

Spatiotemporal Analysis of Groundwater Quality Changes: A Case Study of the Bahabad Aquifer, Yazd Province, Iran

H. Sarvi Sadrabad¹ - H.R. Moradi^{1*} - S.H.R. Sadeghi¹ - A. Zare Chahouki²

1- Department of Watershed Management, Faculty of Natural Resources, Tarbiat Modares University

(*- Corresponding Author Email: harmoradi@modares.ac.ir)

2- Department of Rangeland and Watershed Management, Faculty of Natural Resources, Yazd University

Received: 02 January 2026	How to cite this article: Sarvi Sadrabad, H., Moradi, H.R., Sadeghi, S.H.R., & Zare Chahouki, A. (2026). Spatiotemporal analysis of groundwater quality changes: A case study of the Bahabad aquifer, Yazd Province, Iran. <i>Journal of Soil and Water</i> , 40(2), 111-126. (In Persian). https://doi.org/10.22067/jsw.2026.97330.1519
Revised: 27 June 2026	
Accepted: 06 August 2026	
Available Online: 06 August 2026	

Introduction

Degradation of water quality has emerged as one of the most critical challenges facing national water resources. Surging water demand has led to the over-exploitation of groundwater and a continuous decline in aquifer levels, subsequently triggering environmental degradation and a deteriorating trend in groundwater quality. Consequently, analyzing temporal trends and spatial variations of groundwater quality is vital for sustainable water resource management. This study aims to investigate the temporal trends of groundwater quality parameters using the Mann-Kendall test and Sen's Slope Estimator, while analyzing spatial variations through the Groundwater Quality Index (GQI) in the Bahabad aquifer.

Materials and Methods

In this study, a total of 16 observation wells were initially considered for groundwater quality assessment. Among them, 9 wells with complete and reliable datasets were selected for detailed analysis. The required hydrochemical data were obtained from the Yazd Regional Water Authority and included major groundwater quality parameters: calcium (Ca^{2+}), magnesium (Mg^{2+}), sodium (Na^+), chloride (Cl^-), sulfate (SO_4^{2-}), and total dissolved solids (TDS). A uniform temporal period from 2002 to 2023 was considered for all selected wells to ensure consistency in trend analysis.

To evaluate temporal variations in groundwater quality, non-parametric statistical methods, including the Mann-Kendall test and Sen's slope estimator, were employed. These methods are widely used in hydrochemical studies due to their robustness against non-normal data distributions and their ability to detect both the direction and magnitude of trends over time.

Spatial variations in groundwater quality parameters were analyzed using a range of interpolation techniques, including both deterministic and geostatistical approaches. The applied methods consisted of Inverse Distance Weighting (IDW), Radial Basis Functions (RBF), Local Polynomial Interpolation (LPI), Global Polynomial Interpolation (GPI), and Kriging. All spatial analyses were performed in a GIS environment. The optimal interpolation method for each parameter was selected based on statistical performance indicators, primarily the lowest Root Mean Square Error (RMSE) and the highest coefficient of determination (R^2).

Prior to spatial modeling, the normality of the dataset was evaluated using the Kolmogorov-Smirnov and Shapiro-Wilk tests, which are commonly applied to assess data distribution characteristics. The results of these tests were used to determine whether data transformation was required before applying interpolation and statistical analyses.

Finally, the Groundwater Quality Index (GQI) was calculated to provide an integrated assessment of



Authors retain the copyright. This is an open access article distributed under [Creative Commons Attribution 4.0 International License \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

<https://doi.org/10.22067/jsw.2026.97330.1519>

groundwater quality conditions. By aggregating multiple hydrochemical parameters into a single index, GQI enables a comprehensive evaluation of groundwater quality and facilitates spatial comparison across the aquifer. This index was used as a key tool for interpreting overall water quality status and supporting groundwater management decisions.

Results and Discussion

The results indicate that while the groundwater quality of the Bahabad aquifer remained within the “Acceptable” category during the study period, a slight but statistically significant downward tendency in quality was observed. Spatial distribution analysis revealed that salinity patterns and ionic concentrations are influenced more by anthropogenic pressures such as over-pumping, water table drawdown, and inter-basin water transfer than by natural geological factors.

Temporal analysis highlighted significant spatial heterogeneity; for instance, Mg^{2+} exhibited a significant increasing trend across all stations (Sen’s slope ranging from 0.05 to 0.23), whereas Na^+ and SO_4^{2-} showed decreasing or insignificant trends in certain wells. TDS displayed variable behavior, showing generally stable or slightly decreasing trends, while a sharp increase was observed at one specific station.

Furthermore, a comparison of interpolation techniques showed that under conditions of limited sampling density and weak spatial correlation, deterministic methods often yielded higher predictive accuracy than geostatistical models.

Conclusion

Despite only minor overall fluctuations in the GQI (ranging approximately between -0.5% and $+0.1\%$), the index maps did not fully capture the intensity of localized quality degradation in critical parameters such as TDS, Na^+ , and SO_4^{2-} . This indicates that composite indices like GQI may partially neutralize opposing trends among individual parameters, thereby providing a more generalized representation of groundwater quality conditions.

Trend analysis of individual parameters revealed considerable spatial heterogeneity across the aquifer. Magnesium and chloride exhibited consistent increasing trends in most monitoring wells, indicating progressive salinization, whereas sodium and sulfate showed mixed or insignificant trends in several locations. Total dissolved solids demonstrated spatially variable behavior, with localized sharp increases despite generally stable or declining trends elsewhere. This variability reflects the complex interaction between local hydrogeological conditions and human-induced pressures and confirms that groundwater quality evolution cannot be adequately described using a single parameter or uniform trend assumption.

The comparison of interpolation techniques further highlighted an important methodological implication: under conditions of limited sampling density and weak spatial autocorrelation, deterministic methods can provide more reliable estimates than geostatistical approaches. This emphasizes the need to adapt modeling strategies to data availability and hydrogeological settings, particularly in arid and semi-arid regions where monitoring networks are often sparse.

Although the Groundwater Quality Index proved effective in providing an overall assessment of groundwater status, it was less sensitive to localized deterioration in key parameters such as TDS, sodium, and sulfate. This confirms that composite indices, while useful for communication and management purposes, may mask emerging local-scale risks if used in isolation. Therefore, they should be applied alongside parameter-specific analyses rather than as standalone decision-making tools.

Overall, the findings highlight the urgent need for improved groundwater management in the Bahabad aquifer. Controlling excessive abstraction, regulating industrial withdrawals, and strengthening long-term monitoring programs are essential to prevent further degradation. Integrating spatial analysis with trend-based assessments can provide a more reliable framework for sustainable groundwater management, particularly in arid regions experiencing increasing water stress.

Keywords: Bahabad, Inter-basin water transfer, Groundwater quality index (GQI), Quality trend, Water table

پایش و تحلیل زمانی- مکانی تغییرات کیفیت منابع آب زیرزمینی (مطالعه موردی آبخوان بهاباد یزد)

حسین سروی صدرآباد^۱ - حمیدرضا مرادی^{۱*} - سید حمیدرضا صادقی^۱ - اصغر زارع چاهوکی^۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۰/۱۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۵/۱۵

چکیده

امروزه یکی از مهم‌ترین مشکلات منابع آبی کشور کاهش کیفی منابع آب است. نیاز روزافزون آب منجر به بهره‌برداری بی‌رویه از آب زیرزمینی و افت مداوم سطح آب در آبخوان‌ها شده است و به تبع آن مشکلات زیست‌محیطی و ازجمله کیفیت آب زیرزمینی نیز در خطر قرار گرفته و روندی رو به نابودی را ایجاد نموده است. ازاین‌رو تحلیل روندهای زمانی و تغییرات مکانی کیفیت آب زیرزمینی نقش بسزایی در مدیریت پایدار منابع آب ایفا می‌کند. هدف پژوهش حاضر بررسی روند زمانی پارامترهای کیفی آب زیرزمینی با بهره‌گیری از آزمون من‌کندال و برآورد شیب سن و همچنین تحلیل تغییرات مکانی کیفیت آب زیرزمینی با استفاده از شاخص کیفیت منابع آب زیرزمینی (GQI) در آبخوان بهاباد می‌باشد. بدین‌منظور از پارامترهای کل جامدات محلول، کلر، سولفات، سدیم، کلسیم و منیزیم مربوط به ۹ چاه در دوره زمانی ۱۴۰۲-۱۳۸۱ جهت بررسی روند زمانی و مکانی استفاده شد. نتایج این مطالعه نشان داد که کیفیت آب زیرزمینی در آبخوان بهاباد طی دوره زمانی ۱۳۸۱ تا ۱۴۰۲ در طبقه قابل قبول قرار دارد، اما روند کاهشی اندک اما معناداری در کیفیت مشاهده شد. بررسی توزیع مکانی پارامترهای کیفی حاکی از آن است که الگوی شوری و غلظت یون‌ها بیش از عوامل زمین‌شناختی طبیعی، تحت تأثیر فشارهای انسانی ازجمله برداشت بی‌رویه، افت سطح ایستابی و انتقال بین‌حوضه‌ای آب قرار دارد. تحلیل روند زمانی با استفاده از آزمون‌های آماری، ناهمگنی مکانی قابل ملاحظه‌ای را آشکار ساخت. پارامتر Mg^{2+} در تمام ایستگاه‌ها روند افزایشی معنادار داشت به‌طوری‌که مقدار شیب سن بین ۰/۰۵ تا ۰/۲۳ متغیر است، درحالی‌که Na و SO_4^{2-} در برخی چاه‌ها روند کاهشی یا بدون روند نشان دادند. TDS نیز عمدتاً روندهای متفاوتی (اغلب کاهشی اما در یک ایستگاه افزایشی شدید) از خود بروز داد. همچنین مقایسه روش‌های درون‌یابی نشان داد که در شرایط نمونه‌برداری محدود و همبستگی مکانی ضعیف، روش‌های قطعی اغلب دقت پیش‌بینی بالاتری نسبت به روش‌های زمین‌آماری (کریجینگ و کریجینگ بیزین تجربی) ارائه کردند. در نهایت، با وجود کاهش اندک شاخص GQI (در بازه‌ای بین ۰/۵- تا ۰/۱+ درصد)، نقشه تغییرات آن نتوانست شدت محلی کاهش کیفیت به‌ویژه در پارامترهای تعیین‌کننده مانند TDS، Na^+ و SO_4^{2-} را به‌طور کامل منعکس کند. این یافته بیانگر آن است که شاخص‌های ترکیبی مانند GQI می‌توانند اثرات متضاد روندهای پارامتری را تا حدی خنثی کرده و تصویری متعادل‌تر و واقع‌بینانه‌تر از وضعیت کلی کیفیت ارائه دهند. در انتها مشخص شد، تغییرپذیری مکانی آلاینده‌های مختلف و طیف گسترده پارامترهای اندازه‌گیری شده و همچنین توصیف کیفیت آب، امری دشوار است؛ بنابراین استفاده از شاخص‌ها می‌توانند شرایط کلی کیفیت آب را به‌طور خلاصه و قابل‌درک ارائه کنند.

واژه‌های کلیدی: انتقال آب، بهاباد، روند کیفیت، سطح ایستابی، شاخص کیفیت آب زیرزمینی

۱- گروه آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

(*)- نویسنده مسئول: Email: hmrmodi@modares.ac.ir

۲- گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و کویرشناسی، دانشگاه یزد، یزد، ایران

مقدمه

آبخوان‌ها به‌عنوان یکی از مهم‌ترین ذخایر راهبردی آب، نقش تعیین‌کننده‌ای در تأمین نیازهای شرب، کشاورزی و صنعتی ایفا می‌کنند. در بسیاری از مناطق کشور، به‌ویژه نواحی خشک و نیمه‌خشک، محدودیت منابع آب سطحی موجب شده است که اتکا به آب‌های زیرزمینی به گزینه‌ای اجتناب‌ناپذیر برای تأمین آب تبدیل شود. با این حال، گسترش آلاینده‌های شیمیایی ناشی از فعالیت‌های شهری و صنعتی، تغییر الگوهای کشاورزی و بهره‌برداری بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی از طریق حفر چاه‌های عمیق و نیمه‌عمیق بدون توجه به توان طبیعی آبخوان‌ها، فشار فزاینده‌ای بر این منابع وارد کرده است.

تداوم این روندها سبب کاهش کیفیت منابع آب زیرزمینی شده و در نتیجه، دسترسی به آب با کیفیت مناسب در مناطق خشک و نیمه‌خشک را به یکی از چالش‌های جدی زیست‌محیطی و مدیریتی تبدیل کرده است. در واکنش به این بحران، انتقال آب بین‌حوضه‌ای به‌عنوان یکی از راهکارهای تأمین آب در مناطق کم‌آب در دستور کار متولیان قرار گرفته است. با این حال، نبود نگاه جامع و یکپارچه در اجرای این طرح‌ها، منجر به بروز تنش‌های اجتماعی، اقتصادی و زیست‌محیطی میان حوضه‌های مبدأ و مقصد شده است. در چنین شرایطی، توجه به پایش و مدیریت کیفیت منابع آب زیرزمینی در مناطق خشک، به‌عنوان راهکاری اساسی برای افزایش خودتکایی آبی و کاهش وابستگی به منابع انتقالی، اهمیت دوچندانی می‌یابد. از سوی دیگر، حرکت به‌سوی توسعه پایدار به‌عنوان یکی از مهم‌ترین چالش‌های پیش‌روی جوامع انسانی در قرن بیست‌ویکم مطرح است؛ به‌گونه‌ای که دسترسی به منابع آب کافی با کیفیت مطلوب، شرطی اساسی برای تحقق توسعه پایدار تلقی می‌شود و کمبود یا افت کیفیت منابع آب، یکی از اصلی‌ترین موانع دستیابی به آن و استقرار پایدار جمعیت به‌شمار می‌رود (Kundzewicz, Alipour et al., 2017; Wang et al., 2013; 1999).

اگرچه مفهوم کیفیت آب زیرزمینی واضح به نظر می‌رسد، اما چگونگی بررسی و ارزیابی آن، نیاز به برخی ترفندها دارد (Babiker et al., 2007; Chenini & Khemiri, 2009). ترکیب شیمیایی آب زیرزمینی بیانگر میزان مناسب بودن آن برای کاربردهای مختلف از جمله مصارف شرب انسان و دام، آبیاری کشاورزی و استفاده‌های صنعتی است. از این‌رو، تمرکز ارزیابی‌های کیفی آب نه بر تعریف مطلق کیفیت، بلکه بر سنجش میزان انطباق ویژگی‌های آب با نوع و هدف مصرف در جامعه قرار دارد (DashtiBarmaki et al., 2014; Elamassi, 2012). بر این اساس استانداردهای مختلفی برای هر متغیر تعریف شده

است که اگر آب از این استاندارد تجاوز کند، قبل از استفاده باید تصفیه شود (Cordoba et al., 2010). سازمان بهداشت جهانی^۱ (WHO)، به‌عنوان یکی از سازمان‌های متولی این امر، استانداردهایی از غلظت یون‌ها در آب آشامیدنی معرفی کرده است. همچنین جهت اعلام و یا مقایسه کیفیت آب در مناطق مختلف، شاخص‌هایی بر اساس میزان پارامترهای کیفیت آب مطرح شده که شاخص کیفیت آب زیرزمینی^۲ (GQI) یکی از این شاخص‌ها است. این شاخص ازجمله شاخص‌هایی است که بر پایه GIS استوار است و برای بررسی تغییرات مکانی کیفیت آب زیرزمینی می‌توان از آن استفاده کرد. این شاخص توسط بابیکر و همکارانش (Babiker et al., 2007) به‌منظور استنباط بهتر از غلظت یون‌های اصلی از کل سطح منطقه ارائه شد.

به‌منظور بررسی کیفیت آب‌های زیرزمینی علاوه بر بررسی مکانی کیفیت آب، بررسی روند زمانی کیفیت جهت آگاهی از شرایط آبخوان‌ها و مدیریت صحیح و با برنامه نیز بسیار حائز اهمیت می‌باشد. آزمون من‌کندال از روش‌های ناپارامتری می‌باشد که ابتدا توسط من (Mann, 1945) ارائه و سپس توسط کندال (Kendall, 1975) توسعه یافت. در روش‌های ناپارامتری اساس کار بر تفاوت داده‌های مشاهداتی است. به گونه‌ای که این روش‌ها مستقل از توزیع آماری سری‌های زمانی بوده و خصوصاً برای سری‌هایی که چولگی و کشیدگی زیاد دارند مناسب‌تر از روش‌های پارامتری می‌باشند. ترکیب نتایج حاصل از بررسی‌های مکانی و زمانی می‌تواند ما را در جهت مدیریت درست و آگاهی از مشکلات و مسائل پیش‌رو یاری دهد و گرایش و مسیر حرکت کیفیت منابع آب در مناطق مختلف را تعیین کند.

طی سال‌های اخیر، مطالعات زیادی (Alipour et al., 2017; DashtiBarmaki et al., 2014; Dustmohammadian et al., 2021; El Baba, 2020; Grzywna & Bronowicka-Mielniczuk, 2020; Ibrahim, 2019; Khosravi et al., 2016; Mann, 1945; Nasser et al., 2021; Nouraki & Hooshmand, 2021; Parsaie et al., 2020; Sarvi Sadrabad & Zare Chahouki, 2022; Sun et al., 2019; Torabipoudeh et al., 2020; WHO, 2004; Zenebe et al., 2025) در خصوص کیفیت منابع آب زیرزمینی و تحلیل و تفسیر آن صورت گرفته است که در ادامه به جدیدترین و مرتبط‌ترین آن‌ها اشاره خواهد شد. سروی صدرآباد و زارع چاهوکی (Sarvi Sadrabad & Zare Chahouki, 2022) به بررسی روند زمانی پارامترهای کیفی آب زیرزمینی با استفاده از آزمون من‌کندال و تخمین گر شیب سن و بررسی تغییر مکانی کیفیت آب زیرزمینی پرداختند. نتایج نشان داد پارامترهای سولفات، سدیم و کل جامدات محلول در بیشتر چاه‌ها روند کاهشی داشته است، اما شاخص‌های کلسیم، منیزیم و کلر دارای روند افزایشی بوده است و همه

1- World Health Organization (WHO)

2- Groundwater Quality Index (GQI)

همراه داشته باشد.

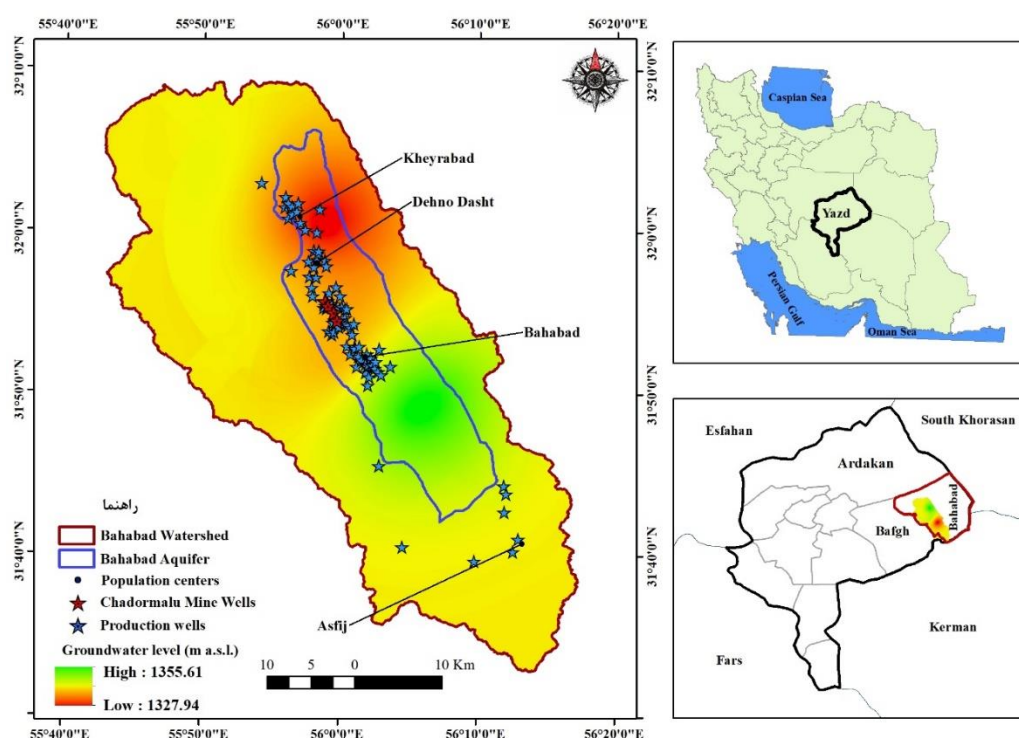
از سوی دیگر، توسعه فعالیت‌های صنعتی و ایجاد فرصت‌های شغلی در این شهرستان، این منطقه را به یکی از نواحی مهاجرپذیر کشور تبدیل کرده است که خود موجب افزایش تقاضا برای منابع آب می‌شود. در چنین شرایطی، پایش کیفیت آب زیرزمینی و ارزیابی اثر عوامل طبیعی و انسانی مؤثر بر وضعیت آبخوان‌ها در مقیاس‌های مکانی و زمانی گوناگون، ضرورتی انکارناپذیر به شمار می‌رود.

از این‌رو بررسی کیفیت آب زیرزمینی و ارزیابی تأثیرات عوامل مختلف بر آبخوان‌ها در مقیاس زمانی و مکانی مختلف امری مهم می‌باشد. برای بررسی روند زمانی و مکانی و همچنین تعیین کیفیت منابع آب زیرزمینی، روش‌ها و شاخص‌های متنوعی معرفی و توسعه داده شده است، که هر کدام از این روش‌ها از فاکتورهای مختلف، برای ارزیابی کیفیت آب بهره می‌گیرند. پژوهش‌های مرتبط نشان داد، استفاده از هر کدام این روش‌ها به تنهایی نمی‌تواند گویای وضعیت و گرایش کیفیت منابع آب زیرزمینی باشد. از این‌رو در پژوهش حاضر از روش ترکیبی برای بررسی تغییرات زمانی و مکانی کیفیت منابع آب استفاده شد. همچنین پژوهش‌ها نشان داد تحلیل تغییرات زمانی و مکانی کیفیت آب زیرزمینی در مناطق خشک ایران، عمدتاً محدود بوده و در موارد معدودی به ارتباط آن با انتقال آب بین‌حوضه‌ای پرداخته‌اند. این پژوهش‌ها عمدتاً بر آبخوان‌هایی متمرکز بوده‌اند که به‌عنوان مقصد یا میزبان طرح‌های انتقال آب مورد بهره‌برداری قرار گرفته‌اند. در مقابل، بررسی نظام‌مند وضعیت کیفیت آب زیرزمینی در آبخوان‌هایی که به‌عنوان مبدأ برداشت و انتقال آب بین‌حوضه‌ای عمل می‌کنند، به‌ویژه در مناطق خشک، کمتر مورد توجه قرار گرفته است. از این‌رو، انجام پژوهش حاضر با تمرکز بر آبخوان بهاباد، به‌عنوان یکی از منابع برداشت آب برای مصارف خارج از حوضه، می‌تواند خلأ موجود در ادبیات پژوهش را پوشش داده و اطلاعات ارزشمندی برای مدیریت پایدار منابع آب زیرزمینی فراهم آورد.

هدف پژوهش حاضر بررسی روند زمانی پارامترهای کیفی آب زیرزمینی با بهره‌گیری از آزمون من‌کندال و برآورد شیب سن و همچنین تحلیل تغییرات مکانی کیفیت آب زیرزمینی با استفاده از شاخص کیفیت منابع آب زیرزمینی (GQI) در آبخوان بهاباد می‌باشد.

پارامترها به جز TDS، در دوره زمانی مورد بررسی بر اساس طبقه‌بندی سازمان بهداشت جهانی در حد مجاز قرار داشتند. نتایج نهایی پژوهش حاضر نشان داد، آب انتقالی با کیفیت مناسب توانسته افزایش میزان کل جامدات محلول، سولفات و سدیم را کنترل کند و موجب افزایش کلر در این مناطق شود. خسروی و همکاران (Khosravi et al., 2016) به مطالعه تغییرات مکانی کیفیت آب زیرزمینی دشت یزد- اردکان با استفاده از GQI پرداختند. نتیجه نشان داد، سه پارامتر مواد جامد محلول، سدیم و کلر با داشتن بیشترین ضریب رتبه‌بندی به‌ترتیب دارای بیشترین تأثیر در مقدار شاخص GQI و در نتیجه کیفیت آب زیرزمینی هستند. همچنین روند شاخص GQI در منطقه مورد مطالعه نزولی است و کاربری اراضی نقش بسیار زیادی در کاهش میزان کیفیت آب‌های زیرزمینی دشت یزد- اردکان دارد. پارسایی و همکاران (Parsaie et al., 2020) مطالعه‌ای جهت بررسی تغییرات مکانی کیفیت آب زیرزمینی از نظر شرب و کشاورزی در دشت قروه در استان کردستان با استفاده از داده‌های سالانه ۱۳۸۸ تا ۱۳۹۳ انجام دادند. نتایج بدست آمده در مورد کیفیت آب‌های زیرزمینی از نظر شرب و کشاورزی نشان داد که مساحت مناطق دارای کلاس‌های مناسب‌تر در حال کاهش و مساحت مناطق دارای کلاس‌های نامناسب در حال افزایش است. نورکی و هوشمند (Nouraki & Hooshmand, 2021) طی مطالعه‌ای به بررسی روند و الگوی توزیع مکانی کیفیت آب زیرزمینی با استفاده از شاخص‌های کیفی آب با استفاده از آزمون‌های ناپارامتری و روش‌های درونیابی در دشت همدان بهار پرداختند. در پایان مقایسه نقشه‌های پهنه‌بندی مکانی شاخص WQI^۱ نشان داد که در ابتدا و انتهای دوره آماری ۱۰ ساله مورد بررسی میزان شاخص در کل سطح دشت یک روند کاهشی دارد. ناصری و همکاران (Nasseri et al., 2021) از یک رویکرد مکانی-زمانی کریجینگ برای بررسی الگوی کیفی حاکم بر تالاب بامدژ براساس چند شاخص کیفیت آب استفاده کرد. سبزواری و زینی‌وند (Sabzevari et al., 2020) اخیراً در دشت بروجرد- دورود با روش ناپارامتری من‌کندال و شاخص ذکر شده به بررسی کیفیت منابع آب زیرزمینی پرداخته و قدرت ارزیابی روش‌های ناپارامتری در روندیابی فاکتورهای کیفی را مناسب ارزیابی کردند.

اقلیم خشک و بارش محدود شهرستان بهاباد، در کنار تشدید تنش‌های آبی، موجب افزایش فشار بر منابع آب زیرزمینی این منطقه شده است. در سال‌های اخیر، علاوه بر مصارف محلی، بخشی از آب برداشت‌شده از آبخوان بهاباد از طریق تعدادی چاه عمیق وابسته به فعالیت‌های صنعتی و معدنی برای تأمین نیازهای خارج از محدوده حوضه مورد استفاده قرار می‌گیرد. این الگوی بهره‌برداری، ضمن افزایش برداشت از آبخوان، می‌تواند پیامدهای قابل‌توجهی بر کمیت و کیفیت منابع آب زیرزمینی در مقیاس‌های مختلف زمانی و مکانی به



شکل ۱- نقشه سطح ایستابی و موقعیت جغرافیایی آبخوان بهاباد

Figure 1- Groundwater level map and location of Production wells of Bahabad aquifer

مواد و روش‌ها

خصوصیات منطقه مورد مطالعه

آبخوان بهاباد واقع در حوضه آبخیز بهاباد و جزئی از قسمت جنوبی دشت بهاباد است که در شرق استان یزد و در شهرستان بهاباد قرار دارد. مساحت این آبخوان حدود ۲۹۹/۷۹ کیلومتر مربع می‌باشد. بر اساس داده‌های ایستگاه هواشناسی بهاباد (دریافتی از سازمان هواشناسی استان یزد) که از سال ۱۳۷۷ احداث شده، این منطقه دارای آب‌وهوای خشک تا نیمه‌خشک و متوسط بارندگی حدود ۱۵۳/۹ میلی‌متر در سال است. حداکثر درجه حرارت ثبت‌شده در منطقه طبق اطلاعات موجود در آمارنامه‌های هواشناسی ۴۵ درجه سانتی‌گراد و حداقل تا ۱۷ درجه زیر صفر رسیده است. مقدار تبخیر و تعرق پتانسیل سالانه در بهاباد ۳۰۶۸ میلی‌متر است. حداکثر تبخیر ماهیانه ۵۰۸/۱ میلی‌متر در تیرماه و کمترین آن مربوط به دی‌ماه به میزان ۵۳/۶ میلی‌متر است. شکل ۱ موقعیت منطقه مورد مطالعه در استان و کشور، تراز آب زیرزمینی بهاباد، موقعیت آبخوان و چاه‌های برداشت در آن را نشان می‌دهد.

در حوضه آبخیز بهاباد، ۲۹۳ منبع آب زیرزمینی شامل چاه‌های عمیق و نیمه‌عمیق، قنات‌ها و چشمه‌ها وجود دارد که مجموع برداشت سالانه از آن‌ها حدود ۴۰/۴۲ میلیون متر مکعب است. مصرف آب در این حوضه عمدتاً شامل ۷۴/۹ درصد کشاورزی، ۱۶/۴ درصد صنعت و

۸/۷ درصد شرب می‌باشد. چهار چاه اختصاصی معدن چادرملو سالانه حدود ۳/۸ میلیون متر مکعب آب را برای مصارف صنعتی و معدنی به خارج از حوضه منتقل می‌کنند.

روش تحقیق

داده‌های مورد استفاده در این پژوهش شامل اطلاعات کیفی آب زیرزمینی چاه‌های مشاهده‌ای آبخیز بهاباد بوده که از شرکت آب منطقه‌ای استان یزد دریافت شده و بازه زمانی ۱۳۸۱ تا ۱۴۰۲ را در بر می‌گیرد. در پژوهش حاضر، بررسی روند تغییرات زمانی منابع آب زیرزمینی آبخوان بهاباد با آزمون‌های ناپارامتری من‌کندال و تخمین‌گر شیب سن انجام گردید و جهت بررسی روند مکانی و ارزیابی و طبقه‌بندی کیفیت از طریق روش‌های درون‌یابی مناسب و شاخص کیفی منابع آب زیرزمینی (GQI) استفاده شد. با بررسی‌های انجام‌شده ۱۶ چاه مشاهداتی جهت اندازه‌گیری شاخصه‌های کیفی وجود داشت که تنها ۹ چاه با داده‌های کامل و قابل استفاده شناسایی شد. این اطلاعات از شرکت آب منطقه‌ای استان یزد دریافت گردید و شامل یون‌های کلسیم (Ca^{2+})، منیزیم (Mg^{2+})، سدیم (Na^{+})، کلر (Cl^{-})، سولفات (SO_4^{2-}) و کل جامدات محلول (TDS) می‌باشد که در همه چاه‌ها دوره زمانی برابر (۱۳۸۱-۱۴۰۲) در نظر گرفته شد.

جدول ۱- پارامترهای مربوط به چاه‌های مشاهده‌ای مورد بررسی در آبخوان بهاباد (وضعیت موجود)

Table 1- Quality parameters of monitoring wells in the Bahabad aquifer (Existing conditions)

کد چاه	utmx	utmy	So ₄ (mg/L)	Cl(mg/L)	Hco ₃ (mg/L)	TDS (mg/L)	Na ₋ (mg/L)	Mg (mg/L)	Ca (mg/L)
Q1	402809	3533165	76.96	47.94	2.24	7629	67.35	15.78	25.54
Q2	406198	3527687	12.88	23.97	3.68	2976	33.29	17.36	10.38
Q3	405359	3531952	16.66	14.1	3.6	2224	66.03	5.72	6.39
Q4	407612	3518445	3.12	2.26	5.76	740	46	3.16	3.03
Q5	408583	3525018	13	10.29	4	1293	52.17	6.55	7.35
Q6	409112	3524265	9.78	5.64	4.5	1292	55.82	4.58	4.07
Q7	412060	3510016	7.9	3.95	4	996	46.27	3.63	4.63
Q8	414427	3503337	14.15	6.06	3.92	1643	34.32	6.94	9.9
Q9	424178	3510712	15.55	17.2	4.8	2725	52.71	7.69	11.18

$$\beta = \frac{x_t - x_s}{t - s} \quad (۱)$$

در این رابطه: x_t و x_s به ترتیب داده‌های مشاهده‌ای در زمان t و s می‌باشد. به طوری که t یک واحد زمانی بعد از s است. با اعمال این رابطه برای هر دو جفت داده مشاهده‌ای، یک سری زمانی از شیب‌های محاسبه شده به دست می‌آید که از محاسبه میانه این سری زمانی، شیب خط روند (β_{med}) حاصل می‌آید. مقدار مثبت (β_{med}) حاکی از صعودی بودن روند و مقدار منفی آن نشان‌دهنده نزولی بودن روند می‌باشد (Torabipoudeh et al., 2020). هر دو روش مذکور با استفاده از نرم‌افزار XLSTAT 2019 انجام گردید. همچنین برای تحلیل روند در سطح آبخوان بهاباد، مقدار بزرگی روند (β_{med}) و همچنین وجود یا عدم وجود روند بدست آمده برای هر چاه در محیط GIS ترسیم شد.

الگوی مکانی کیفیت آب زیرزمینی

برای بررسی تغییرات مکانی پارامترهای کیفی، از روش‌های مختلف درون‌یابی (قطعی و زمین‌آمار) استفاده شد. بدین منظور، روش‌های مختلف درون‌یابی در نرم‌افزار GIS با یکدیگر مقایسه و روش بهینه با توجه به RMSE کمتر و R^2 بیشتر به دست آمد. روش‌های مورد بررسی در پژوهش حاضر، کریجینگ^۱، عکس فاصله (IDW)^۲، توابع شعاعی (RBF)، تخمین‌گر موضعی (GPI)^۳ و تخمین‌گر عام (LPI)^۴ می‌باشد. همچنین در پژوهش حاضر برای بررسی نرمالیت داده‌ها به عنوان پایه‌ای‌ترین آزمون‌های آماری از آزمون‌های کلموگروف اسمیرنوف^۵ و شاپیرو ویک^۶ استفاده گردید. همچنین به منظور انتخاب روش درون‌یابی مناسب، ویژگی‌های آماری و مکانی فاکتورهای مورد بررسی از جمله وجود روند مکانی، ساختار همبستگی فضایی و همسان‌گردی مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند تا شرایط به کارگیری دقیق و

در جدول ۱ مشخصات و پارامترهای موجود مربوط به چاه‌های مشاهده‌ای ارائه شده است. با توجه به اطلاعات موجود، اندازه‌گیری‌های کیفیت آب زیرزمینی دو بار در سال انجام شده است که یکی در فصل بهار و دیگری در فصل پاییز می‌باشد. در مطالعه حاضر همچنین جهت مقایسه‌ی میزان پارامترهای دشت از استاندارد سازمان بهداشت جهانی (Wang et al., 2013) استفاده گردید. در زیر روش‌های مورد استفاده در پژوهش حاضر توضیح داده می‌شود.

محاسبه روند زمانی از طریق روش‌های ناپارامتری

همانند دیگر آزمون‌های آماری، روش روندیابی من‌کندال نیز بر اساس مقایسه بین فرض صفر و فرض یک عمل می‌کند و تصمیم‌گیری نهایی در خصوص پذیرش یا رد فرض صفر انجام می‌شود. در این آزمون، فرض صفر نشان‌دهنده تصادفی بودن داده‌ها و عدم وجود روند در سری زمانی است، در حالی که رد فرض صفر (پذیرش فرض یک) بیانگر وجود یک روند معنادار در داده‌ها می‌باشد. در این تحقیق آزمون من‌کندال برای سطح اطمینان ۹۹ درصد به کار گرفته شده است که مقدار $Z_{\alpha/2}$ برابر ۲/۶۵ می‌باشد. دلیل عدم استفاده از سطح ۹۵ درصد اطمینان، نزدیکی نتایج حاصل از دو سطح اطمینان مذکور می‌باشد. در صورت مثبت بودن آماره‌ی روند، سری داده‌ها صعودی و در صورت منفی بودن آن، روند نزولی در نظر گرفته می‌شود. برای اندازه‌گیری میزان روند می‌توان شیب تخمینی β را توسط رابطه‌ای که توسط سن (Sen, 1968) ارائه و توسط هیرش و همکاران (Hirsch et al., 1982) توسعه یافت محاسبه کرد. این روش همانند روش من‌کندال بر اساس مفهوم تفاوت بین مشاهدات یک سری زمانی بنا نهاده شده است. رابطه به صورت زیر تعریف شده است:

4- Local Polynomial interpolation
5- Kolmogorov-Smirnov
6- Shapiro-Wilk

1- Kriging
2- Inverse Distance Weighting
3- Global Polynomial interpolation

صحيح روش‌های درون‌یابی برای هر پارامتر تعيين و بهترين روش انتخاب و مورد استفاده قرار گیرد.

پس از انتخاب بهترين مدل جهت درون‌یابی هر یک از فاکتورهای کیفی، اقدام به استخراج نقشه پهنه‌بندی با استفاده از داده‌های نقطه‌ای در دو سال ۱۳۸۱ و ۱۴۰۲ شد و با استفاده از شاخص کیفی آب زیرزمینی (GQI) اقدام به استخراج نقشه شاخص مذکور شد. انتخاب این دو سال به این دلیل صورت گرفت که چاه‌های مشاهده‌ای در این بازه زمانی دارای داده‌های منظم، قابل اتکا و قابل مقایسه بوده و امکان تحلیل تغییرات زمانی کیفیت آب زیرزمینی را فراهم می‌کردند. لازم به ذکر است فاکتورهای کیفی مورد بررسی در روند زمانی و مکانی یکسان بوده است.

توسعه شاخص کیفی آب‌های زیرزمینی

شاخص کیفیت آب زیرزمینی، ترکیب داده‌های آب با کیفیت‌های مختلف در دسترس را به شکلی قابل درک در می‌آورد. این شاخص ارائه‌دهنده روشی برای مختصرسازی شرایط کلی کیفیت آب است که می‌تواند به خوبی ارائه شود و به درک این مسئله که آیا کیفیت کلی آب زیرزمینی خطری بالقوه برای استفاده‌های مختلف آب است یا خیر، کمک می‌کند. در نهایت این شاخص با استفاده از غلظت یون‌های مهم مانند (Ca^{2+})، منیزیم (Mg^{2+})، سدیم (Na^+)، کلر (Cl^-)، سولفات (SO_4^{2-}) و کل جامدات محلول (TDS)، به ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان و نشان دادن موفقیت در حفظ و بهبود و همچنین بررسی وضعیت کلی آب زیرزمینی کمک می‌کند. مراحل محاسبه این شاخص نیز به شرح زیر می‌باشد (Babiker et al., 2007; Sarvi Sadraabad & Zare, 2022; Chahouki, 2022).

نقشه اولیه

غلظت اندازه‌گیری شده در هر سلول (نقشه‌های استخراجی با کمک روش‌های مناسب درون‌یابی در مرحله قبل) و غلظت استاندارد بهداشت جهانی (Torabipoudeh et al., 2020) را به واسطه رابطه شاخص اختلاف نرمالیزه شده (رابطه ۲) ترکیب و داده‌ها به صورت نرم جهانی^۱ استخراج شد (Babiker et al., 2007).

$$C = \bar{X} - X/\bar{X} + X \quad (2)$$

در این رابطه: X و $\bar{X}$ به ترتیب غلظت استاندارد سازمان بهداشت جهانی و غلظت اندازه‌گیری شده می‌باشد.

نقشه بدست آمده بیان‌گر فاکتورهای کیفی است که به عنوان نسبت بین غلظت اندازه‌گیری شده و حداکثر غلظت قابل پذیرش محاسبه شده است و محدوده‌ای بین ۱- تا ۱ را دارا است.

نقشه رتبه‌بندی

در این مرحله، غلظت شاخص‌ها به یک نقشه رتبه‌بندی با محدوده

بین ۱ تا ۱۰ تبدیل می‌شود. رتبه ۱ نشان‌دهنده کمترین مقدار و رتبه ۱۰ بیشینه می‌باشد. می‌توان از تابع چند جمله‌ای زیر (رابطه ۳) با محدوده تغییرات ۱ تا ۱۰ استفاده کرد. در این معادله، C مقدار شاخص‌های کیفی برای هر سلول و r مقدار رتبه مربوط به آن می‌باشد (Amiri kariz kohani et al., 2021).

$$r = 0.5 \times C^2 + 4.5 \times C + 5 \quad (3)$$

برای تعیین کلی کیفیت آب از طریق رابطه زیر، پهنه‌بندی GQI ترسیم می‌گردد.

$$GQI = 100 - \left[\frac{r_1 w_1 + r_2 w_2 + r_3 w_3 + \dots + r_6 w_6}{6} \right] \quad (4)$$

در رابطه فوق r رتبه و w وزن نسبی هر یک از پارامترها می‌باشد. وزن نسبی هر پارامتر از رابطه (۵) بدست می‌آید.

$$w = \text{mean } r + 2 \quad (5)$$

برای محاسبه GQI از پارامترهای مختلف میانگین وزنی گرفته می‌شود (Grzywna & Bronowicka-Mielniczuk, 2020). وزن مختص هر پارامتر، بیان‌کننده اهمیت نسبی آن پارامتر در آب زیرزمینی مربوط به مقدار رتبه‌بندی میانگین (نقشه رتبه‌بندی) آن است. پارامترهایی که تأثیر بیشتری بر کیفیت آب‌های زیرزمینی (میزان میانگین بالا) دارند، در ارزیابی کلی کیفیت آب زیرزمینی مهم‌تر هستند. در نهایت و با تقسیم حاصل ضرب رتبه هر پارامتر در وزن میانگین آن بر تعداد کل پارامترها، شاخص کیفیت آب زیرزمینی با محدوده مقدار شاخص بین ۱ تا ۱۰۰ بدست می‌آید. مقادیر نزدیک به عدد ۱۰۰ نشان‌دهنده کیفیت مطلوب و مقادیر نزدیک به یک بیان‌گر کیفیت نامطلوب است. بدین ترتیب تأثیر پارامترها به صورت انفرادی تا حد زیادی کاهش می‌یابد و محاسبه شاخص هرگز به تعداد معینی از پارامترهای شیمیایی محدود نمی‌گردد. جدول ۲ کلاس‌بندی مقادیر شاخص GQI را نشان می‌دهد.

به منظور تحلیل تغییرپذیری کیفیت آب زیرزمینی، در دوره زمانی ۱۳۸۱-۱۴۰۲ با توجه به نقشه‌های GQI ابتدا (GQIt) و انتهای دوره (GQIt+1) مطالعاتی از رابطه (۶) استفاده شد و تغییرات کیفیت آب زیرزمینی تعیین گردید (Smiraglia et al., 2016).

$$[(GQI_{t+1} - GQI_t)/GQI_t] \times 100 \quad (6)$$

نتایج و بحث

جدول ۳ آمار توصیفی پارامترهای بررسی شده در منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد و غلظت‌های آستانه را برحسب استاندارد سازمان بهداشت جهانی بیان می‌دارد.

جدول ۲- طبقه‌بندی کیفیت آب بر اساس شاخص GQI (۴)

Table 2- Classification of water quality based on GQI

0-25	25-50	50-70	70-90	90-100	مقدار GQI
کاملاً نامطبوع	نامناسب	متوسط	قابل قبول	مناسب	کلاس کیفیت آب
Completely unsuitable	Unsuitable	Medium	Acceptable	Suitable	Water quality class

جدول ۳- مشخصه‌های آماری کیفیت آبخوان مورد مطالعه در دوره (۱۴۰۲-۱۳۸۱)

Table 3- Statistical characteristics of the aquifer water quality in the period of (2002-2023)

مشخصه	حداقل	حداکثر	انحراف معیار	میانگین	استاندارد آشنامدنی سازمان بهداشت جهانی
Characteristic	Minimum	Maximum	Standard deviation	Average	Drinking standard of the WHO
Ca ²⁺	3.03	25.54	6.5	9.19	300
Mg ²⁺	3.16	17.36	4.9	7.93	300
Na ⁺	33.29	67.35	11.4	50.37	200
Cl ⁻	2.26	47.94	13.7	14.61	200
So ₄ ²⁻	3.12	76.96	21.2	18.99	250
TDS	740	7629	2110	2399	600

جدول ۴- نتایج آزمون نرمالیت داده پارامترهای کیفی آب

Table 4- Results of normality test for water quality parameters

	کلموگروف-سمیرونوف			شاپیرو-ویلک		
	Kolmogorov-Smirnova			Shapiro-Wilk		
	Statistic	Df	Sig.	Statistic	df	Sig.
So ₄	.429	9	.000	.575	9	.000
Cl	.206	9	.200*	.808	9	.025
TDS	.280	9	.041	.723	9	.003
Na	.134	9	.200*	.935	9	.529
Mg	.297	9	.022	.805	9	.024
Ca	.272	9	.053	.785	9	.014

*. This is a lower bound of the true significance.

a. Lilliefors Significance Correction

تغییرات مکانی

پیش از آغاز فرآیند درون‌یابی، با استفاده از دو آزمون کلموگروف اسمیرونوف و شاپیرو ویک اقدام به بررسی توزیع نرمال پارامترهای کیفی مورد نظر گردید. جدول ۴ نتایج آزمون‌های مذکور را نشان می‌دهد. نتایج آزمون نرمال بودن نشان داد که به استثناء پارامتر سدیم در آزمون شاپیرو ویک و پارامترهای کلر و سدیم در آزمون کولموگروف اسمیرونوف، سایر پارامترها از توزیع نرمال پیروی نمی‌کنند. همچنین به دلیل تعداد کم چاه‌ها (۹ حلقه)، روش کریجینگ بیزین تجربی نیز با خطا مواجه شد.

به منظور سنجش آمادگی داده‌ها برای تحلیل‌های مکانی، مجموعه‌ای از ارزیابی‌های آماری و فضایی شامل تحلیل نیم‌تغییرنما، بررسی همسان‌گردی (Zenebe et al., 2025) و شناسایی روند مکانی انجام شد. این تحلیل‌ها با هدف اطمینان از صحت، کفایت و سازگاری داده‌ها جهت بهره‌گیری از روش‌های درون‌یابی مناسب صورت گرفتند. بررسی‌ها نشان داد در همه پارامترها روند مکانی ضعیفی وجود دارد. پارامترهای So₄، Cl، TDS و Ca همسان‌گرد و مابقی غیرهمسان‌گرد

(تغییر نیم تغییرنما در جهات مختلف) هستند. همچنین همبستگی مکانی در پارامترهای So₄، Cl و Na زیر ۵۰ درصد و Ca زیر ۲۵ است. شاخص Mg نیز دارای نیم‌تغییرنمای خطی می‌باشد.

بر این اساس، جدول ۵ مقادیر شاخص‌های RMSE و R² را برای روش‌های مختلف نشان می‌دهد. نتایج این جدول بیانگر پایین بودن ضریب تعیین (R²) در تمامی روش‌ها است که بر ضعف دقت پیش‌بینی تأکید دارد. بر همین اساس، فرایند نرمال‌سازی داده‌ها به منظور ارتقای کیفیت تحلیل و افزایش دقت مدل‌های درون‌یابی اجرا گردید (Zenebe et al., 2025).

برای نرمال‌سازی داده‌ها مشابه رویکردی که توسط کراوچنکو و بولاک (Kravchenko & Bullock, 1999) انجام شد از تبدیل لگاریتمی طبیعی (Ln) استفاده گردید. جدول ۶ نتیجه تست انجام شده بر روی داده‌های نرمال شده را نشان می‌دهد.

جدول ۵- مقایسه روش‌های درون‌یابی با توجه به دقت برآورد در پارامترهای کیفی منابع آب

Table 5- Comparison of interpolation methods based on estimation accuracy of water quality parameters

	کریجینگ		کریجینگ بیزین تجربی		عکس فاصله		تخمین گر موضعی		تخمین گر عام		توابع شعاعی	
	Kriging		Empirical Bayesian Kriging		Inverse distance weighting		Global Polynomial interpolation		Local Polynomial interpolation		Radial basis unction	
	R2	RMSE	R2	RMSE	R2	RMSE	R2	RMSE	R2	RMSE	R2	RMSE
So4	0.13	4.85			0	23.84	0	45.72	0	24.2	0.02	23.24
Cl	•	3.78	خطا به علت کوچک		0.03	14.5	0	29.47	0.42	10.7	0	14.06
TDS	•	46.19	بودن اندازه نمونه		0.01	2187	0	4708	0.23	1805	0	2123
Na_	•	3.44	Error due to small		0.12	10.83	0.12	11.45	0.12	10.9	0.44	8.57
Mg	0.5	2.32	sample size		0.02	5.75	0	8.36	0.4	5.4	0.03	5.41
Ca	0.27	2.72			0.03	7.97	0.03	7.97	0	4.6	0.07	7.44

جدول ۶- نتایج آزمون نرمالیت داده پارامترهای کیفی آب (نرمال شده)

Table 6- Results of Normality Test for Water Quality Parameters (Normalized)

	کلموگروف-سمیروونوف			شاپیرو-ویلک		
	Kolmogorov-Smirnova			Shapiro-Wilk		
	Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
NORMAL_So4	.276	9	.046	.883	9	.170
NORMAL_Cl	.139	9	.200*	.989	9	.994
NORMAL_TDS	.145	9	.200*	.950	9	.694
NORMAL_Na	.175	9	.200*	.919	9	.383
NORMAL_Mg	.189	9	.200*	.924	9	.431
NORMAL_Ca	.159	9	.200*	.965	9	.853

*. This is a lower bound of the true significance.

a. Lilliefors Significance Correction

محدودیت باشد اما با توجه به بهبود ضریب تعیین از روش کریجینگ داده‌های نرمال شده برای درون‌یابی این شاخص استفاده شد. حال با استفاده از این داده‌ها اقدام به بررسی روش‌های مختلف درون‌یابی و انتخاب بهترین روش شد (جدول ۷). همچنین به دلیل اهمیت استفاده از داده‌های اصلی در محاسبه شاخص‌های کیفی پس از بررسی اقدام به ضدلگاریتم کردن (WHO, 2004) نقشه رستری با استفاده از نرم‌افزار ARC GIS شد.

نتایج درون‌یابی پارامترهای مختلف پس از نرمال‌سازی نشان داد، نرمال‌سازی می‌تواند بر روی همسان‌گردی تأثیر بگذارد به طوری که پارامتر SO_4 پس از نرمال‌سازی غیرهمسان‌گرد شده و پارامترهای TDS و Mg پس از نرمال‌سازی همسان‌گرد شدند. همچنین نتایج نشان داد علی‌رغم این که نرمال‌سازی هیچ تأثیری بر روی روند ندارد، می‌تواند وضعیت همبستگی مکانی را ارتقا دهد. به طوری که پس از نرمال‌سازی همبستگی مکانی (نسبت اثر قطعه‌ای به سقف) در پارامترهای مختلف مثل SO_4 ، Cl و TDS زیر ۱۰ درصد رسیده است. همبستگی مکانی در پارامترهای Na و Ca به ترتیب حدود ۶۰ و ۳۰ درصد می‌باشد. بر این اساس، برای پارامترهای Cl و Ca از روش RBF ثانویه،

بررسی آزمون‌های تست توزیع نرمال نشان داد پارامتر Na دارای توزیع نرمال است اما به همراه سایر پارامترها عملیات نرمال‌سازی بر روی این پارامتر نیز انجام شد، اما نتایج نشان داد ضریب تعیین روش RBF برای داده اولیه بسیار بیشتر از داده ثانویه بوده است. این مسئله مبین این است در صورت نرمال بودن داده‌ها، نرمال‌سازی اضافی ممکن است ساختار فضایی طبیعی داده‌ها را مختل کرده و دقت روش‌های درون‌یابی مانند RBF را کاهش دهد، بویژه زمانی که همبستگی مکانی یا توزیع اولیه به طور ذاتی با مدل سازگار باشد. از این رو از داده‌های ابتدایی برای درون‌یابی با روش منتخب استفاده شد. در مورد پارامتر Mg، نتایج نشان می‌دهد که نرمال‌سازی توانسته ضریب تعیین را بهبود بخشد و داده‌ها را به حالت همسان‌گردی تبدیل کند، هرچند در هر دو حالت (داده‌های اولیه و نرمال شده) نیم‌تغییرنا خطی باقی مانده و ضریب تعیین نسبتاً قابل قبولی بدست آمده است. با وجود این که همبستگی مکانی مناسب نیست، استفاده از داده‌های نرمال شده ترجیح داده شد زیرا نرمال‌سازی نه تنها توزیع داده‌ها را بهبود داده، بلکه با کاهش پراکندگی، دقت مدل کریجینگ را افزایش داده است. از این علی‌رغم همبستگی مکانی ضعیف که ممکن است همچنان یک

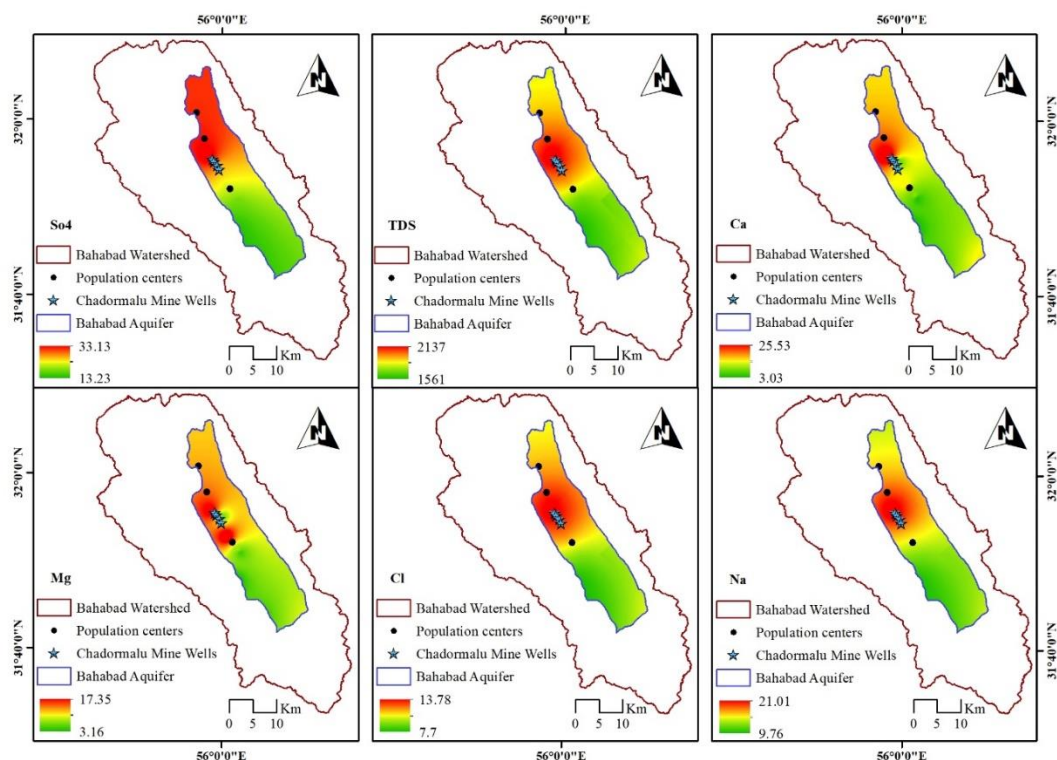
رنگ سبز و بیشترین مقدار با رنگ قرمز مشخص شده است.

TDS از روش LPI ثانویه، SO_4 از روش IDW ثانویه، Na از روش RBF اولیه و منیزیم از روش کریجینگ ثانویه استفاده شد. شکل‌های ۲ و ۳ توزیع مکانی مشخصات کیفی آبخوان مورد مطالعه برای سال‌های ۱۳۸۱ و ۱۴۰۲ را نشان می‌دهد. به‌طوری‌که کمترین مقدار با

جدول ۷- مقایسه روش‌های درون‌یابی با توجه به دقت برآورد در پارامترهای کیفی منابع آب (داده نرمال)

Table 7- Comparison of interpolation methods based on estimation accuracy of water quality parameter (Normalized)

	کریجینگ		کریجینگ بیزین تجربی		عکس فاصله		تخمین گر موضعی		تخمین گر عام		توابع شعاعی	
	R2	RMSE	R2	RMSE	R2	RMSE	R2	RMSE	R2	RMSE	R2	RMSE
So4	0	0.67			0.05	0.63	0.02	1.37	0.01	1.07	0	0.65
Cl	0.17	0.68	خطا به علت کوچک بودن اندازه نمونه		0.11	0.74	0.03	1.48	0.28	0.68	0.42	0.50
TDS	0.09	0.41	Error due to small sample size		0.12	0.41	0.02	1.58	0.25	0.37	0.06	0.41
Na	0.05	0.06			0.04	0.06	0.08	0.06	0.04	0.06	0.24	0.04
Mg	0.62	0.40			0.01	0.42	0	0.74	0	0.47	0.02	0.37
Ca	0.35	0.50			0.02	0.53	0.18	1.39	0	0.56	0.44	0.46

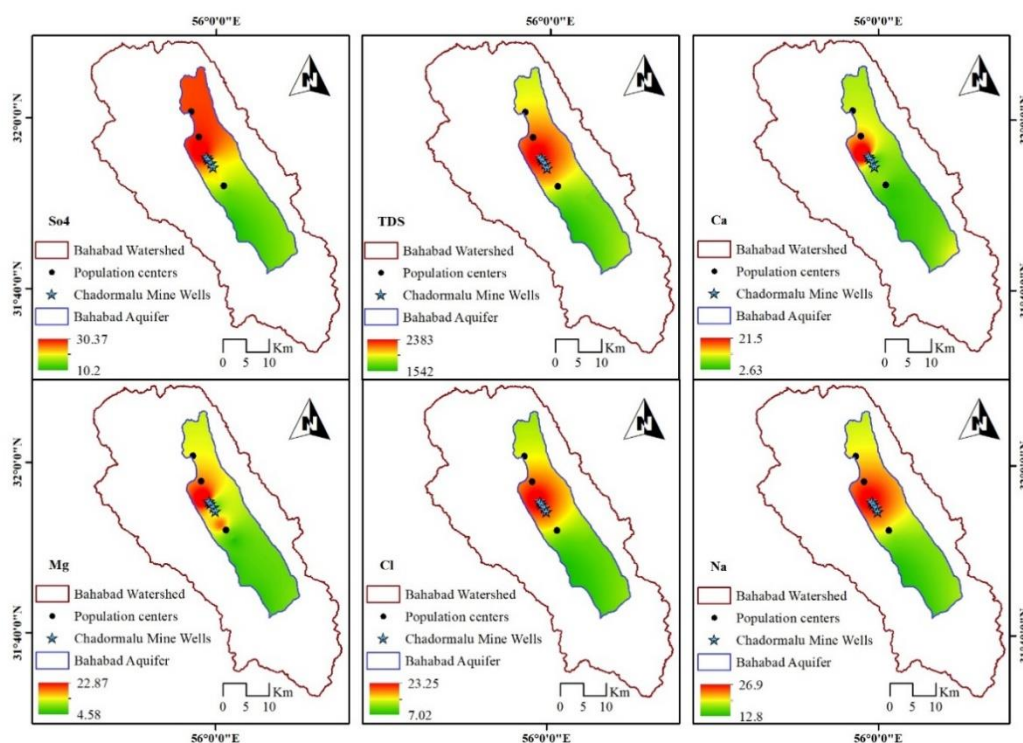


شکل ۲- توزیع مکانی مشخصات کیفی آبخوان مورد مطالعه در سال ۱۳۸۱

Figure 2- Spatial distribution of water quality characteristics in the study area Aquifer in 2002

دارد. بیشینه مقادیر پارامترهایی نظیر TDS، Na، Cl و SO_4 عمدتاً در بخش‌های مرکزی آبخوان و در محدوده‌هایی مشاهده می‌شود که تراکم چاه‌های بهره‌برداری و مراکز جمعیتی در آن‌ها بالاتر است.

بررسی نقشه‌های توزیع مکانی پارامترهای کیفی آب زیرزمینی در دشت بهاباد نشان می‌دهد که الگوی تغییرات کیفیت آب، بیش از آن‌که متأثر از تأثیرات زمین‌شناسی باشد، تحت تأثیر فشارهای انسانی، الگوی بهره‌برداری و مجاورت با مراکز جمعیتی و چاه‌های برداشت متمرکز قرار



شکل ۳- توزیع مکانی مشخصات کیفی آبخوان مورد مطالعه در سال ۱۴۰۲
Figure 3- Spatial distribution of water quality characteristics in the study area Aquifer in 2023

آب و تمرکز فعالیت‌های انسانی نقش تعیین‌کننده‌ای در توزیع مکانی کیفیت آب زیرزمینی دشت بهاباد ایفا می‌کند. این یافته‌ها بر ضرورت بازنگری در مدیریت برداشت‌های صنعتی و معدنی، کنترل توسعه چاه‌های بهره‌برداری و تقویت برنامه‌های پایش کیفی آب زیرزمینی، بویژه در نواحی مجاور مراکز جمعیتی و چاه‌های پر بارزده، تأکید می‌کند. مقایسه نقشه‌های توزیع مکانی پارامترهای کیفی آب زیرزمینی در سال‌های ۱۳۸۱ و ۱۴۰۲ نشان‌دهنده تشدید و گسترش نواحی با کیفیت نامطلوب آب در دشت بهاباد است. در سال ۱۴۰۲، محدوده‌های با مقادیر بالاتر TDS، Na، Cl و SO_4 نسبت به سال ۱۳۸۱ از تمرکز موضعی فراتر رفته و به صورت گسترده‌تری در بخش‌های مرکزی آبخوان توسعه یافته‌اند. این روند افزایشی بویژه در مجاورت مراکز جمعیتی و چاه‌های بهره‌برداری برجسته‌تر است. افزایش تدریجی غلظت این پارامترها را می‌توان نتیجه برداشت مداوم و فزاینده از آبخوان، افت سطح آب زیرزمینی، کاهش تغذیه طبیعی و انتقال بخشی از آب به خارج از حوضه دانست. به طور کلی، سیر تحول کیفی آب زیرزمینی طی دوره مورد بررسی بیانگر غلبه فشارهای انسانی بر سیستم آبخوان بوده و نشان می‌دهد که تداوم الگوی فعلی بهره‌برداری، می‌تواند منجر به افت بیشتر کیفیت آب و محدود شدن قابلیت استفاده از منابع آب زیرزمینی در آینده شود.

افزایش غلظت املاح محلول و یون‌های غالب در این نواحی می‌تواند ناشی از برداشت بی‌رویه و مداوم از آبخوان باشد که منجر به افت سطح آب زیرزمینی، کاهش تغذیه طبیعی و در نتیجه تمرکز بیشتر املاح در آب می‌شود. این شرایط بویژه در مجاورت چاه‌های تولیدی وابسته به فعالیت‌های صنعتی و معدنی، از جمله چاه‌های معدن چادرملو، بارزتر است؛ به طوری که برداشت متمرکز آب و انتقال بخشی از آن به خارج از حوضه، تعادل طبیعی آبخوان را بر هم زده و زمینه‌ساز افت کیفیت آب زیرزمینی در مقیاس مکانی شده است که با نتیجه پژوهش امیری کاریزکهنی و همکاران (Amiri kariz kohani *et al.*, 2021) و الفرح و والراونس (Alfarrah & Walraevens, 2018) مطابقت دارد.

همچنین، هم‌پوشانی نواحی با کیفیت پایین‌تر آب زیرزمینی با مراکز جمعیتی بیانگر نقش مؤثر فعالیت‌های انسانی نظیر افزایش مصرف آب، بازگشت جریان‌های آبی با کیفیت پایین و تغییر الگوی کاربری اراضی در تشدید آلودگی و شوری آب زیرزمینی است. در چنین شرایطی، کاهش توان خودپالایی آبخوان و افزایش زمان ماند آب در اثر افت سطح ایستابی، می‌تواند روند تجمع املاح را تسریع کند. به طور کلی، نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که الگوی برداشت

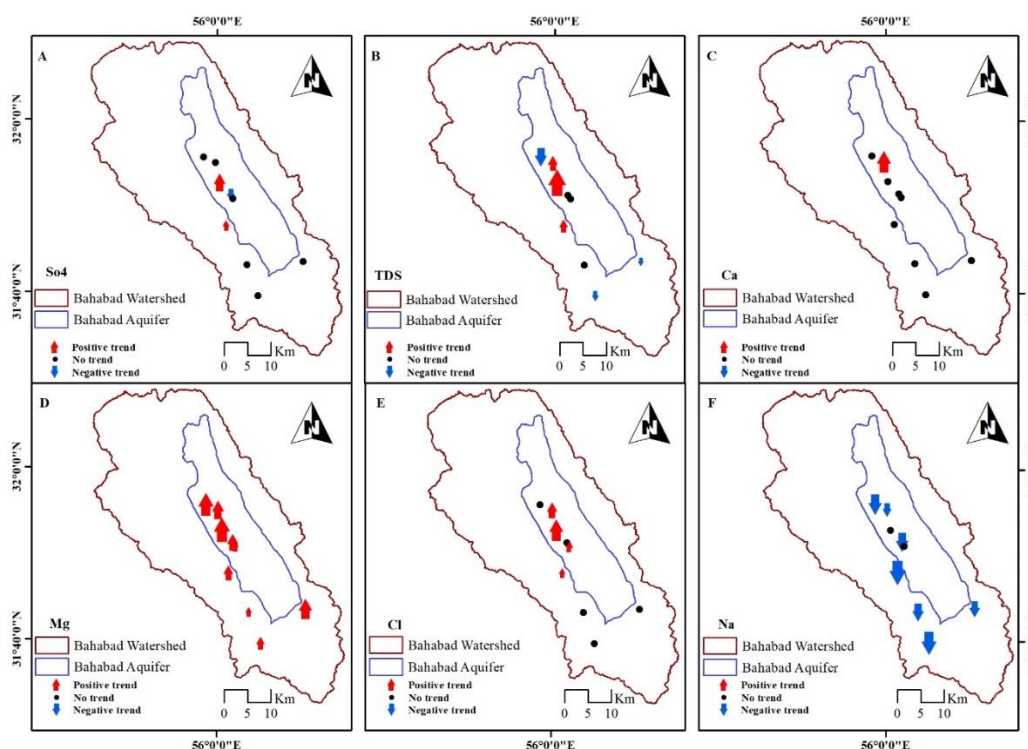
روند زمانی

شکل ۴ نشان‌دهنده وضعیت روند مشخصه‌های کیفی هر کدام از چاه‌هایی مورد بررسی است که از طریق روش‌های من‌کندال و شیب سن در سطح ۹۹ درصد انجام شد. نتایج نشان داد، در دوره آماری مورد بررسی الگوی تغییرات زمانی کیفیت آب، ناهمگن و وابسته به موقعیت مکانی چاه‌ها است. در اغلب ایستگاه‌ها، پارامتر Ca فاقد روند معنادار بوده و تنها در یک ایستگاه روند افزایشی ضعیف مشاهده شده است. در مقابل، پارامتر Cl در چندین ایستگاه دارای روند افزایشی معنادار با شیب مثبت بوده که بیانگر افزایش تدریجی شوری آب زیرزمینی در برخی نقاط دشت است.

پارامتر Mg در اکثر ایستگاه‌ها روند افزایشی معنادار نشان می‌دهد که می‌تواند به افزایش غلظت املاح محلول در اثر برداشت مداوم و افت سطح آب زیرزمینی مرتبط باشد. همچنین، Na در تعدادی از ایستگاه‌ها دارای روند کاهشی معنادار و در برخی دیگر فاقد روند مشخص است که نشان‌دهنده رفتار مکانی متفاوت این یون در آبخوان می‌باشد. پارامتر SO_4 عمدتاً فاقد روند معنادار است، هر چند در چند ایستگاه روند افزایشی یا کاهشی محدود مشاهده می‌شود.

از سوی دیگر، پارامتر TDS در بیشتر ایستگاه‌ها دارای روند معنادار (عمدتاً کاهشی و در یک ایستگاه افزایشی شدید) است که بیانگر تغییرات قابل‌توجه در میزان املاح محلول آب زیرزمینی طی دوره مطالعه می‌باشد. این تغییرات می‌تواند تحت تأثیر الگوی برداشت آب، تمرکز چاه‌های بهره‌برداری، تغییرات کاربری اراضی و انتقال بخشی از آب به خارج از حوضه قرار گرفته باشد. به‌طور کلی، نتایج آزمون روند نشان می‌دهد که کیفیت آب زیرزمینی دشت بهاباد در برخی پارامترهای کلیدی، به‌ویژه Mg، Cl و TDS، دچار تغییرات معنادار زمانی شده و این موضوع بر ضرورت پایش مستمر و مدیریت برداشت‌های انسانی تأکید می‌کند.

بر این اساس، در آبخوان بهاباد تغییرات سولفات و کلر تا حدودی الگوی مشابهی را نشان می‌دهد که این نتیجه با یافته‌های خسروی و همکاران (Khosravi et al., 2016)، دشتی برمکی و همکاران (DashtiBarmaki et al., 2014)، سبزواری و زینی‌وند (Sabzevari & Zeinivand, 2020) و سروی صدرآباد و زارع چاهوکی (Sarvi & Zare Chahouki, 2022) تا حدودی همخوانی دارد. این همخوانی به‌دلیل انجام مطالعات در مناطق خشک و نیمه‌خشک، استفاده مشترک از روش GQI و بررسی تغییرات زمانی کیفیت آب در پاسخ به برداشت از آبخوان می‌باشد.



شکل ۴- روند پارامترهای کیفی آب چاه‌های مورد بررسی در دشت بهاباد، (A): سولفات، (B): کل جامدات محلول، (C): کلسیم، (D): منیزیم، (E): کلر و (F): سدیم

Figure 4- The trend of the quality parameters of the study wells in the Bahabad Plain, (A): sulfate, (B): TDS, (C): calcium, (D): magnesium, (E): chloride (F): sodium

قرار دارد کیفیت پایین‌تر از سایر نواحی می‌باشد. دلیل این امر، وجود حداکثر غلظت پارامترهای کیفی در این نواحی از آبخوان می‌باشد. بیشترین کاهش کیفیت آب در محدوده شهر بهاباد، سایر مراکز جمعیتی و همچنین در مجاورت چاه‌های صنعتی که آب را به خارج از حوضه منتقل می‌کنند، مشاهده شد. این الگو بیانگر فشار بالای بهره‌برداری و مصرف قابل توجه آب زیرزمینی در این نواحی است. در مقابل، بیشترین بهبود کیفیت آب زیرزمینی مربوط به بخش جنوب‌غربی دشت بهاباد می‌باشد که از فشارهای انسانی کمتری برخوردار است.

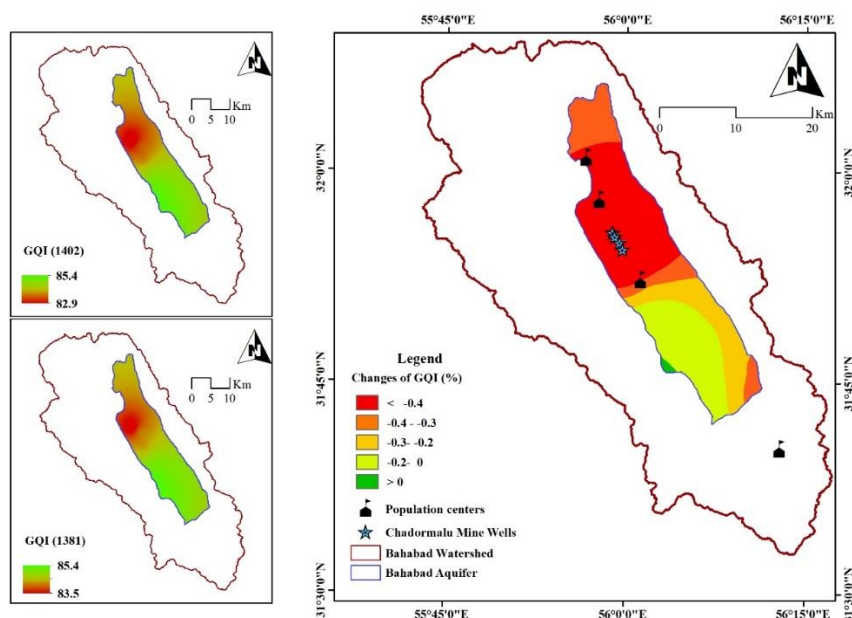
نتیجه‌گیری

نتایج این مطالعه نشان داد که کیفیت آب زیرزمینی در آبخوان بهاباد طی دوره زمانی ۱۳۸۱ تا ۱۴۰۲ در طبقه قابل قبول قرار دارد، اما روند کاهشی اندک اما معناداری در کیفیت مشاهده شد. میانگین GQI در آغاز دوره حدود ۸۵ و در انتها حدود ۸۳-۸۴ بود که بیانگر کاهش جزئی کیفیت کلی است. این کاهش عمدتاً در نواحی مرکزی و شمالی آبخوان، به‌ویژه اطراف مراکز جمعیتی (مانند شهر بهاباد) و مجاورت چاه‌های برداشت متمرکز صنعتی (ازجمله چاه‌های معدن چادرملو)، برجسته‌تر بود.

در مقابل، دو پارامتر منیزیم و سدیم رفتار زمانی متفاوت و حتی متضادی را از خود نشان می‌دهند. بر اساس نتایج پژوهش‌های پیشین، پارامترهای سدیم، کلر و TDS بیشترین تأثیر را در تعیین کیفیت آب زیرزمینی داشته و معمولاً از الگوی تغییرات مشابهی تبعیت می‌کنند؛ با این حال، نتایج پژوهش حاضر نشان می‌دهد که این هم‌رفتاری در آبخوان بهاباد به‌صورت یکنواخت مشاهده نمی‌شود. این تفاوت می‌تواند ناشی از غلبه عوامل انسانی، بویژه الگوی برداشت متمرکز، انتقال آب به خارج از حوضه و ناهمگنی مکانی فشار بهره‌برداری باشد که موجب تفکیک رفتار زمانی برخی پارامترهای کیفی نسبت به یکدیگر شده است.

پهنه‌بندی کیفیت آب زیرزمینی

شکل ۵، نقشه پهنه‌بندی شاخص GQI مربوط به ابتدا و انتهای دوره زمانی و تغییرپذیری آن در آبخوان بهاباد می‌باشد. بر اساس این نقشه و بازه تغییرات مقدار GQI، آبخوان در کلاس قابل قبول قرار دارد. نتایج نشان داد که تغییرات شاخص GQI در بازه‌ای بین ۰/۵- تا ۰/۱+ درصد متغیر است؛ به‌طوری‌که مقادیر منفی بیانگر کاهش و مقادیر مثبت نشان‌دهنده بهبود کیفیت منابع آب زیرزمینی می‌باشند. در نواحی شمال غرب آبخوان که مراکز جمعیتی بزرگ‌تر مانند شهر بهاباد



شکل ۵- پهنه‌بندی GQI و میزان تغییرات آن در دوره ۱۳۸۱-۱۴۰۲
Figure 5- GQI zoning and its changes in the period of 2002-2023

مقایسه روش‌های درون‌یابی نشان داد که در شرایط نمونه‌برداری محدود (۹ چاه) و همبستگی مکانی ضعیف، روش‌های قطعی اغلب دقت پیش‌بینی بالاتری نسبت به روش‌های زمین‌آماري (کریجینگ و کریجینگ بیزین تجربی) ارائه کردند. نرمال‌سازی لگاریتمی در برخی پارامترها دقت مدل را بهبود بخشید، اما در مواردی مانند Na^+ که توزیع اولیه نزدیک به نرمال بود، استفاده از داده‌های خام نتایج بهتری به همراه داشت.

در نهایت، با وجود کاهش اندک شاخص GQI، نقشه تغییرات آن نتوانست شدت محلی کاهش کیفیت به‌ویژه در پارامترهای تعیین‌کننده مانند TDS، Na^+ و SO_4^{2-} را به‌طور کامل منعکس کند. این یافته بیانگر آن است که شاخص‌های ترکیبی مانند GQI می‌توانند اثرات متضاد روندهای پارامتری را تا حدی خنثی کرده و تصویری متعادل‌تر و واقع‌بینانه‌تر از وضعیت کلی کیفیت ارائه دهند. نتایج پژوهش بر ضرورت بازنگری فوری در مدیریت برداشت‌های صنعتی و معدنی، کنترل توسعه چاه‌ها و اجرای برنامه‌های پایش مستمر کیفیت آب زیرزمینی در نواحی پر فشار تأکید دارد.

بررسی توزیع مکانی پارامترهای کیفی حاکی از آن است که الگوی شوری و غلظت یون‌ها بیش از عوامل زمین‌شناختی طبیعی، تحت تأثیر فشارهای انسانی از جمله برداشت بی‌رویه، افت سطح ایستابی، انتقال بین‌حوضه‌ای آب و تغییر کاربری اراضی قرار دارد. نواحی با بیشترین غلظت املاح محلول هم‌پوشانی قابل توجهی با تراکم چاه‌های بهره‌برداری و مراکز جمعیتی نشان می‌دهند که این امر زمینه‌ساز تمرکز املاح و کاهش توان خودپالایی آبخوان شده است. تحلیل روند زمانی با استفاده از آزمون‌های آماری، ناهمگنی مکانی قابل‌ملاحظه‌ای را آشکار ساخت. پارامترهای Mg^{2+} و Cl^- در اکثر ایستگاه‌ها روند افزایشی معنادار داشتند، در حالی که Na^+ و SO_4^{2-} در برخی چاه‌ها روند کاهشی یا بدون روند نشان دادند. TDS نیز عمدتاً روندهای متفاوتی (اغلب کاهشی اما در یک ایستگاه افزایشی شدید) از خود بروز داد. این رفتار متفاوت، به‌ویژه جدایی روند سدیم از کلر و TDS، با بسیاری از مطالعات پیشین در آبخوان‌های ایران همخوانی ندارد و می‌تواند ناشی از غلبه عوامل انسانی محلی مانند برداشت متمرکز و انتقال آب به خارج از حوضه باشد.

References

- Alfarrah, N., & Walraevens, K. (2018). Groundwater overexploitation and seawater intrusion in coastal areas of arid and semi-arid regions. *Water*, 10(2), 143. <https://doi.org/10.3390/w10020143>
- Alipour, A., Rahimi, J., & Azarnivand, A. (2017). Groundwater quality analysis for drinking and agricultural purposes a prerequisite for land use planning in the arid and semi-arid regions of Iran. *Journal of Range and Watershed Management*, 70(2), 423-434. (In Persian).
- Amiri kariz kohani, F.S., Khashe Siuki, A., Ahmadi Haji, A.H., & Kavusi, M. (2021). Investigating the effect of groundwater on aquifer water salinity change (Case study: Neyshabour plain). *Journal of Aquifer and Qanat*, 2(1), 92-101.
- Babiker, I.S., Mohamed, M.A.A., & Hiyama, T. (2007). Assessing groundwater quality using GIS. *Water Resources Management*, 21, 699-715. <https://doi.org/10.1007/s11269-006-9059-6>
- Chenini, I., & Khemiri, S. (2009). Evaluation of ground water quality using multiple linear regression and structural equation modeling. *International Journal of Environment Science and Technology*, 6(3), 509-519. <https://doi.org/10.1007/bf03326090>
- Cordoba, E., Martinez, A., & Ferrer, E. (2010). Water quality indicators: comparison of a probabilistic index and a general quality index, The case of the confederacion hidrografica del jucar (spain). *Ecological Indicators*, (10), 1049-1054. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2010.01.013>
- DashtiBarmaki, M., Rezaei, M., & Saberi Nasr, A. (2014). Assessment of groundwater quality index (GQI) for Lenjanat aquifer using GIS. *Journal of Engineering Geology*, 8(2), 2121-2138. (In Persian).
- Dustmohammadian, A.H., Mohammady, M., Amiri, M., & Kianian, M.K. (2021). Investigating temporal changes of groundwater quality in Semnan plain using geostatistical method, *Iranian Journal of Watershed Management Science and Engineering*, 14(51), 59-62. (In Persian).
- El Baba, M., Kayastha, P., Huysmans, M. & De Smedt, F. (2020). Evaluation of the groundwater quality using the water quality index and geostatistical analysis in the Dier al-Balah Governorate, Gaza Strip, Palestine. *Water*, 12(1), 262. <https://doi.org/10.3390/w12010262>
- Elamassi, K.S. (2012). Assessment of groundwater quality using multivariate and spatial analyses in Gaza governorate-Palestine. The Islamic University-Gaza., Faculty of Science, Master's Degree Program, Environmental science.
- Grzywna, A., & Bronowicka-Mielniczuk, U. (2020). Spatial and temporal variability of water quality in the Bystrzyca river basin, Poland. *Water*, 12(1), 190. (In Persian). <https://doi.org/10.3390/w12010190>
- Hirsch Robert, M., Slack James, R., & Smith Richard, A. (1982). Techniques of trend analysis for monthly water quality data. *Water Resources Research*, 18(1). <https://doi.org/10.1029/wr018i001p00107>
- Ibrahim, M.N. (2019). Assessing groundwater quality for drinking purpose in Jordan: Application of water quality

- index. *Journal of Ecological Engineering*, 20(3). <https://doi.org/10.12911/22998993/99740>
14. Kendall, M.G. (1975). Rank Correlation Measures, Charles Griffin Inc. London.
 15. Khosravi, H., Heydari, E., Zehtabian, G., & Bazrafshan, J. (2016). Analysis of spatial and temporal trends of groundwater index (GRI) (Case study: Yazd-Ardakan plain). 22(4), 711-720. (In Persian)
 16. Kravchenko, A., & Bullock, D.G. (1999). A comparative study of interpolation methods for mapping soil properties. *Agronomy Journal*, 91(3), 393-400. <https://doi.org/10.2134/agronj1999.00021962009100030007x>
 17. Kundzewicz, Z.W. (1997). Water resources for sustainable development. *Hydrological Sciences Journal*, 42(4), 467-480. <https://doi.org/10.1080/02626669709492047>
 18. Mann, H.B. (1945). Nonparametric tests against trend. *Econometrica*, 13, 245-259. <https://doi.org/10.2307/1907187>
 19. Nasser, M., Monem, M.J., Shahverdi, K., & Afsous, M. (2021). Zoning of Bamdej wetland water quality based on the spatio-temporal Kriging. *Wetland Ecobiology*, 12(2). (In Persian)
 20. Nouraki, A., & Hooshmand, A. (2021). Evaluation of trend and spatial distribution pattern of groundwater quality using water quality indices (Case study: Hamedan-Bahar plain). *Journal of Environmental Science and Technology*. (In Persian)
 21. Parsaie, F., Mahmoodi, M.A., & Egdernezhad, A. (2020). Assessment of groundwater quality for drinking and agriculture in Qorveh plain. *Wetland Ecobiology*, 12(1). (In Persian)
 22. Sabzevari, Y., & Zeinivand, H. (2020). Assessing the trend and quality classification of groundwater resources in Boroujerd – Dorod plain. *Wetland Ecobiology*, 12(3), 101-116. (In Persian)
 23. Sabzevari, Y., Nasrolahi, A., & Yonesi, H. (2020). Investigation of temporal-spatial variations of groundwater resources quality in Borujerd-Dorood Plain. *Irrigation and Water Engineering*, 11(1), 150-167. (In Persian)
 24. Sarvi Sadraabad, H., & Zare Chahouki, A. (2022). Study of the efficiency of groundwater quality index to evaluate the long-term effects of inter-basin water transfer using non-parametric methods and GIS (Case study Yazd-Ardakan aquifer). *Water and Soil*, 35(6), 804-791. (In Persian)
 25. Sen, Paranab Kumar. (1968). Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American Statistical Association*, 63, 1379-1389. <https://doi.org/10.1080/01621459.1968.10480934>
 26. Smiraglia, D.T., Ceccarelli, S., Bajocco, L., & Perini, L. (2016). Linking trajectories of land change, land degradation processes and ecosystem services. *Environmental Research*, 147, 590-600. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2015.11.030>
 27. Sun, X., Zhang, H., Zhong, M., Wang, Z., Liang, X., Huang, T., & Huang, H. (2019). Analyses on the temporal and spatial characteristics of water quality in a seagoing river using multivariate statistical techniques: A case study in the Duliujian River, China. *International Journal of Environment and Research Public Health*, 16, 1020. <https://doi.org/10.3390/ijerph16061020>
 28. Torabipoudeh, H., Yonesi, H., & Arshia, A. (2020). Evaluation of quality changes in the groundwater resources and IRWQIGC upstream of Zayandehrood Dam. *Desert Ecosystem Engineering Journal*, 24(2), 27-40. (In Persian). <https://doi.org/10.47176/jwss.24.2.41431>
 29. Wang, J., Xiao, W., Wang, H., Chai, Z., Niu, C., & Li, W. (2013). Integrated simulation and assessment of water quantity and quality for a river under changing environmental conditions. *Chinese Science Bulletin*, 58(27), 3340-3347. <https://doi.org/10.1007/s11434-012-5622-0>
 30. WHO, World Health Organization. (2004). Guidelines for drinking-water quality, 1, 3rdedn, recommendations.WHO, Geneva, Switzerland.
 31. WHO. (2017). *Guidelines for drinking-water quality: fourth edition incorporating the first addendum*. World Health Organization, Geneva.
 32. Zenebe, G.B., Hailu, G., & Girmay, A. (2025). Evaluation of geostatistical interpolation methods on spatial representation of groundwater depth and nitrate concentration of Elalla-Aynalem wellfield, Northern Ethiopia. *Discov Water*, 5, 9. <https://doi.org/10.1007/s43832-025-00189-y>