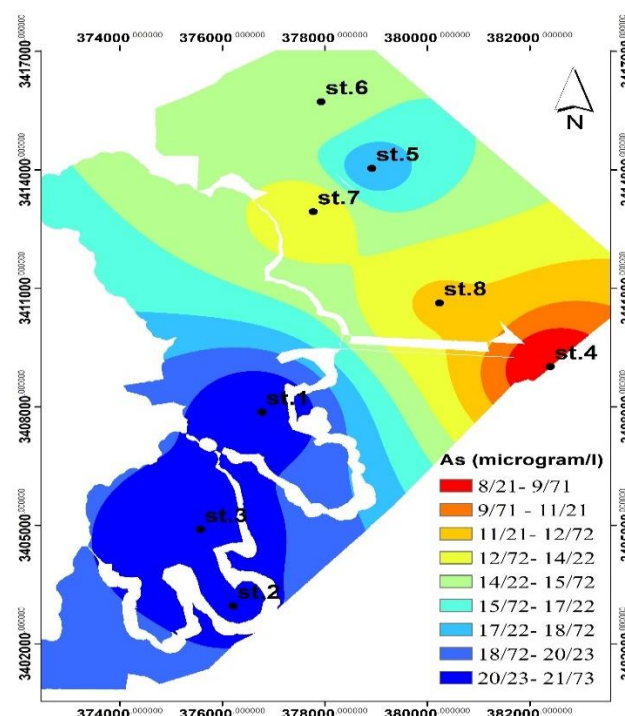
شکل ۴- مقایسه غلظت فلزات سنگین در بین دو فصل نمونه‌برداری ($P < 0.05$)

پهنه‌بندی فلزات سنگین و فاکتورهای کیفی آب: جهت بررسی پراکنش غلظت فلزات سنگین و فاکتورهای کیفی آب، پهنه‌بندی منابع سطحی و زیرسطحی با استفاده از تکنیک‌های درون‌یابی انجام شد. نتایج حاصل، که در شکل‌های ۵ و ۶ ارائه شده‌اند، نشان دادند که غلظت فلزات سنگین و فاکتورهای کیفی آب شامل شوری و pH علاوه بر تغییرات مکانی، در بین فصول

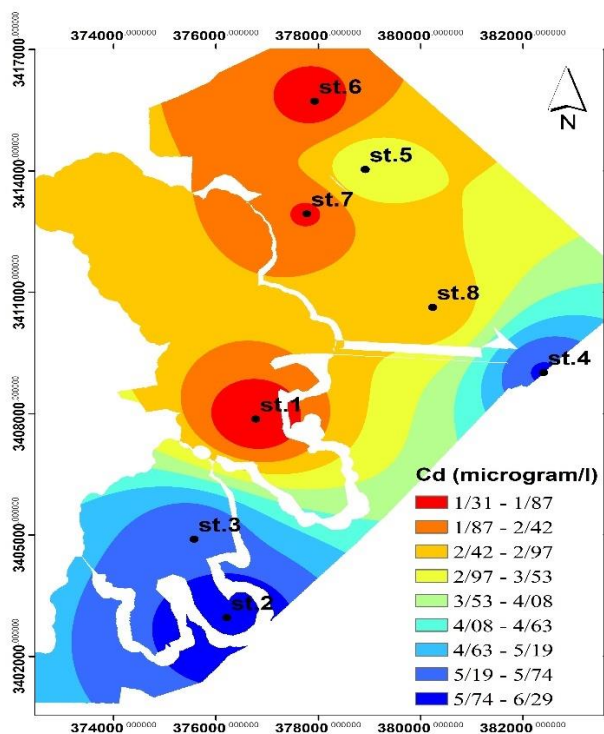
مختلف نیز متفاوت است. به‌طوری‌که بیشترین غلظت فلزات در فصل زمستان و کمترین غلظت در فصل تابستان اندازه‌گیری شد. بررسی پراکنش فلزات سنگین در تصاویر پهنه‌بندی با نتایج تحلیل واریانس (ANOVA) نیز همخوانی داشت، به‌طوری‌که مقادیر تخمینی با مقادیر نمونه‌برداری شده تطابق قابل توجهی را نشان داد. این تطابق نشان‌دهنده صحت داده‌های درون‌یابی و قابلیت استفاده‌ها در تحلیل‌های کمی است. همچنین، پهنه‌بندی به‌وضوح نشان داد که پراکنش فاکتورها در نقاط مختلف منطقه ناهمگون است و برخی ایستگاه‌ها، به‌ویژه در مجاورت منابع ورودی آب، تغییرات فصلی بیشتری را تجربه می‌کنند. این اطلاعات می‌تواند به شناسایی نقاط حساس و مدیریت بهتر منابع آب کمک کند. اعتبارسنجی روش IDW نیز نتایج بسیار دقیقی ارائه داد. به‌طوری‌که مقادیر شاخص‌ها به‌ترتیب $MBE=0$ ، $d=1$ ، $RSME=0$ و $R^2=1$ بود، که نشان‌دهنده انطباق کامل بین مقادیر نمونه‌برداری شده و مقادیر تخمینی است. این موضوع تأکید می‌کند که تکنیک‌های درون‌یابی مورد استفاده قادر به پر کردن خلأهای داده‌ای و ارائه نمای دقیق از پراکنش فاکتورها هستند.



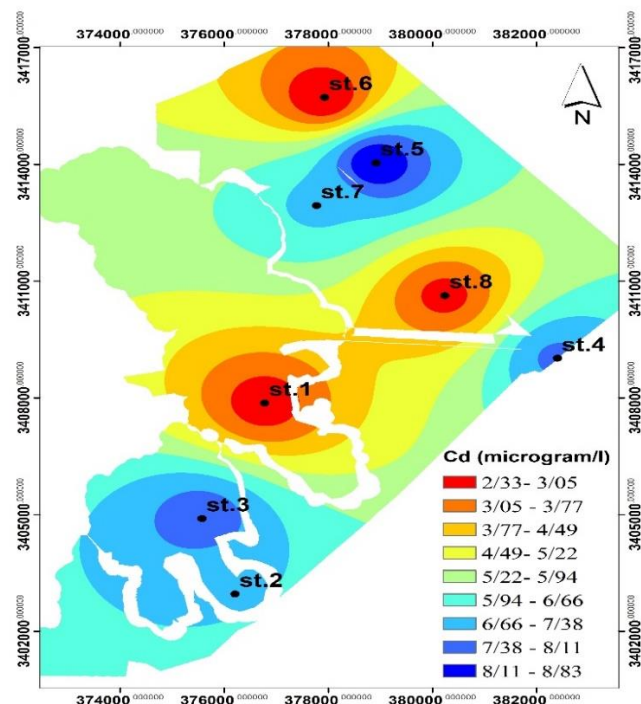
a, As



b, As

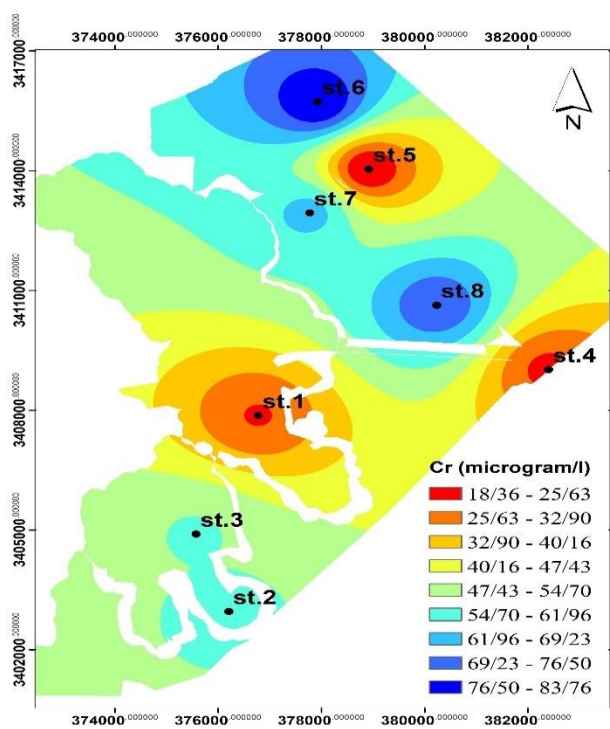


a, Cd

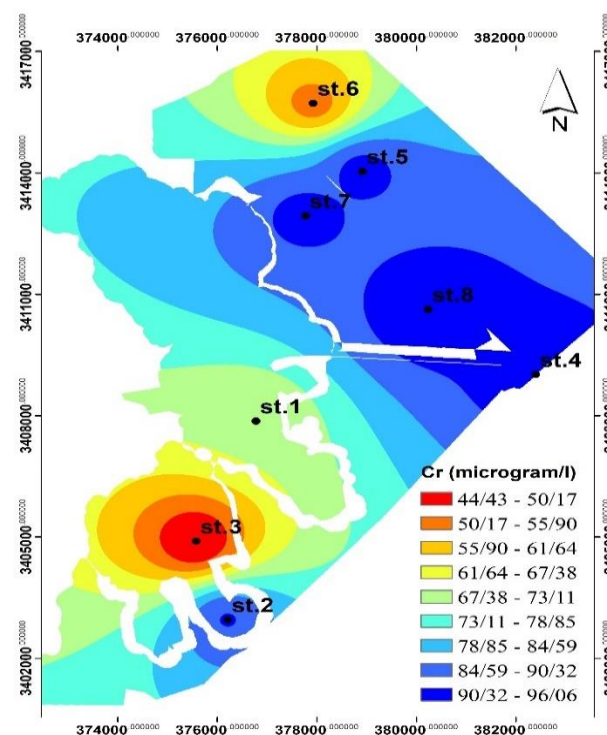


b, Cd

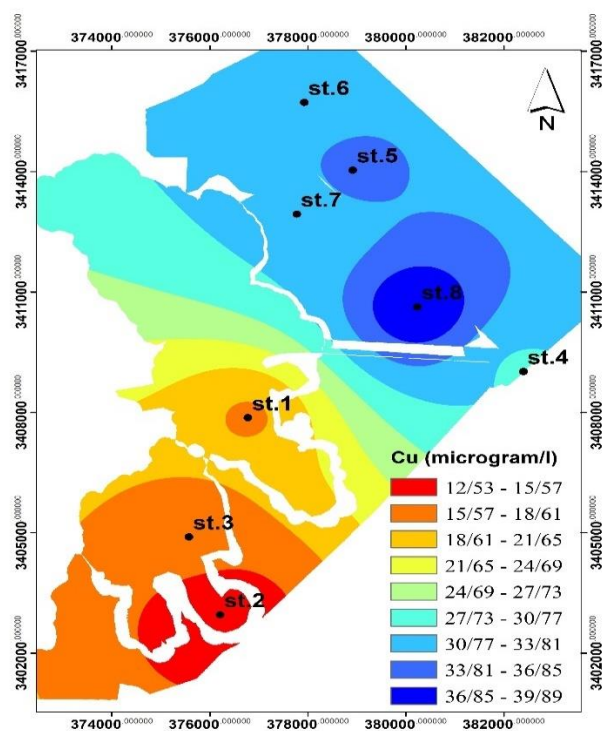
شکل ۵- پهنه‌بندی عناصر در دو فصل تابستان (a) و زمستان (b)



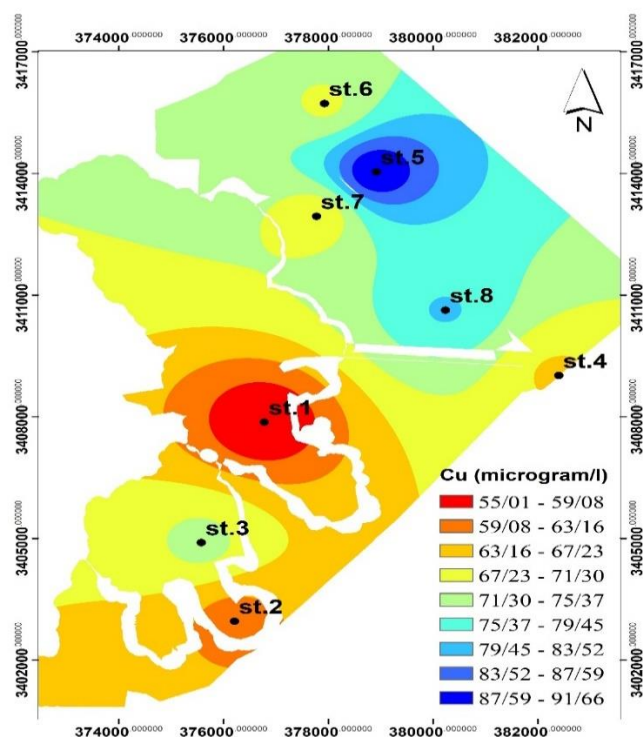
a, Cr



b, Cr

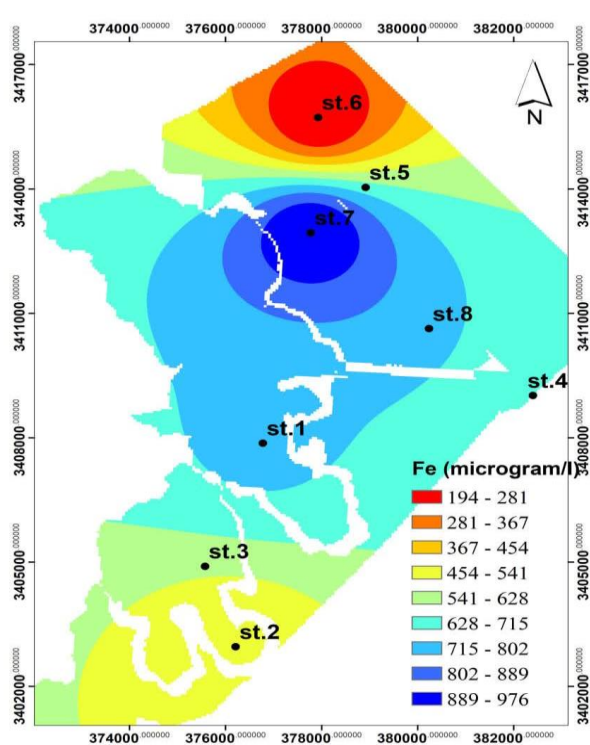


a, Cu

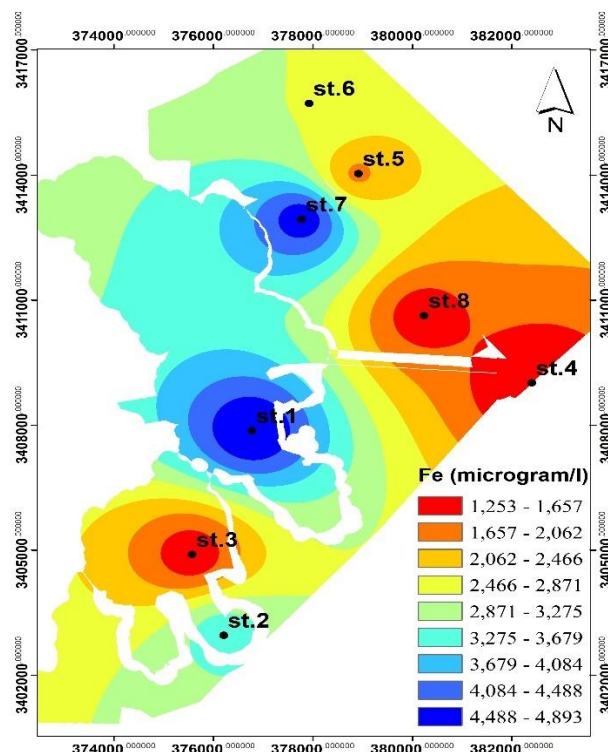


b, Cu

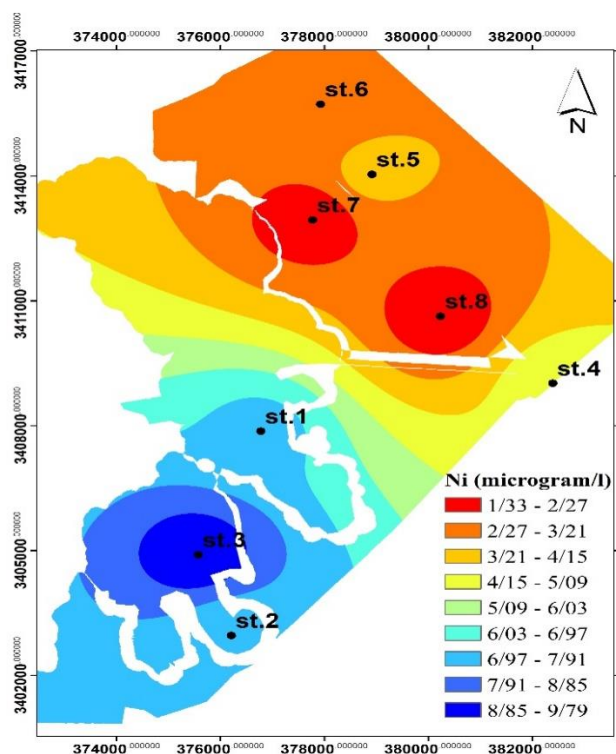
ادامه شکل ۵- پهنه‌بندی عناصر در دو فصل تابستان (a) و زمستان (b)



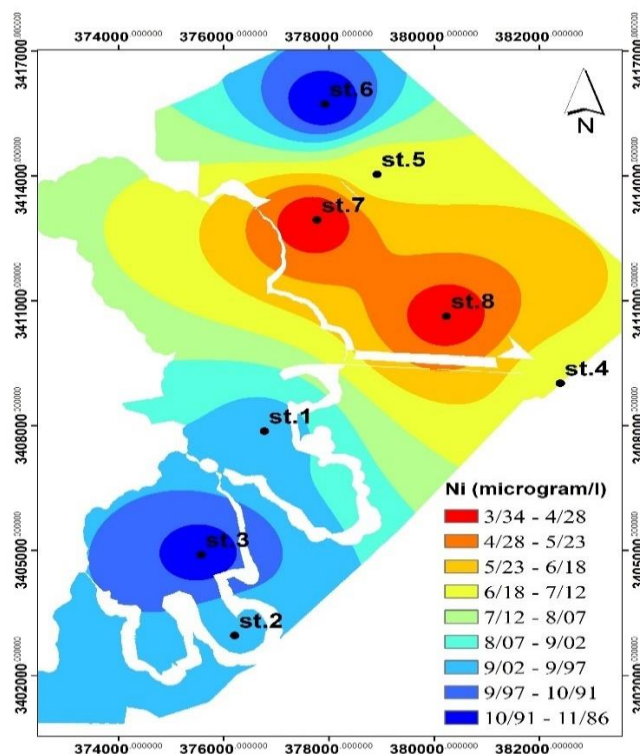
a, Fe



b, Fe

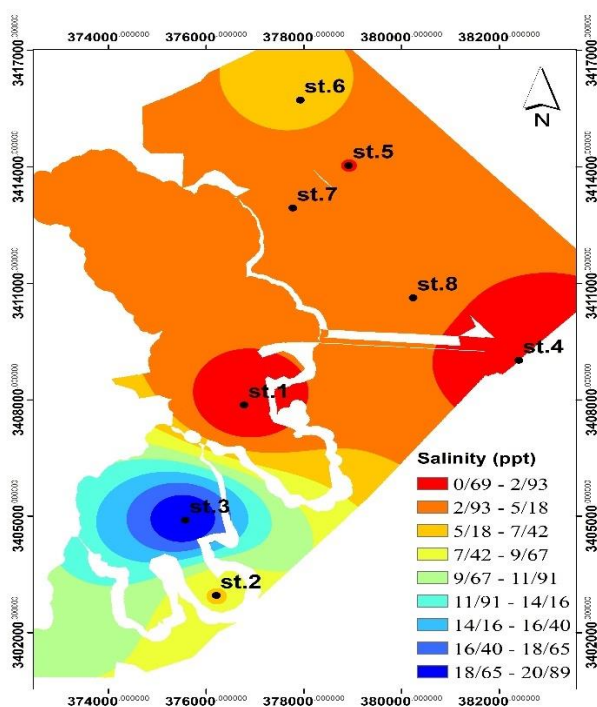


a, Ni

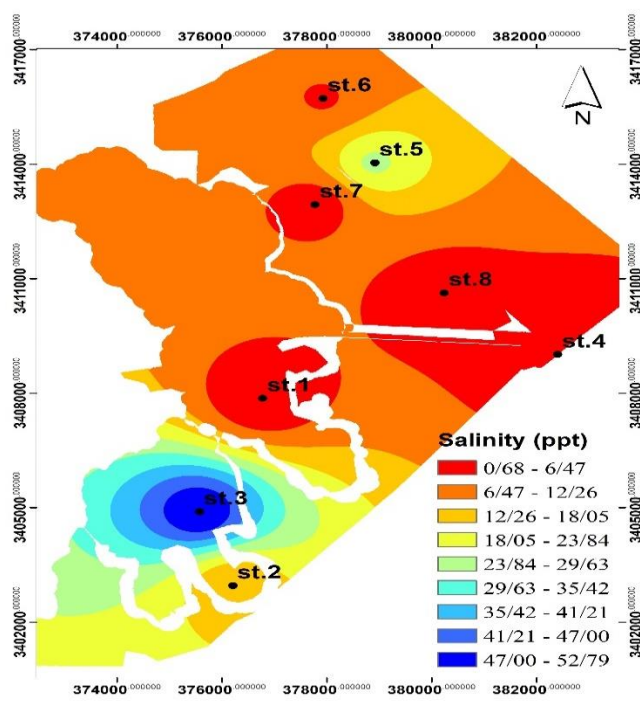


b, Ni

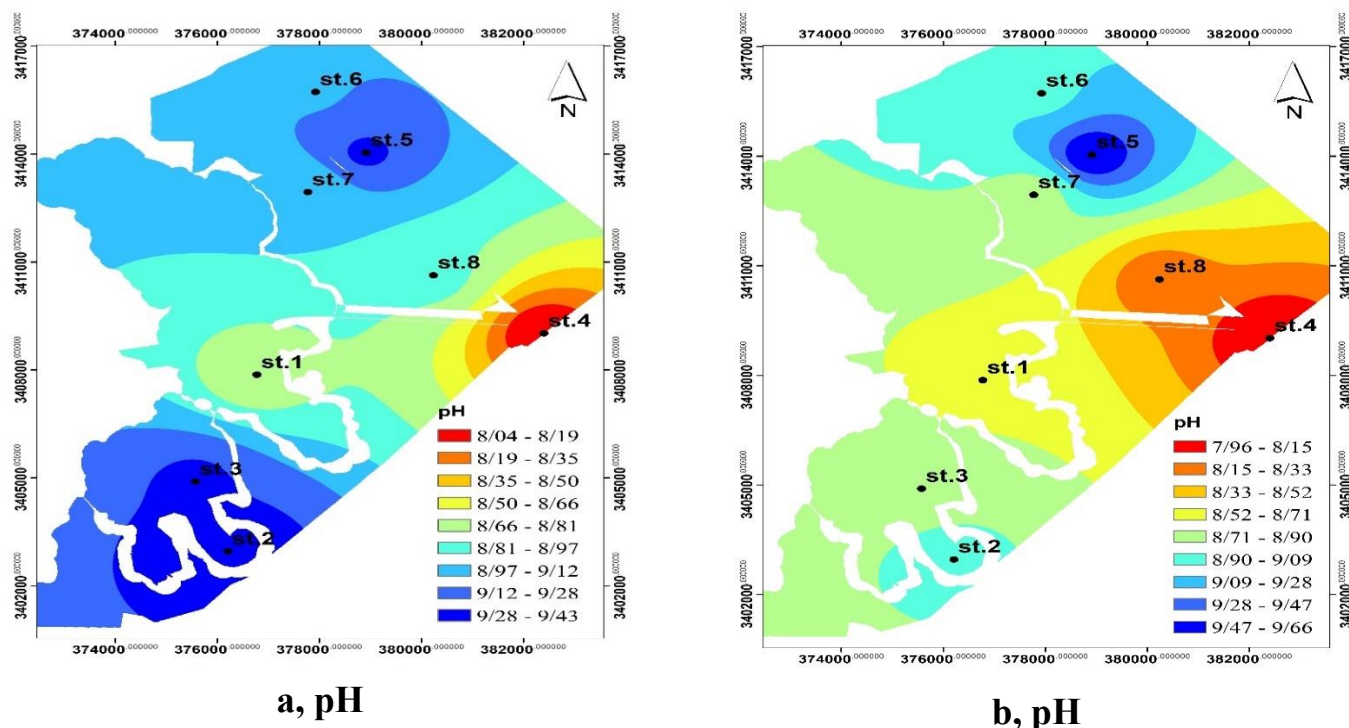
ادامه شکل ۵- پهنه‌بندی عناصر در دو فصل تابستان (a) و زمستان (b)



a, Salinity



b, Salinity



شکل ۶- پهنه‌بندی فاکتورهای فیزیکوشیمیایی آب تابستان (a) و زمستان (b)

شاخص‌های MI و PoS: مقدار تجمیعی شاخص MI برای کاربری کشاورزی در فصل زمستان و تابستان در جداول ۴ و ۵ ارائه شده است. دامنه مقادیر تجمیعی شاخص MI برای عناصر در کاربری کشاورزی طی فصل زمستان در بازه ۱/۸۹۶ تا ۳/۰۳۹ تعیین شد. این دامنه نشان‌دهنده قرارگیری ایستگاه‌های نمونه‌برداری در شرایط «تحت تأثیر متوسط» تا «تحت تأثیر زیاد» است. با وجود این، با توجه به استفاده محدود و موقتی این منابع آبی برای آبیاری درختان و همچنین وقوع اختلاط با آب شرب در برخی ایستگاه‌ها، ارزیابی‌ها حاکی از آن است که این منابع در مجموع تهدیدی برای کاربری کشاورزی در اراضی مورد مطالعه ایجاد نمی‌کنند. از طرفی دیگر، در فصل تابستان و همزمان با ورود آب از رودخانه هیرمند و افزایش تراز آب، مقدار شاخص MI کاهش یافته و در بازه ۰/۷۸۱ تا ۱/۵۰۳ قرار گرفت که بیانگر وضعیت «تحت تأثیرگذاری کم» است. افزون بر این، در برخی ایستگاه‌ها مقدار MI کمتر از ۱ به دست آمد که نشان‌دهنده مناسب بودن کیفیت آب برای کاربری کشاورزی از منظر بار تجمیعی فلزات سنگین است.

جدول ۴- شاخص MI برای مصرف کشاورزی در فصل تابستان

ایستگاه	As	Cr	Ni	Cd	Fe	Cu	MI تجمیعی کشاورزی
۱	۰/۱۲۴	۰/۲۵۰	۰/۰۳۷	۰/۰۹۱	۰/۱۴۷	۰/۱۳۲	۰/۷۸۱
۲	۰/۱۱۵	۰/۵۶۴	۰/۰۳۵	۰/۰۶۳	۰/۰۹۶	۰/۶۳۰	۱/۵۰۳
۳	۰/۱۳۱	۰/۵۵۴	۰/۰۴۹	۰/۰۸۴	۰/۰۴۹	۰/۵۷۳	۱/۴۴۰
۴	۰/۰۸۴	۰/۲۳۸	۰/۰۲۴	۰/۱۵۳	۰/۰۷۲	۰/۵۸۰	۱/۱۵۱
۵	۰/۰۶۴	۰/۱۸۴	۰/۰۱۸	۰/۱۷۵	۰/۰۷۳	۰/۳۴۷	۰/۸۶۱
۶	۰/۱۲۲	۰/۸۳۸	۰/۰۱۴	۰/۱۶۲	۰/۰۳۹	۰/۱۶۳	۱/۳۳۸
۷	۰/۱۱۳	۰/۶۴۶	۰/۰۰۷	۰/۱۵۶	۰/۱۹۵	۰/۱۸۰	۱/۲۹۷
۸	۰/۱۰۸	۰/۷۵۵	۰/۰۰۷	۰/۱۹۹	۰/۰۴۶	۰/۲۶۰	۱/۳۷۵

جدول ۵- شاخص MI برای مصرف کشاورزی در فصل زمستان

ایستگاه	As	Cr	Ni	Cd	Fe	Cu	MI تجمیعی کشاورزی
۱	۰/۲۱۷	۰/۶۸۱	۰/۰۴۷	۰/۲۶۳	۰/۹۷۹	۰/۲۷۵	۲/۵۴۶
۲	۰/۲۰۴	۰/۹۰۶	۰/۰۴۶	۰/۶۶۷	۰/۶۹۵	۰/۳۰۸	۲/۸۲۶
۳	۰/۲۱۵	۰/۴۴۴	۰/۰۵۷	۰/۷۸۷	۰/۲۸۰	۰/۳۶۳	۲/۱۴۶
۴	۰/۰۸۲	۰/۹۳۸	۰/۰۳۳	۰/۷۵۳	۰/۲۵۱	۰/۳۳۳	۲/۳۹۰
۵	۰/۱۸۴	۰/۹۲۵	۰/۰۳۲	۰/۸۸۳	۰/۴۰۰	۰/۴۵۸	۲/۸۸۲
۶	۰/۱۴۶	۰/۵۳۲	۰/۰۵۹	۰/۲۳۳	۰/۵۷۳	۰/۳۵۳	۱/۸۹۶
۷	۰/۱۲۷	۰/۹۲۵	۰/۰۱۷	۰/۶۸۰	۰/۹۴۹	۰/۳۴۱	۳/۰۳۹
۸	۰/۱۲۵	۰/۹۶۱	۰/۰۱۸	۰/۲۷۷	۰/۲۸۶	۰/۳۹۹	۲/۰۶۶

نتایج مربوط به شاخص PoS نیز در جداول ۶ و ۷ ارائه شده است. مقادیر این شاخص در دو فصل مورد مطالعه در بازه ۱/۰۱۱ تا ۸/۴۰۷ بود. برخی ایستگاه‌ها، از جمله ایستگاه شماره ۳، مقادیر نسبتاً بالایی داشتند که این وضعیت عمدتاً از شوری بالاتر آب ناشی شده و براساس طبقه‌بندی کیفیت آب مبتنی بر PoS نیاز به بازنگری دارد. در عین حال، با توجه به استفاده در آبیاری درختان، احتمال تأثیر عوامل مورد بررسی بر فرآیند کشاورزی کمتر خواهد بود.

جدول ۶- شاخص PoS برای مصرف کشاورزی در فصل تابستان

ایستگاه	As	Cr	Ni	Cd	Fe	Cu	شوری	PoS تجمیعی کشاورزی
۱	۰/۱۲۴	۰/۲۵	۰/۰۳۷	۰/۱۳۲	۰/۱۴۷	۰/۰۹۱	۰/۲۳	۱/۰۱۱
۲	۰/۱۱۵	۰/۵۶۴	۰/۰۳۵	۰/۶۳	۰/۰۹۶	۰/۰۶۳	۲/۴۳۷	۳/۹۴
۳	۰/۱۳۱	۰/۵۵۴	۰/۰۴۹	۰/۵۷۳	۰/۰۴۹	۰/۰۸۴	۶/۹۶۷	۸/۴۰۷
۴	۰/۰۸۴	۰/۲۳۸	۰/۰۲۴	۰/۵۸	۰/۰۷۲	۰/۱۵۳	۰/۴۲	۱/۵۷
۵	۰/۰۶۴	۰/۱۸۴	۰/۰۱۸	۰/۳۴۷	۰/۰۷۳	۰/۱۷۵	۰/۹۶۷	۱/۸۲۸
۶	۰/۱۲۲	۰/۸۳۸	۰/۰۱۴	۰/۱۶۳	۰/۰۳۹	۰/۱۶۲	۲/۰۳	۳/۳۱۸
۷	۰/۱۱۳	۰/۶۴۶	۰/۰۰۷	۰/۱۸	۰/۱۹۵	۰/۱۵۶	۱/۳۱۳	۲/۶۱
۸	۰/۱۰۸	۰/۷۵۵	۰/۰۰۷	۰/۲۶	۰/۰۴۶	۰/۱۹۹	۱/۰۴۷	۲/۴۲۲

جدول ۷- شاخص PoS برای مصرف کشاورزی در فصل زمستان

ایستگاه	As	Cr	Ni	Cd	Fe	Cu	شوری	PoS تجمیعی کشاورزی
۱	۰/۲۱۷	۰/۶۸۱	۰/۰۴۷	۰/۲۶۳	۰/۹۷۹	۰/۲۷۵	۰/۲۲۷	۲/۶۸۹
۲	۰/۲۰۴	۰/۹۰۶	۰/۰۴۶	۰/۶۶۷	۰/۶۹۵	۰/۳۰۸	۳/۴	۷/۱۲۶
۳	۰/۲۱۵	۰/۴۴۴	۰/۰۵۷	۰/۷۸۷	۰/۲۸۰	۰/۳۶۳	۱۷/۶	۱۹/۷۴۶
۴	۰/۰۸۲	۰/۹۳۸	۰/۰۳۳	۰/۷۵۳	۰/۲۵۱	۰/۳۳۳	۰/۲۷۳	۲/۷۶۳
۵	۰/۱۸۴	۰/۹۲۵	۰/۰۳۲	۰/۸۸۳	۰/۴۰۰	۰/۴۵۸	۸/۳۳۳	۱۱/۲۱۵
۶	۰/۱۴۶	۰/۵۳۲	۰/۰۵۹	۰/۲۳۳	۰/۵۷۳	۰/۳۵۳	۲	۳/۸۹۶
۷	۰/۱۲۷	۰/۹۲۵	۰/۰۱۷	۰/۶۸۰	۰/۹۴۹	۰/۳۴۱	۱/۱۵۳	۴/۱۹۲
۸	۰/۱۲۵	۰/۹۶۱	۰/۰۱۸	۰/۲۷۷	۰/۲۸۶	۰/۳۹۹	۱/۰۵	۳/۱۱۶

بحث و نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از بررسی غلظت فلزات سنگین در ایستگاه‌های مختلف و طی فصول نمونه‌برداری، بیانگر وجود اختلاف معنی‌دار در الگوهای مکانی و زمانی غلظت عناصر است. وجود این اختلاف‌ها می‌تواند نشان‌دهنده شدت و منشأ ورودی‌های آلاینده، شرایط هیدرولوژیک و ویژگی‌های محلی هر ایستگاه باشد که می‌تواند نقش تعیین‌کننده‌ای در میزان تجمع فلزات داشته باشد. در بررسی

تغییرات مکانی و زمانی غلظت فلزات سنگین، عوامل مختلفی بر رفتار و غلظت این عناصر تأثیر می‌گذارند. به عنوان مثال، مواد آلی محلول مانند DOM^{۱۵} و DOC^{۱۶} می‌توانند از طریق تشکیل کمپلکس‌های آلی، انتقال و تحرک فلزات را تحت تأثیر قرار دهند (Wang *et al.*, 2025). همچنین ویژگی‌های ژئوشیمیایی آب، شامل pH، سختی، قلیائیت و شوری، نقش مهمی در پایداری و شکل‌گیری گونه‌های مختلف فلزی دارند. شرایط فیزیکی آب مانند دما، جریان و نوسانات سطح آب نیز می‌توانند الگوی توزیع فلزات را تغییر دهند. علاوه بر این، ترکیب یونی و شیمی عمومی آب، به‌ویژه غلظت کاتیون‌ها و آنیون‌هایی مانند Ca^{2+} ، Mg^{2+} ، Cl^{-} و SO_4^{2-} بر رفتار ژئوشیمیایی فلزات اثرگذار است. ویژگی‌های بستر منطقه نیز می‌توانند ظرفیت جذب یا آزادسازی فلزات را تحت تأثیر قرار دهند. در نهایت، در مناطق خشک، شدت تبخیر و تمرکز فصلی آب از عوامل کلیدی هستند که موجب می‌شوند غلظت فلزات در طول سال متغیر باشد. یافته‌های این مطالعه با گزارشی که توسط Bhutiani و همکاران (۲۰۱۶) ارائه شده است نیز همخوانی دارد. به‌طوری‌که آنها نیز تفاوت قابل توجهی را در غلظت فلزات سنگین بین ایستگاه‌های مختلف گزارش کرده‌اند. در مطالعه این محققین، پنج فلز سنگین شامل کبالت (Co)، کروم (Cr)، آهن (Fe)، نیکل (Ni) و روی (Zn) به مدت یک سال و به صورت ماهانه در ۱۸ نقطه از آب‌های زیرزمینی اطراف و داخل منطقه صنعتی هریدوار پایش شد. نتایج نشان داد که از مجموع ۲۱۶ نمونه، مقادیر کبالت، کروم، آهن و نیکل به ترتیب در ۱۹۹، ۱۹۶، ۷۱ و ۱۴۷ نمونه از حد استاندارد فراتر رفت. میانگین غلظت‌ها به ترتیب برای کبالت، کروم، آهن و نیکل برابر 0.45 ± 0.12 ، 0.38 ± 0.10 ، 0.45 ± 0.25 و 0.18 ± 0.52 میلی‌گرم بر لیتر بود. علاوه بر تفاوت‌های مشاهده‌شده در غلظت عناصر میان مناطق مختلف نمونه‌برداری، نتایج تحلیل واریانس دوطرفه نیز نشان داد که تغییر فصل صرفاً بر غلظت آهن و روی اثر معنی‌دار داشته و سایر عناصر تحت تأثیر نوسانات فصلی قرار نداشتند. همچنین در مطالعه حاضر، توزیع نامتوازن فلزات مورد بررسی از قبیل کروم و نیکل می‌تواند نشان‌دهنده منابع نقطه‌ای این عناصر باشد که در مطالعات مشابه نیز مشاهده شده است. تفاوت میزان تبخیر آب، میزان آبدهی، عدم ارتباط بین چاه‌ها، شوری آب، تفاوت عمق برداشت آب و خاک بستر می‌تواند از عوامل احتمالی تفاوت در غلظت فلزات در منابع آبی و ایجاد تغییرات نقطه‌ای عناصر باشد (Vallejo *et al.*, 2021; Li *et al.*, 2024). به‌طوری‌که در مطالعه حاضر نیز متفاوت بودن غلظت عناصر مختلف از قبیل مس را می‌توان به این عوامل نسبت داد. این تفاوت‌های مکانی در غلظت فلزات سنگین، اهمیت پایش مستمر و بررسی منابع آلاینده را برای حفظ کیفیت آب و سلامت اکوسیستم‌های آبی تأکید می‌کند. نتیجه پژوهش An و همکاران (۲۰۲۴) نیز نشان داد که تفاوت معنی‌دار غلظت عناصر کادمیم و آهن بین ایستگاه‌ها، احتمالاً ناشی از عمق برداشت، زمان برداشت و تجهیزات برداشت آب، جنس خاک و میزان بالای تبخیر آب باشد. این محققین اظهار داشتند که تفاوت غلظت عناصر کادمیم، کروم و نیکل در منطقه مورد مطالعه، عمدتاً با فرآیندهای طبیعی مرتبط بوده و عواملی مانند میانگین دمای سالانه، میانگین بارندگی سالانه، ویژگی ژئومورفیک، ماده آلی و بافت خاک (شن، سیلت و رس) از عوامل اصلی کنترل‌کننده مؤثر بر توزیع مکانی فلزات خاک هستند.

میزان آبدهی چاه‌ها و متفاوت بودن منابع آبی نیز می‌تواند تأثیر معنی‌داری بر غلظت فلزات سنگین داشته باشد. منابع تغذیه‌کننده آب، ممکن است حاوی غلظت‌های متفاوتی از فلزات سنگین باشند. اگر چاه‌های یک ناحیه از منابع آبی جداگانه تغذیه شوند و ارتباط هیدرولیکی بین آنها وجود نداشته باشد، هر چاه ممکن است ویژگی‌های شیمیایی منحصر به فردی داشته باشد (Wet *et al.*, 2020). شوری آب از طریق تضعیف پیوند میان فلزات سنگین و ذرات خاک، می‌تواند سبب انتقال این فلزات به فاز محلول و افزایش غلظت آنها در آب شود. هنگامی که شوری آب افزایش می‌یابد (به‌ویژه غلظت یون‌های Na^{+} و Cl^{-})، این یون‌ها می‌توانند باعث رقابت یونی با فلزات سنگین جذب‌شده بر سطح ذرات خاک یا رس شوند. در نتیجه، پیوند بین فلزات سنگین (مثل Pb، Cd، Zn و Cu) و ذرات خاک تضعیف شده و فلزات از فاز جامد به فاز محلول (آب) منتقل می‌شوند (Acosta *et al.*, 2011). عمق برداشت آب و ویژگی‌های خاک بستر نیز قادرند بر غلظت فلزات سنگین مؤثر باشند. به‌طوری‌که، بررسی عمق خاک و برداشت آب نشان داده است که، غلظت فلزات سنگین در اعماق مختلف خاک متفاوت بوده و بسته به نوع خاک و فرآیندهای شیمیایی رخ داده، میزان جذب و نگهداری فلزات نیز تغییر می‌کند (Smedley and Kinniburgh, 2002; Zhu).

¹⁵Dissolved Organic Matter

¹⁶Dissolved Organic Carbon

(and Li, 2024). مطالعه Danboos و همکاران (۲۰۲۳) نشان داد که در برداشت آب‌های زیرسطحی، مدیریت آبیاری و زهکشی می‌تواند به کنترل شوری خاک کمک کرده و از تجمع فلزات سنگین جلوگیری کند.

مقایسه فاکتورهای مورد بررسی در نمونه‌های آب با استانداردهای FAO (جدول ۳) امکان ارزیابی میزان انطباق کیفیت آب با الزامات کشاورزی و شناسایی پارامترهایی را که ممکن است محدودیت ایجاد کنند، را فراهم ساخت. علی‌رغم متفاوت بودن غلظت فلزات در بین ایستگاه‌های مختلف، نتیجه حاصل از این مقایسه نشان داد که استفاده از این منابع آبی، نمی‌تواند برای کشاورزی و درخت‌کاری خطرناک باشد. بنابراین در شرایط خشکسالی و کمبود منابع آب، می‌توان از منابع مذکور جهت آبیاری استفاده کرد. در مطالعه‌ای (Oliaei and Barikloo, 2018) که غلظت فلزات سنگین سرب، آرسنیک، کادمیم و کروم در منابع آب زیرزمینی (۶ حلقه چاه) استان زنجان اندازه‌گیری شد، میانگین غلظت فلزات سنگین در فصل بهار برای سرب، آرسنیک، کروم و کادمیم به ترتیب، ۰/۰۰۰۸۳، ۰/۰۰۰۸۷، ۰/۰۰۰۲۴ و ۰/۰۰۰۷۹ و در فصل تابستان ۰/۰۰۰۹۰، ۰/۰۰۰۸۴، ۰/۰۰۰۲۹ و ۰/۰۰۰۸۰ میلی‌گرم بر لیتر به دست آمد. در این بررسی، مقایسه غلظت فلزات در منابع آبی که به‌ویژه برای کشاورزی استفاده می‌شود، با استاندارد ملی ایران، ۱۹۹۷؛ استاندارد سازمان جهانی بهداشت، ۲۰۰۳؛ استاندارد آژانس حفاظت محیط‌زیست آمریکا نشان داد که خطری از لحاظ بهداشتی منطقه مورد مطالعه را تهدید نمی‌کند.

در برخی ایستگاه‌های مورد بررسی، به‌ویژه در فصل زمستان، میزان شوری و TDS از حد مجاز برای استفاده کشاورزی فراتر رفته است. این افزایش شوری عمدتاً ناشی از عدم برداشت آب و محدودیت در لایروبی منابع، به‌ویژه در مناطقی مانند چاله برق، فلفلی، آل گرگ و جی سرخ بوده است. تجمع نمک در این ایستگاه‌ها نه تنها کیفیت آب را کاهش داده، بلکه قابلیت استفاده آن برای آبیاری را محدود کرده است. این شرایط نشان‌دهنده اهمیت مدیریت صحیح منابع آب و رفع محدودیت‌های تجهیزات برای جلوگیری از افزایش شوری و حفظ کاربری کشاورزی در منطقه است. این پدیده، مشابه گزارش‌هایی است که در مطالعات سایر مناطق خشک و نیمه‌خشک مشاهده شده است، در مناطقی که کاهش جریان آب و تجمع نمک‌ها در بخش‌های کم‌عمق منابع آبی، منجر به افزایش شوری می‌شود (Qadir et al., 2014). شوری آب یکی از مهم‌ترین عوامل محدودکننده در کشاورزی به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک محسوب می‌شود. به‌عنوان نمونه، پژوهش انجام‌شده توسط Rengasamy (۲۰۱۰) تأکید دارد که افزایش شوری موجب کاهش توان جذب آب توسط ریشه گیاهان، برهم‌زدن تعادل یونی و کاهش رشد محصول می‌گردد. همچنین، Ayers و Westcot (۱۹۹۴) در راهنمای کیفی آب برای کشاورزی، بیان کرده‌اند که آب با شوری بیش از ۰/۷ گرم در لیتر برای اغلب گیاهان حساس نامناسب است و باعث کاهش عملکرد می‌شود. یک آزمایش میدانی دو ساله در مورد آبیاری قطره‌ای روی ذرت در منطقه آبیاری هتائو با پنج سطح شوری آب آبیاری (کل جامدات محلول؛ ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵ گرم در لیتر) توسط Li و همکاران (۲۰۱۹) انجام شد. در این پژوهش اثرات شوری آب بر سبز شدن، رشد، عملکرد، کیفیت دانه ذرت و نمک خاک تعیین شد. نتایج نشان داد که، در شوری بالاتر از ۳ گرم در لیتر، آب تأثیر منفی بر رشد ذرت و ویژگی‌های مورفولوژیکی آن (ارتفاع گیاه، شاخص سطح برگ، قطر ساقه و ماده خشک) دارد.

لازم به ذکر است، از آنجا که در اراضی پژوهشگاه زابل، این منابع آبی تنها جهت آبیاری درختان و فضای سبز مورد استفاده قرار می‌گیرد، نمی‌تواند برای انسان و گیاهان خطرناک باشد. چراکه مطالعه Munns و Tester (۲۰۰۸) نشان داد که درختان و گیاهان فضای سبز نسبت به برخی محصولات زراعی حساسیت کمتری به شوری دارند و می‌توانند در محدوده شوری بالاتر نیز رشد کنند. این تفاوت حساسیت عمدتاً به علت ساختار فیزیولوژیکی و مورفولوژیکی این گیاهان است که به آنها امکان تحمل بهتر تنش‌های اسمزی و یونی ناشی از شوری را می‌دهد. درختان به‌طور معمول دارای ریشه‌های عمیق‌تر هستند که قادرند از لایه‌های پایین‌تر خاک که شوری کمتری دارند، آب جذب کنند. Ayers و Westcot (۱۹۹۴) اظهار داشتند که برخی گونه‌های درختی و گیاهان زینتی مکانیزم‌های سازگاری متعددی مانند تنظیم تعادل یونی، تولید آنتی‌اکسیدان‌ها و سازگاری در سیتوپلاسم خود دارند که از آسیب‌های ناشی از یون‌های سدیم و کلرید جلوگیری می‌کند. از سوی دیگر، محصولات زراعی که بیشتر در طبقات سطحی خاک رشد می‌کنند و دوره رشد کوتاه‌تری دارند، به تجمع نمک در منطقه ریشه حساس‌تر بوده و تنش شوری می‌تواند به سرعت باعث کاهش جذب آب، اختلال در متابولیسم، کاهش رشد و عملکرد آنها شود. بنابراین، می‌توان عنوان کرد

به‌طور محتمل در مناطق با منابع آبی شور یا نیمه‌شور، با کشت درختان مقاوم‌تر به شوری یا استفاده از گیاهان به‌عنوان فضای سبز می‌تواند راهکاری پایدارتر و اقتصادی‌تر باشد. در عین حال، پایش منظم شوری آب و استفاده از گیاهان مقاوم به شوری در مناطق با منابع آب شور می‌تواند از راهکارهای پیشنهادی برای مدیریت کشاورزی پایدار است. در شرایط خشکسالی یا مناطقی با منابع محدود آب، استفاده از آب‌های دارای غلظت کنترل‌شده فاکتورهای کیفی برای آبیاری درختان و گیاهان غیرخوراکی، علف‌های علوفه‌ای، محصولات زراعی مرسوم و غیرمتمعارف، محصولات روغنی، گیاهان معطر و دارویی با ارزش اقتصادی بالا و حتی برخی گیاهان گلدار نه‌تنها بی‌خطر بوده، بلکه از اتلاف منابع محدود آب جلوگیری می‌کند (Yadav and Dagar, 2016). بنابراین، استفاده هوشمندانه و محدود از این منابع آبی در کشاورزی، به‌ویژه برای آبیاری گیاهان دائمی یا غیرخوراکی، می‌تواند به‌عنوان راهکاری پایدار در مدیریت بحران کم‌آبی عمل کند، مشروط بر آنکه پایش مستمر انجام شود و ملاحظات محیط‌زیستی رعایت گردد.

بررسی تغییرات فصلی غلظت فلزات سنگین، کاهش معنی‌داری را از فصل زمستان به تابستان نشان داد (شکل ۴). این الگوی فصلی احتمالاً به‌دلیل آبیاری مجدد چاه‌نیمه‌ها و منابع آبی اطراف و احیای آن‌ها توسط ورودی آب جدید است. چراکه این کاهش، نشان‌دهنده اثر رقیق شدن و جایگزینی آب‌های شور با آب تازه است. در پایان زمستان و ابتدای بهار، آب در رودخانه هیرمند جاری شده و وارد خاک ایران می‌شود که موجب افزایش سطح منابع آبی در منطقه می‌گردد. بنابراین کاهش غلظت عناصر، می‌تواند ناشی از ورود مجدد آب و رقیق‌سازی فاکتورهای آب باشد (Bubphamala et al., 2010). مطالعات متعددی تغییرات فصلی غلظت فلزات سنگین در منابع آب را بررسی کرده‌اند و نتایج مشابهی را گزارش داده‌اند. به‌عنوان نمونه، پژوهش Bubphamala و همکاران (۲۰۱۰) در رودخانه باگ‌پاکونگ و کانال‌های آبیاری اطراف آن در تایلند نشان داد که غلظت فلزاتی مانند سرب و کادمیم در فصل خشک (زمستان) بالاتر از فصل بارندگی (تابستان) است که علت آن را کاهش دبی جریان و افزایش تمرکز آلاینده‌ها عنوان کردند. فرآیندهای ژئوشیمیایی نظیر رسوب‌گذاری، جذب سطحی توسط ذرات رس و کاهش تحرک فلزات در اثر افزایش دما و تغییرات pH نیز بر کاهش غلظت فلزات سنگین موثرند (Hussain et al., 2020; Jiang et al., 2020). در عین حال، بررسی ایزوتوپی و همچنین تحلیل‌های آماری و مدل‌سازی هیدروشیمیایی آب نیز می‌تواند منشأ آب‌های زیرزمینی و سطحی و نحوه اختلاط آنها و در نتیجه تغییر غلظت ترکیبات مختلف را مشخص کند (Hao et al., 2019). بنابراین، برای درک جامع‌تر از دینامیک فصلی غلظت فلزات سنگین، لازم است مجموعه‌ای از داده‌های زمانی-مکانی همراه با پایش کیفی و کمی منابع آب و خاک در طول سال گردآوری و تحلیل شود. Hao و همکاران (۲۰۱۹) با تحلیل ایزوتوپی نشان دادند که بین آب رودخانه و آب‌های زیرسطحی در زمان‌های مختلف اختلاط صورت گرفته که موجب تغییر در کیفیت آب‌های زیرسطحی می‌گردد که این اختلاط در نقاط مختلف و عمق خاک متفاوت بوده است. در این مطالعه تغییرات فصلی قابل توجه بود. به‌طوری‌که حداقل مقادیر در زمستان، مقادیر متوسط در بهار و پاییز و حداکثر مقادیر در تابستان به‌دست آمد. به‌طور کلی نتایج این پژوهش تأیید می‌کند که نوسانات فصلی، بارش، آبیاری منابع و تغییرات هیدرولوژیکی، نقش مهمی در غلظت فلزات سنگین دارند.

نتایج پهنه‌بندی فاکتورهای کیفی آب نشان داد که پراکنش فلزات سنگین، شوری و pH در منطقه مورد مطالعه با تغییرات فصلی همراه است. این یافته‌ها نشان می‌دهند که تغییرات فصلی سطح آب، نقش مهمی در کیفیت منابع آبی و پراکنش عناصر دارد. پراکنش ناهمگون فاکتورها در منطقه نیز از سایر نتایج حاصل بود. برخی ایستگاه‌ها به‌ویژه در نزدیکی منابع ورودی آب نیز تغییرات فصلی بالاتری داشتند. در حالی‌که ایستگاه‌های دورتر از منابع تغذیه، نسبت به فصل‌ها تغییرات کمتری نشان دادند. این نتیجه تأکید می‌کند که مدیریت منابع آب باید مبتنی بر شناخت دقیق پراکنش فضایی و فصلی فاکتورهای کیفی باشد تا نقاط حساس شناسایی و اقدامات کنترلی مناسب اعمال شود. Vali-Nejhad و همکاران (۲۰۱۶) با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS وضعیت پراکنش فلزات در منطقه مورد مطالعه خود را به‌خوبی نشان دادند و نشان دادند که روش‌های پهنه‌بندی می‌توانند ابزار مناسبی برای شناسایی مناطق با ریسک بالا باشند. در مطالعه‌ای (Dochashmeh-Gorgij and Asghari-Moghadam, 2019) نیز با استفاده از کریجینگ، آب‌های زیرسطحی دشت آذرشهر را به نواحی مطلوب، قابل قبول، متوسط و غیرقابل قبول دسته‌بندی کردند و تأکید کردند که تحلیل فضایی پراکنش فلزات و ترکیبات نیترات می‌تواند در برنامه‌ریزی منابع آب نقش

مهمی ایفا کند. همچنین پژوهش Khazaz و همکاران (۲۰۱۵) با استفاده از روش‌های درون‌یابی وزنی و کریجینگ توانست مقادیر گمشده در ایستگاه‌ها را شناسایی و دقت پیش‌بینی وضعیت آبی را افزایش دهد، به‌طوری که شاخص‌های اعتبارسنجی نشان‌دهنده تطابق کامل مقادیر نمونه‌برداری شده با مقادیر تخمینی بود. این یافته‌ها نشان می‌دهند که تکنیک‌های درون‌یابی، به‌ویژه IDW و کریجینگ، ابزارهای مؤثری برای تحلیل پراکنش فاکتورهای کیفی آب و کاهش اثر داده‌های ناقص هستند. استفاده از این روش‌ها علاوه بر افزایش دقت پیش‌بینی، امکان شناسایی نقاط حساس و تصمیم‌گیری بهتر برای مدیریت منابع آب را فراهم می‌کند (Chen et al., 2024). بنابراین، ترکیب داده‌های میدانی و پهنه‌بندی فضایی می‌تواند به توسعه استراتژی‌های مؤثر برای بهبود کیفیت منابع آب و کاهش ریسک‌های مرتبط با شوری و فلزات سنگین کمک کند.

تحلیل شاخص‌های MI و PoS نشان داد که پراکنش و شدت تأثیرگذاری فلزات سنگین و فاکتورهای شیمیایی در منابع آب زیرسطحی پژوهشگاه زابل تحت تأثیر تغییرات فصلی و مدیریت منابع آب قرار دارد. بیشترین مقادیر شاخص‌ها در زمستان ثبت شد، در حالی که کاهش آنها در تابستان با ورود آب تازه از رودخانه هیرمند و افزایش سطح آب منابع سطحی و زیرسطحی مرتبط بود. این الگوی فصلی بیانگر رقیق‌شدن آب و کاهش غلظت عناصر در فصل تابستان است و نشان می‌دهد که پایش دوره‌ای شاخص‌های MI و PoS برای اطمینان از سلامت منابع آب ضروری است. دامنه مقدار تجمیعی MI عناصر جهت کاربری کشاورزی در فصل زمستان ۱/۸۹۶-۳/۰۳۹ به‌دست آمد. بنابراین ایستگاه‌ها در وضعیت تحت تأثیر متوسط تا تحت تأثیر زیاد قرار دارند. با توجه به اینکه این منابع به‌صورت موقت و تنها جهت آبیاری درختان مورد استفاده قرار گرفته و در برخی از ایستگاه‌ها به‌دلیل شوری بالا، با آب شرب مخلوط می‌شوند، بنابراین برای کشاورزی خطرناک نیستند. در عین حال، بررسی دوره‌ای این منابع می‌تواند به‌حصول اطمینان از سلامت آب کمک کند. چراکه، Mohan و همکاران (۱۹۹۶) اظهار داشتند که کنترل منظم شاخص MI در منابع آبی مناطق کشاورزی و پرورش آبزیان، نه تنها در حفظ سلامت محیط‌زیستی بلکه در ایمنی غذایی نیز اهمیت حیاتی دارد. در عین حال، با توجه به ورود آب توسط رودخانه هیرمند و افزایش سطح آب و کاهش غلظت عناصر در فصل تابستان، این منابع در فصل تابستان با دامنه ۱/۵۰۳-۰/۷۸۱ در وضعیت با تأثیرگذاری کم قرار می‌گیرند. برخی از ایستگاه‌ها نیز دارای MI کلی زیر ۱ هستند که نشان‌دهنده مناسب بودن آب برای کشاورزی از نظر تجمیعی فلزات است. Chaturvedi و همکاران (۲۰۱۹) نیز با مطالعه در شمال غربی هیمالیا از شاخص HI برای تجزیه و تحلیل وجود آلودگی فلزات سنگین در آب‌های زیرزمینی استفاده کردند. در این مطالعه، شاخص خطر HI برای ۳۰۵ نمونه آب زیرزمینی از هفت منطقه مختلف هند شامل حوضه رودخانه Subarnarekha، مناطق North Karanpura، East Bokaro، Daltonganj، Gorakhpur، Baghpat و محاسبه شد. مقادیر HI در این مناطق دامنه‌ای تقریباً بین ۰/۲ تا بیش از ۱۵ قرار داشتند و بیشترین مقدار مربوط به مناطق صنعتی و معدنی آلوده مانند Kalamati در حوضه Subarnarekha بود. در اغلب نقاط، مقدار HI کمتر از ۱ گزارش شد که نشان‌دهنده ریسک کم برای سلامت انسان است، اما در برخی مناطق خاص مقدار HI بالاتر از ۱ مشاهده گردید که بیانگر احتمال اثرات زیان‌آور ناشی از فلزات سنگین نظیر آرسنیک، سرب، نیکل و کروم است. نتایج این مطالعه نشان داد که مقدار HI در اکثر نمونه‌ها در محدوده ایمن قرار دارد، اما برخی مناطق با HI بالاتر از ۱ نیازمند پایش و اقدامات اصلاحی برای کاهش آلودگی فلزات سنگین هستند.

شاخص PoS نیز نتایج مشابهی ارائه داد. مقادیر آن بین ۱/۰۱۱ تا ۸/۴۰۷ متغیر بود و برخی ایستگاه‌ها مانند ایستگاه شماره ۳، مقادیر بالاتری داشتند که عمدتاً ناشی از شوری بود که بر طبق دسته‌بندی کیفیت آب براساس شاخص PoS نیاز به توجه و بازبینی در مصرف دارد. اما از آنجا که این آب جهت آبیاری درختان مورد استفاده قرار گرفته و برای کشت محصولات زراعی به کار نمی‌رود، بنابراین نمی‌تواند نگران‌کننده باشد. در ارتباط با پژوهش‌های انجام شده که به ارزیابی کیفیت منابع به کمک شاخص‌های کیفی آب انجام شده است، می‌توان به مطالعه Shafavi و Ardakani (۲۰۲۰) اشاره کرد. این محققین، با هدف ارزیابی کیفی منابع آب زیرزمینی حوزه آبخیز رزن همدان با استفاده از شاخص‌های MI و PoS براساس غلظت عناصر روی، سرب، کادمیم و مس طی فصول بهار و تابستان، ۱۲۰ نمونه آب زیرزمینی از ۲۰ ایستگاه را برداشت کردند. در این مطالعه میانگین مقادیر شاخص‌های MI و PoS در فصل بهار با ۰/۹۲۰ و ۰/۳۶۰ به‌ترتیب بیانگر سطح کیفی "پاک و آلودگی حداقل" و

در فصل تابستان نیز با ۱/۰۵ و ۰/۴۱۰ به ترتیب بیانگر سطح کیفی "تحت تأثیر اندک" و "آلودگی حداقل" بود. آنها عنوان کردند اگرچه در زمان انجام مطالعه، منابع آب زیرزمینی حوزه آبخیز رزن در معرض آلودگی بیش‌تر از حد مجاز به فلزات سنگین نبود، ولی به دلیل استفاده بی‌رویه از نهاده‌های کشاورزی و به‌ویژه کودهای شیمیایی سولفات پتاسیم، سوپر فسفات تریپل و سموم شیمیایی محتوی فلزات سنگین به‌وسیله کشاورزان، امکان افزایش غلظت انواع فلزات سنگین در خاک و نفوذ آنها به سفره‌های آب زیرزمینی در میان مدت دور از انتظار نیست.

مقایسه با مطالعات پیشین نشان می‌دهد که شاخص‌های MI و PoS ابزارهای مناسبی برای ارزیابی کیفیت منابع آب زیرزمینی هستند. Ardakani و Shafavi (۲۰۲۰) در بررسی ۱۲۰ نمونه از حوزه آبخیز رزن همدان نشان دادند که میانگین شاخص‌های MI و PoS در بهار و تابستان، وضعیت کیفی منابع را از «پاک و آلودگی حداقل» تا «تحت تأثیر اندک» نشان داد. در پژوهشی مشابه نیز در دشت اسدآباد (Ghobadi et al., 2021) و در شهر سنقر (Amjadian and Ardakani, 2022)، وضعیت کیفیت آب را براساس شاخص‌های MI و PoS از «پاک» تا «تحت تأثیر اندک» گزارش کردند. در Siwa Oasis مصر، میانگین MI در تمام نمونه‌ها در محدوده تحت تأثیر شدید قرار داشت (Eid et al., 2024). این یافته‌ها نشان می‌دهد که شاخص‌های MI و PoS نه تنها شاخص‌های ساده و کم‌هزینه هستند، بلکه ابزارهای عملی برای شناسایی الگوهای فضایی و فصلی آلودگی در منابع آب مورد استفاده در کشاورزی و پرورش آبزیان به‌شمار می‌روند. مطابق با این یافته‌ها، شاخص‌های MI و PoS نه تنها ابزارهای ساده و کم‌هزینه برای ارزیابی کیفی منابع آب هستند، بلکه قابلیت شناسایی الگوهای فضایی و فصلی آلودگی را فراهم می‌کنند. استفاده مشارکتی از MI و PoS می‌تواند سیاست‌گذاران و پژوهشگران را در طراحی سامانه‌های پایش و کنترل مؤثر یاری دهد و امکان شناسایی مناطق حساس و اقدامات پیشگیرانه برای کاهش اثرات فلزات سنگین را فراهم کند. در نهایت، با توجه به کاربرد منابع زیرسطحی پژوهشگاه زابل در آبیاری درختان و فضای سبز، مقادیر شاخص‌ها نگران‌کننده نیستند، اما پایش مستمر آنها برای اطمینان از سلامت منابع آب و مدیریت پایدار کشاورزی توصیه می‌شود.

محدودیت‌ها و منابع عدم قطعیت

با وجود نتایج حاصل از تحقیق حاضر، برخی محدودیت‌ها و منابع عدم قطعیت بایستی مد نظر قرار گیرد. تغییرات زمانی و مکانی در کیفیت آب زیرسطحی، محدودیت در تعداد و توزیع نقاط نمونه‌برداری از جمله عواملی هستند که می‌توانند بر دقت نتایج اثرگذار باشند. علاوه بر این، انتخاب روش‌های درون‌یابی و فرضیه‌های نهفته در مدل‌های زمین‌آمار می‌تواند باعث تفاوت در الگوهای مکانی آلودگی شود. این عوامل لزوماً از اعتبار کلی یافته‌ها نمی‌کاهند، اما نشان‌دهنده ضرورت تفسیر محتاطانه نتایج هستند. بر همین اساس، پیشنهاد می‌شود مطالعات آتی با افزایش تعداد نقاط نمونه‌برداری (در صورت امکان) و تعداد نمونه‌ها، انجام پایش‌های چندفصلی یا فواصل زمانی کوتاه‌تر (ماه‌بانه) و بهره‌گیری از روش‌های پیشرفته‌تر مدل‌سازی و یادگیری ماشین انجام شود تا عدم قطعیت کاهش یافته و دقت نقشه‌های پهنه‌بندی بهبود یابد.

در تحقیق حاضر فلزات جیوه و سرب با خطر ریسک سلامت بالا در منابع آبی زیر سطحی پژوهشگاه زابل مشاهده نگردید. غلظت فلزات سنگین نیکل، کروم، آرسنیک، کادمیم، آهن و مس در بین ایستگاه‌های مختلف و فصول مورد بررسی متفاوت بود. پهنه‌بندی فلزات سنگین و فاکتورهای کیفی آب نیز، تغییرات پراکنش فاکتورها در طی فصول تابستان و زمستان و تأثیرگذاری تغییرات سطح آب، بر تغییرات غلظت فاکتورهای بررسی را نشان داد. به گونه‌ای که با افزایش میزان آب ورودی به منطقه در اثر آب آورد رودخانه هیرمند، منابع سطحی و زیرسطحی اراضی پژوهشگاه نیز تحت تأثیر قرار گرفته و موجب کاهش غلظت فاکتورهای مورد بررسی در فصل تابستان شده است. تأثیرپذیری منابع از سطح آب، عمق برداشت، جنس بستر و همچنین خصوصیات خاک، تجهیزات برداشت آب، لایروبی برخی ایستگاه‌ها و تغییرات سطح آب به‌واسطه ورود سالیانه آب توسط رودخانه هیرمند می‌تواند از مهم‌ترین فاکتورهای احتمالی مؤثر بر ایجاد تفاوت معنی‌دار در بین غلظت فاکتورهای مورد بررسی در ایستگاه‌ها و فصول تابستان و زمستان باشد. مقایسه غلظت فلزات سنگین با استاندارد FAO جهت آبیاری نیز نشان داد که استفاده از این منابع آبی، نمی‌تواند برای کشاورزی و درخت‌کاری خطرناک باشد. بنابراین مصرف آب جهت آبیاری درختان، نه تنها خطراتی را به‌همراه ندارد، بلکه می‌تواند نقش مؤثری در مدیریت منابع آب و فضای سبز پایدار در شرایط خشکسالی باشد. محدود بودن تعداد نمونه‌ها و تمرکز مطالعه بر یک منطقه محدود و بازه زمانی خاص و لزوم تکرار در سال‌های متمادی می‌تواند تعمیم

نتایج را به سایر شرایط مکانی و زمانی با محدودیت مواجه سازد. در عین حال نتایج تحقیق حاضر، جهت شناسایی مناطق از نظر تغییرات غلظت فلزات سنگین و برنامه‌ریزی برای پایش‌های آینده در مناطق مشابه به کار گرفته شود.

سپاسگزاری

با تشکر از معاونت پژوهش و فناوری پژوهشگاه زابل، مقاله حاضر، حاصل نتایج طرح پژوهشی داخلی با شماره PR-RIOZ-1402-0621-2 است.

References

- Acosta, J.A., Jansen, B., Kalbitz, K., Faz, A., Martínez-Martínez, S., 2011. Salinity increases mobility of heavy metals in soils. *Chemosphere* 85(8), 1318-1324.
- Amin, S., Farajoud, M.R., Shabani, A., 2011. Groundwater contamination by heavy metals in water resources of Shiraz. *Iranian Agricultural Research* 30(1-2), 21-32. (In Persian)
- A'mi-Zadegan, A., Asrari, A., 2018. Investigation of heavy metal concentrations in drinking water wells of Jahrom County. *Proceedings of the 1st National Conference on Safety, Health and Environment, Islamic Azad University, Meybod Branch*. (In Persian)
- Amjadian, H., Ardakani, S., 2022. Assessment of groundwater contamination with potentially toxic elements using MI and PoS indices (Case study: Sonqor). *Journal of Environmental Health Engineering* 10(2), 146-162. (In Persian)
- An, J., Zha, X., Wang, H., Deng, L., Yang, Y., Wang, Y., Zhao, W., 2024. Analysis of influencing factors of heavy metals and non-point source pollution in typical areas of Tethys Himalayan tectonic domain. *Water* 16(2), 291.
- APHA, American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation. 2023. *Standard methods for the examination of water and wastewater* (24th ed.). APHA Press.
- Ayers, R.S., Westcot, D.W. 1994. *Water quality for agriculture* (FAO Irrigation and Drainage Paper 29, Rev. 1). Rome, Italy: Food and Agriculture Organization 1, 74.
- Belkhiri, A., Tiri, A., Mouni, L. 2020. Spatial distribution of groundwater quality using kriging and co-kriging interpolations. *Groundwater for Sustainable Development* 11, 100473.
- Bhutiani, R., Kulkarni, D.B., Khanna, D.R., Gautam, A., 2016. Water quality, pollution source apportionment and health risk assessment of heavy metals in groundwater of an industrial area in North India. *Exposure and Health* 8(1), 3-18.
- Bubphamala, T., Benjawan, L., Liamlaem, W., 2010. Seasonal variations of water quality in Bangpakong river and nearby canals at Banpho District. *Agriculture and Natural Resources* 44(4), 732-743.
- Chaturvedi, A., Bhattacharjee, S., Mondal, G.C., Kumar, V., Singh, P.K., Singh, A.K., 2019. Exploring new correlation between hazard index and heavy metal pollution index in groundwater. *Ecological Indicators* 97, 239-246.
- Chen, Y., Hu, R., Li, Z., Yang, C., Wang, X., Long, G., Xu, G. 2024. Exploring explicit and implicit graph learning for multivariate time series imputation. *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 127, 107217.
- Danboos, A., Sharil, S., Hamzah, F. M., Yafouz, A., Huang, Y. F., Ahmed, A.N., El-Shafie, A., 2023. Water budget-salt balance model for calculating net water saving considering different non-conventional water resources in agricultural process. *Heliyon* 9(4), 14770.
- Dochashmeh-Gorgij, A., Asghari-Moghadam, E., 2019. Distribution analysis of heavy metals and nitrate in groundwater using Moran's Index and Bayesian Kriging (Case study: Azarshahr Plain). *Iranian Water Research Journal* 13(2), 21-31. (In Persian)
- Eid, M.H., Eissa, M., Mohamed, E.A., Ramadan, H.S., Tamás, M., Kovács, A., Szűcs, P., 2024. New approach into human health risk assessment associated with heavy metals in surface water and groundwater using Monte Carlo Method. *Scientific Reports* 14(1), 1008.

- Enayat, A., Einollahi Peer, F., Pakzad-Toochaei, S., Erfani, M., 2022. Measurement and zoning of heavy metals in groundwater wells along the Sistan River from the border to Hamoun International Wetland. *Water and Soil Management and Modeling* 4(1), 52-69. (In Persian)
- Esfandyari, F., Mostafazadeh, R., Ebadi, E., Saadati, R., 2020. Modelling the spatial distribution and depletion of groundwater level in Tabriz plain. *Geographical Engineering of Territory* 3(6), 1-16.
- FAO, Food and Agriculture Organization of the United Nations. 2017. Water quality for agriculture: Irrigation and drainage paper 29 rev.1 (3rd ed.). FAO.
- Ghobadi, A., Cheraghi, M., Ardakani, S., Lorestani, B. 2021. Groundwater quality assessment in Asadabad Plain using WQI, Cd, HPI, HEI, PoS, and MI indices in 2018. *Journal of Environmental Health Engineering* 9(1), 1–21. (In Persian)
- Hao, S., Li, F., Li, Y., Gu, C., Zhang, Q., Qiao, Y., Zhu, N., 2019. Stable isotope evidence for identifying the recharge mechanisms of precipitation, surface water, and groundwater in the Ebinur Lake basin. *Science of the Total Environment* 657, 1041-1050.
- Hassan, H.M., Ismaeel, A.J., Ethaib, S., Al-Zaidi, B.M. 2023. Developing Spatial Models of Groundwater Quality in the Southwestern Desert of Iraq Using GIS, Inverse Distance Weighting, and Kriging Interpolation Techniques. *Mathematical Modelling of Engineering Problems* 10(4), 1169.
- Hassanzadeh, R., Abbasnejad, A., Hamzeh, M.A., 2010. Groundwater pollution assessment in the urban area of Kerman. *Journal of Environmental Studies* 36(56), 101-110. (In Persian)
- Hussain, S., Sultana, T., Sultana, S., Hussain, B., Mahboob, S., Al-Ghanim, K.A., Riaz, M.N., 2021. Seasonal monitoring of River through heavy metal bioaccumulation and histopathological alterations in selected fish organs. *Journal of King Saud University-Science* 33(8), 101626.
- Jiang, Z., Mallants, D., Xu, T., Zhang, S., 2020. Numerical simulation of stable isotope fractionation with density changes in regional-scale confined geothermal aquifers. *Applied Geochemistry* 122, 104742.
- Kashtabeh, R., Akbari, M., Heidari, A., Najafpour, A., 2023. Impact of Iron Ore Mining on the Concentration of some Heavy Metals and Soil Pollution Zoning (Case Study: Sangan Iron Ore Mine, Khaf-Iran). *Water and Soil* 37(1), 77-94.
- Khazaz, L., Oulidi, H.J., El Moutaki, S., Ghafiri, A., 2015. Comparing and evaluating probabilistic and deterministic spatial interpolation methods for groundwater level of Haouz in Morocco. *Journal of Geographic Information System* 7(06), 76051.
- Khouni, I., Louhichi, G., Ghrabi, A., 2021. Use of GIS based Inverse Distance Weighted interpolation to assess surface water quality: Case of Wadi El Bey, Tunisia. *Environmental Technology and Innovation* 24, 101892.
- Li, J., Chen, J., Jin, J., Wang, S., Du, B., 2019. Effects of irrigation water salinity on maize (*Zea may* L.) emergence, growth, yield, quality, and soil salt. *Water* 11(10), 2095.
- Li, Z., Xiao, K., Li, Y., Pan, F., Li, H., Zheng, Y., Liu, Y., 2024. Surface water-groundwater interactions drive the spatial variability of dissolved heavy metals and interfacial fluxes in mangrove intertidal zones. *Journal of Hydrology* 632, 130884.
- Mahmoudabadi, E., Akbari, M., Sarmdian, F., 2025. Impact of Land Use Types on Bioavailable form of Heavy Metals and Soil Environmental Pollution. *Journal of Geography and Environmental Hazards* 14(1), 61-78.
- Malakoutian, M., Khashi, Z., 2014. Measurement of heavy metals (arsenic, cadmium, lead, copper) in drinking water sources in southeastern Rafsanjan Plain. *Journal of Behdasht dar Arseh (Health in the Field)* 2(1), 1–9. (In Persian)
- Mohan, S.V., Nithila, P., Reddy, S.J., 1996. Estimation of heavy metals in drinking water and development of heavy metal pollution index. *Journal of Environmental Science and Health, Part A* 31(2), 283–289.
- Munns, R., Tester, M., 2008. Mechanisms of salinity tolerance. *Annual Review of Plant Biology* 59, 651–681.
- Nawaz, R., Nasim, I., Irfan, A., Islam, A., Naeem, A., Ghani, N., Ullah, R., 2023. Water Quality Index and Human Health Risk Assessment of Drinking Water in Selected Urban Areas of a Mega City. *Toxics* 11(7), 577.

- Nouri, M., Montazer Faraj, A., 2022. Monitoring and assessment of water quality in Tehran city using physicochemical and microbial indexes. *Journal of Applied Research in Water and Wastewater* 9(2), 121-124.
- Oliaei, M.S., Barikloo, A., 2018. Assessment of Heavy metal's health risk in underground water resources (case study some parts of northeastern villages of Mahneshan city, Dandi region, Zanjan provience). *Geography (Regional Planning)* 8(31), 41-51.
- Qadir, M., Quill rou, E., Nangia, V., Murtaza, G., Singh, M., Thomas, R.J., Noble, A.D., 2014. Economics of salt-induced land degradation and restoration. *Natural Resources Forum* 38(4), 282-295.
- Rashid, A., Ayub, M., Ullah, Z., Ali, A., Khattak, S.A., Ali, L., Kaushik, P., 2022. Geochemical modeling source provenance, public health exposure, and evaluating potentially harmful elements in groundwater: Statistical and human health risk assessment (HHRA). *International Journal of Environmental Research and Public Health* 19(11), 6472.
- Rengasamy, P., 2010. Soil processes affecting crop production in salt-affected soils. *Functional Plant Biology* 37(7), 613-620.
- Scutara u, E.C., Trinca, L.C., 2023. Heavy metals in foods and beverages: Global situation, health risks and reduction methods. *Foods* 12(18), 3340.
- Shafavi, F., Ardakani, S., 2020. Groundwater quality assessment in the Razan watershed, Hamedan, using MI and PoS indices. *Environment and Water Engineering* 6(3), 257-272. (In Persian)
- Shokoohi, A., Bahmani, A., 2021. Comparative evaluation of NSFQI and IRWQISC indices in river water quality assessment. *Water and Soil Resource Conservation* 10(3), 97-114. (In Persian)
- Smedley, P.L., Kinniburgh, D.G., 2002. A review of the source, behavior and distribution of arsenic in natural waters. *Applied Geochemistry* 17(5), 517-568.
- Thomas, E.O., 2023. Spatial evaluation of groundwater quality using factor analysis and geostatistical Kriging algorithm: a case study of Ibadan Metropolis, Nigeria. *Water Practice and Technology* 18(3), 592-607.
- Vali-Nejad, F., Hassani, A.H., Sayyadi, M., 2016. Assessment of heavy metals (chromium, nickel, lead, and zinc) in groundwater of Eslamshahr and their spatial distribution cadmium using GIS. *Environmental Science and Technology* 18(2), 187-199. (In Persian)
- Vallejo, B., Ponce, R., Ortega, T., G mez-Parra, A., Forja, J., 2021. Greenhouse gas dynamics in a coastal lagoon during the recovery of the macrophyte meadow (Mar Menor, SE Spain). *Science of The Total Environment*, 779 146314.
- Wang, X., Zou, T., Zhang, W., Fan, Y., Bai, Y., 2025. Vertical Binding Characteristics Between Dissolved Organic Matter and Heavy Metals in the Upper Reaches of the Yangtze River Using EEM-PARAFAC and 2D-FTIR-COS. *Water* 17(9), 1359.
- Wet, R.F., West, A.G., Harris, C., 2020. Seasonal variation in tap water $\delta^2\text{H}$ and $\delta^{18}\text{O}$ isotopes reveals two tap water worlds. *Scientific Reports* 10(1), 13544.
- Yadav, R.K., Dagar, J.C., 2016. Innovations in utilization of poor-quality water for sustainable agricultural production. In *Innovative saline agriculture*. Springer, New Delhi, pp. 219-263.
- Zhu, S., Li, S., Shao, M.A., Qiao, J., Zhu, Y., 2024. Source identification and migration fate of heavy metals of soil-groundwater system in a thousand-year cultivation region. *Environmental Geochemistry and Health* 46(9), 345.