

Research Paper

Evaluation of Groundwater Quality using the GQI Index for Drinking Purposes

Mojtaba Khoshnavesh¹, Seyed Mohammad Reza Hosseini Vardanjani²,
Hajar Taheri Soudjani³ and Marzieh Ghahreman⁴

1- Associate professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran, (Corresponding author: m.khoshnavesh@sanru.ac.ir)

2- PhD student in Irrigation and Drainage, Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran

3- Ph.D of Irrigation and Drainage, Isfahan University of Technology, Water and Soil Expert of Jihad Keshavarzi in Chaharmahal and Bakhtiari Province, Shahrekord, Iran

4- M.Sc in Irrigation and Drainage, Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural, Shahrekord University, Shahrekord, Iran

Received: 15 October, 2023

Accepted: 26 February, 2024

Extended Abstract

Background: The use of groundwater for agricultural, industrial, and drinking purposes is significantly increasing worldwide. These resources are considered an important part of the renewable water ecosystem and have various advantages over surface waters, such as higher quality and less contamination. However, recent intermittent droughts and a noticeable decrease in surface water resources have led to the excessive use of groundwater sources and a decline in their quality. Therefore, understanding the quality of groundwater is crucial for proper planning and management of these resources and requires serious attention and detailed analysis. Additionally, one of the health problems in developing areas is the lack of access to safe drinking water, and human health is at the core of sustainable development in the region. Therefore, ensuring the welfare and health of the community at an acceptable level is not possible without access to clean and standardized drinking water. Water is important from both health and economic perspectives as it serves as a catalyst for industrial growth and the prosperity of the agricultural sector. In this regard, this research aims to evaluate and analyze the quality and spatial changes in groundwater quality based on the GQI assessment index.

Methods: This research focuses on evaluating and analyzing spatial changes in groundwater quality within the study areas of Khanmirza, Lordegan, Boroujen, Ardal, and Kiar, located in Chaharmahal and Bakhtiari province, for drinking purposes. Practical information is provided regarding the status of available water resources in the region for drinking purposes. To this aim, 28 groundwater samples were collected from legally operating wells in various locations within the mentioned counties during the 2020-2021 period and subjected to chemical analysis in the laboratory. The GQI (Groundwater Quality Index) was used to assess the quality of these samples for drinking purposes. In this study, the GQI was calculated based on the concentration values of 11 parameters, including electrical conductivity, acidity, total dissolved salts, calcium ion, sodium, magnesium, potassium, carbonate, bicarbonate, chloride, and sulfate. Subsequently, spatial zoning of the overall parameter values was performed using the chemical characteristics of the collected samples and employing the inverse distance weighting (IDW) interpolation method in the GIS software environment, and the desired information layers were obtained in raster format. Furthermore, overlays were performed by applying computational functions to the available information layers, followed by estimating the GQI values and preparing raster maps of the index. The output maps can be utilized not only to determine the qualitative characteristics within the study area but also to analyze the trends of their variations, prepare zoning maps for each parameter, and compare them with standard values.

Results: The calculated GQI using measured samples categorizes a significant portion of the study area within the excellent and good quality categories suitable for drinking. Additionally, the color spectrum of the zoning map indicates better water quality in the western and southern parts of the study area than in the other sections. Generally, water quality decreases from the south toward the north and northeast. The sensitivity analysis of the model focuses on examining the impact of changing one input variable on a model's output variable. The sensitivity analysis revealed that parameters such as acidity, calcium, magnesium, total dissolved salts, and electrical conductivity had a negative effect (meaning an increase in index values and water quality

improvement after removing these parameters and deterioration with their addition in the index calculation). Conversely, the concentrations of bicarbonate ions, sulfate, sodium, potassium, and chloride had a positive impact on water quality (meaning a decrease in index values and deterioration after removing these parameters and improvement with their addition in the index calculation). These parameters have allocated the highest to lowest changes in estimating the GQI index. Therefore, the GQI quality index shows greater sensitivity to the presence or absence of acidity and calcium bicarbonate than the other parameters used in determining the index, influencing decision-making regarding the classification of drinking water quality more than the other parameters. Despite having higher weights in calculating the index, some parameters show insignificant percentage changes in the index due to their presence or absence. For example, despite a lower weight of bicarbonate than magnesium ions, it shows a higher percentage change in the index after its removal than the percentage change caused by removing magnesium. Thus, higher weights for these components do not necessarily imply greater sensitivity of the model to them.

Conclusion: The results of this study indicate that the groundwater quality in the studied areas is suitable for drinking purposes, and the groundwater in the study area has not been affected by changes resulting from the tested parameters in the drinking sector. Additionally, this study contributes to comprehensive and useful planning for the management and conservation of groundwater resources, enabling more informed decision-making based on groundwater quality maps in this regard.

Keywords: Interpolation, Pollution, Sensitivity Analysis, Water Quality Index

How to Cite This Article: Khoshravesh, M., Hosseini Vardanjani, S. M. R., Taheri Soudjani, H., & Ghahreman, S. (2024). Evaluation of Groundwater Quality using the GQI Index for Drinking Purposes. *J Watershed Manage Res*, 15(2), 119-131. DOI: [10.61186/jwmr.15.2.119](https://doi.org/10.61186/jwmr.15.2.119)



مقاله پژوهشی

ارزیابی کیفیت آب های زیرزمینی با استفاده از شاخص GQI جهت مصارف شرب

مجتبی خوش‌روش^۱، سید محمدرضا حسینی وردجانی^۲، هاجر طاهری سودجانی^۳ و مرضیه قهرمان^۴

۱- دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران، (نویسنده مسؤول: m.khoshravesh@sanru.ac.ir)

۲- دانشجوی دکتری آبیاری و زهکشی، گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران

۳- دانش‌آموخته دکتری آبیاری و زهکشی، دانشگاه صنعتی اصفهان، کارشناس آب و خاک جهاد کشاورزی استان چهارمحال و بختیاری، شهرکرد، ایران

۴- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۲/۷

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۷/۲۳

صفحه: ۱۱۹ تا ۱۳۱

چکیده مبسوط

مقدمه و هدف: استفاده از آب های زیرزمینی برای اهداف کشاورزی، صنعت و شرب به طور قابل توجهی در سراسر جهان در حال افزایش است. این منابع به عنوان بخش مهمی از آب های تجدیدپذیر اکوسیستم به حساب می آیند و در مقایسه با آب های سطحی دارای مزیت های مختلفی مانند کیفیت بالاتر و آلودگی کمتر هستند. از طرفی خشکسالی های متناوب اخیر و کاهش چشمگیر منابع آب سطحی منجر به استفاده بیش از حد از منابع آب زیرزمینی و کاهش کیفیت آن ها شده است، بنابراین شناخت کیفیت آب زیرزمینی برای برنامه ریزی و مدیریت مناسب این منابع بسیار حائز اهمیت بوده و باید مورد توجه جدی و تجزیه و تحلیل دقیق قرار گیرد. همچنین باوجودی که یکی از مشکلات بهداشتی مناطق در حال توسعه عدم برخورداری از آب آشامیدنی سالم است و محور توسعه پایدار در منطقه در گرو سلامت انسان است لذا بدون بهره مندی از آب آشامیدنی سالم و استاندارد نمی توان رفاه و سلامت جامعه را در حد مطلوب تضمین نمود. آب از دو بعد بهداشتی و اقتصادی اهمیت دارد زیرا در بعد اقتصادی محرک چرخ صنعت و رونق بخش کسب و کار کشاورزی می باشد. در همین راستا هدف از این پژوهش ارزیابی کیفی و تحلیل تغییرات مکانی کیفیت آب زیرزمینی بر مبنای شاخص ارزیابی GQI است.

مواد و روش ها: این پژوهش به ارزیابی کیفی آب زیرزمینی در محدوده شهرستان های خانمیرزا، لردگان، بروجن، اردل و کیار از توابع استان چهارمحال و بختیاری جهت استفاده در مصارف شرب و تحلیل تغییرات مکانی آب زیرزمینی در محدوده مطالعاتی پرداخته و اطلاعات کاربردی از وضعیت منابع آب موجود منطقه در زمینه شرب ارائه می نماید. به همین منظور ۲۸ نمونه آب زیرزمینی از چاه های بهره برداری مجاز واقع در نقاط مختلف در شهرستان های ذکر شده در بازه زمانی ۱۴۰۰-۱۳۹۹ برداشت شد و در آزمایشگاه مورد آنالیز شیمیایی قرار گرفت. برای ارزیابی کیفی این نمونه ها جهت استفاده در مصارف شرب از شاخص GQI استفاده شد. در این پژوهش برای محاسبه شاخص کیفی GQI مقادیر غلظت ۱۱ پارامتر شامل پارامترهای هدایت الکتریکی، اسیدیته، مجموع نمک های محلول در آب، یون کلسیم، سدیم، منیزیم، پتاسیم، کربنات و بی کربنات، کلر و سولفات به کار برده شد. سپس با استفاده از مقادیر خصوصیات شیمیایی نمونه های برداشت شده و بهره مندی از روش درونیابی وزن دهی عکس فاصله در محیط نرم افزاری GIS، پهنه بندی مکانی مقادیر کلیه پارامترهای مورد مطالعه صورت گرفته و لایه های اطلاعاتی موردنظر به فرمت رستری به دست آمد. در ادامه با اعمال توابع محاسباتی بر لایه های اطلاعاتی موجود، همپوشانی انجام شد و در انتها مقادیر شاخص GQI برآورد و نقشه رستری شاخص تهیه گردید. با استفاده از نقشه های خروجی می توان علاوه بر تعیین مشخصه های کیفی مورد مطالعه در سطح محدوده، به بررسی روند تغییرات آنها نیز پرداخته و نقشه های پهنه بندی کیفی هریک را تهیه و با مقادیر استاندارد مقایسه نمود.

یافته ها: نتایج نشان داد که شاخص GQI محاسباتی با استفاده از نمونه های اندازه گیری شده، بخش وسیعی از وسعت منطقه مطالعاتی را در طبقه با کیفیت عالی و خوب قرار می دهد که برای مصرف شرب مناسب می باشد. همچنین طیف رنگی نقشه پهنه بندی نشانگر کیفیت بهتری از آب زیرزمینی منطقه غرب و جنوب منطقه مورد مطالعه نسبت به سایر بخش های آن می باشد. به طور کلی کیفیت آب شرب از جنوب به سمت شمال و شمال شرق کاهش می یابد. مقوله تحلیل حساسیت مدل به بررسی تأثیرپذیری یک متغیر خروجی ناشی از تغییر یک متغیر ورودی در آن مدل می پردازد. با بررسی آنالیز حساسیت صورت گرفته به ترتیب پارامترهای اسیدیته، کلسیم، منیزیم، کل نمک های محلول و هدایت الکتریکی با تأثیر منفی (به معنی تأثیر در افزایش مقادیر شاخص و افزایش کیفیت آب پس از حذف تک پارامتر و کاهش کیفیت آب با افزودن تک پارامتر در محاسبه مقدار شاخص) و غلظت یون های بی کربنات، سولفات، سدیم، پتاسیم و کلر موجود در آب با تأثیر مثبت در کیفیت آب (به معنی تأثیر در کاهش مقادیر شاخص و کاهش کیفیت آب پس از حذف تک پارامتر و افزایش کیفیت آب با افزودن تک پارامتر در محاسبه مقدار شاخص) به ترتیب بیشترین تا کمترین تغییرات را در برآورد شاخص GQI به خود اختصاص داده اند. بنابراین شاخص کیفی GQI نسبت به وجود یا عدم وجود اسیدیته و بی کربنات کلسیم حساسیت بیشتری داشته و تصمیم گیری در رابطه با رده بندی کیفی آب آشامیدنی را بیش از سایر پارامترهای مورد استفاده در تعیین شاخص، تحت تأثیر قرار می دهد. با توجه به مقادیری که در تغییرات شاخص رخ داده است، برخی پارامترهای مورد بررسی با وجودی که وزن بالاتری در محاسبه شاخص داشته اند ولی درصد تغییرات شاخص با وجود و یا عدم وجود آن پارامتر مقدار قابل توجهی را نشان نمی دهد. به عنوان نمونه بی کربنات که وزن پایین تری را نسبت به یون منیزیم دارا بوده ولی درصد تغییرات شاخص ناشی از حذف بی کربنات در مقایسه با درصد تغییرات شاخص ناشی از حذف منیزیم، مقدار بیشتری برآورد شده است. بنابراین دارا بودن وزن بالاتر مؤلفه ها حاکی از حساسیت بیشتر مدل نسبت به آن مؤلفه نخواهد بود.

نتیجه گیری: نتایج این پژوهش نشان می دهد که کیفیت آب زیرزمینی در مناطق مورد مطالعه برای استفاده در شرب مطلوب بوده و آب های زیرزمینی منطقه مورد مطالعه تحت تأثیر تغییرات ناشی از پارامترهای مورد آزمون در بخش شرب قرار نگرفته اند. همچنین این مطالعه به برنامه ریزی جامع و مفید در خصوص بهره برداری و نگهداری از منابع آب زیرزمینی، کمک نموده و باعث می گردد تا با دیدی روشن با توجه به نقشه های کیفیت آب زیرزمینی بتوان در این زمینه برنامه ریزی جامع و مفیدتری ارائه داد.

واژه های کلیدی: آلودگی، تحلیل حساسیت، درونیابی، شاخص کیفیت آب

مقدمه

که توزیع نابرابر آب در طول زمان و مکان، افزایش مصرف و آلودگی آب، استفاده نادرست و هدر رفت آن بحران آب را در نقاط مختلف جهان تشدید کرده است (Dev & Bali, 2019; Hagan et al., 2022; Kundzewicz, 1997). آب های

وابستگی به استفاده از آب های زیرزمینی برای اهداف کشاورزی، صنعتی و خانگی به طور قابل توجهی در سراسر جهان افزایش یافته است (Das et al., 2021). این در حالی است

کیفیت آب‌های زیرزمینی با استفاده از شاخص کیفیت آب‌های زیرزمینی GQI در محیط GIS در دشت جغتای، شمال شرق ایران پرداختند. نتایج محاسبه شاخص GQI نشان می‌دهد که کیفیت آب در بخش‌های شمالی دشت جغتای با توجه به طی مسافت و عبور از سازندهای مختلف دارای کیفیت پایین‌تری می‌باشد. اصغری مقدم و همکاران (Asghari Moghadam et al., 2015) به ارزیابی کیفیت منابع آب زیرزمینی دشت مهربان با استفاده از روش‌های GQI و FGQI (فازی- شاخص کیفی آب زیرزمینی) پرداختند. بدین منظور از ده پارامتر شیمیایی مؤثر (HCO_3^- , F^- , NO_3^- , Mg^{2+} , Na^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , TDS, Ca^{2+} و K^+) که فراوانی زیادی در آب زیرزمینی دارند، استفاده و با استانداردهای WHO (سازمان بهداشت جهانی) و ISIRI (تحقیقات صنعتی ایران) مقایسه شده است. نتایج نشان داد که بر اساس شاخص‌های GQI و FGQI آب‌های زیرزمینی منطقه مورد مطالعه از نظر کیفیت، بین رده‌های کاملاً نامطلوب تا مناسب قرار می‌گیرند. در تحقیقی در کشور ترکیه به بررسی تغییرات مکانی کیفیت آب زیرزمینی و وضعیت بالقوه خطر بهداشتی ناشی از آن، با تعیین شاخص کیفیت آب WQI و شاخص کیفیت آب کشاورزی IWQI برای آب آشامیدنی و آبیاری در دشت سوهورت پرداخته شد. در مجموع ۲۷ نمونه آب زیرزمینی از چاه‌ها در ماه می ۲۰۱۹ جمع‌آوری شد و نتایج تجزیه و تحلیل فیزیکوشیمیایی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که نمونه‌های آب زیرزمینی عموماً در کلاس آب‌های عالی و خوب قرار دارند و برای آبیاری کشاورزی و شرب مناسب هستند (Varol, Şener, & Şener, 2021). در پژوهشی در کشور هند و ایالت راجستان به بررسی شاخص‌های کیفی آب زیرزمینی جهت مصارف شرب پرداخته شد. برای محاسبه شاخص کیفیت آب ۱۵ نمونه آب جمع‌آوری و برای اجزای مختلف موجود در آب به دلیل آلودگی صنایع چاپ و رنگرزی اطراف مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتایج تحقیق نشان داد که ۴۰ درصد از نمونه‌های آب از نظر کیفیت برای مصارف آشامیدنی عالی، ۲۰ درصد از نمونه‌ها خوب و ۴۰ درصد از نمونه‌های آب باقیمانده به دلیل مقدار بیش از حد آلاینده موجود در آب زیرزمینی، برای مصارف آشامیدنی و کشاورزی بسیار مضر تشخیص داده شد (Shahnawaz, Kirpalni, & Iqbal, 2021). در تحقیقی در کشور هند و در منطقه هیمایا شرقی به ارزیابی WQI پرداخته شد. نتایج نشان داد که بر طبق شاخص فوق اکثر نمونه‌های مورد بررسی در طبقه عالی و خوب قرار داشتند (Dutta et al., 2022). در پژوهشی در کشور غنا به ارزیابی کیفیت آب‌های زیرزمینی در حومه شهری آکرا برای اهداف شرب و آبیاری پرداخته شد. ۳۶ نمونه در منطقه مورد مطالعه از نظر مناسب بودن آنها برای اهداف خانگی و آبیاری براساس پارامترهای فیزیکوشیمیایی مربوطه مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. علاوه بر این، شاخص WQI، نسبت جذب سدیم و نمودارهای آماری مربوطه برای ارزیابی کیفیت و مناسب بودن آب زیرزمینی برای مصارف خانگی و آبیاری مورد استفاده قرار گرفت. نتایج نشان داد که تقریباً تمام پارامترهای اندازه‌گیری شده در محدوده توصیه شده WHO برای آب آشامیدنی برای اکثر نمونه‌ها قرار دارند. در این طبقه‌بندی ۹۲

زیرزمینی به‌عنوان بخش مهمی از آب‌های تجدیدپذیر اکوسیستم به‌حساب می‌آیند و در مقایسه با آب‌های سطحی دارای مزیت‌های مختلفی مانند کیفیت بالاتر و آلودگی کمتر هستند. در اغلب موارد آب‌های زیرزمینی در مناطق خشک و نیمه‌خشک که آب‌های سطحی خیلی کم می‌باشند، قابل‌دسترس هستند (Nas & Berkay, 2010; Shabbir & Ahmad, 2015). منابع آب زیرزمینی به‌طور متناوب برای اقدامات مختلف از جمله فعالیت‌های کشاورزی، صنعتی و خانگی استفاده می‌شود. با این حال افزایش تقاضای جهانی برای آب منجر به بهره‌برداری بیش از حد از آب‌های زیرزمینی و کاهش کیفیت این منابع شده است (Nordin et al., 2021). بنابراین پایش کیفیت آب‌های زیرزمینی از نظر عوامل محیطی و اقتصادی بسیار مهم است (Das, & Panda, 2022). عدم آگاهی از وضعیت کیفیت آب‌های زیرزمینی می‌تواند مشکلاتی را برای مدیریت منابع آب از نظر وضعیت بهداشتی و سلامت مردم و همچنین توسعه‌های مورد نیاز در هر منطقه ایجاد نماید. لذا آگاهی از وضعیت کیفیت آب‌های زیرزمینی، تغییرات و کنترل آن یکی از نیازهای اساسی مدیریتی می‌باشد. از جمله شاخص‌هایی که برای بررسی کیفیت آب‌های زیرزمینی مورد استفاده قرار می‌گیرد می‌توان به شاخص کیفی منابع آب (WQI)^۱ و شاخص کیفیت آب زیرزمینی (GQI)^۲ اشاره نمود. در خصوص بررسی کیفی منابع آبی جهت مصارف مختلف در کشور و جهان بر اساس شاخص فوق مطالعات مختلفی صورت گرفته است. در تحقیقی در کشور پاکستان به ارزیابی اثرات آلودگی کوره‌های آجرپزی بر کیفیت آب‌های زیرزمینی سه منطقه بلوچستان پرداخته شد. کیفیت آب زیرزمینی از طریق ۲۲ پارامتر فیزیکی و شیمیایی با استفاده از پروتکل‌های استاندارد ارزیابی شد. شاخص کیفیت آب زیرزمینی (WQI) محاسبه شده نشان داد که آب منطقه مورد مطالعه کیفیت پایینی برای مصارف آشامیدنی دارد. علاوه بر این، آب‌های زیرزمینی منطقه مورد مطالعه تنها از نظر نسبت جذب سدیم و شاخص نفوذپذیری برای هدف آبیاری مناسب تشخیص داده شد (Khalid, 2019). در پژوهشی در جنوب هند به ارزیابی کیفیت آب زیرزمینی با استفاده از شاخص WQI جهت مصارف شرب پرداخته شد. در این مطالعه ۶۱ نمونه آب زیرزمینی جمع‌آوری و مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که حدود ۸۶ درصد از نمونه‌های آب زیرزمینی برای مصارف شرب کیفیت پایینی داشتند (Adimalla & Qian, 2019). افضلی و شاهدی (۲۰۱۵) به بررسی روند تغییرات کمی و کیفی آب زیرزمینی دشت آمل- بابل پرداختند. آنها به بررسی تغییرات کمی آب زیرزمینی در سال‌های ۱۳۷۷، ۱۳۸۱ و ۱۳۸۶ و تغییرات عوامل کیفی شامل EC، CL، HCO_3^- ، Mg ، Na ، SO_4 ، T.D.S، TH و pH در ابتدا و انتهای دوره مذکور در محیط Arc GIS در بخشی از دشت آمل- بابل واقع در حوزه آبخیز دریای خزر پرداخته و روند تغییرات هرکدام از عوامل کیفی با استفاده از آزمون من-کندال تعیین نمودند. نتایج نشان داد که کاهش ناچیز سطح آب زیرزمینی و بهبود وضعیت کیفی آب زیرزمینی در منطقه یاد شده می‌باشد (Afzali and Shahedi, 2015). جغتایی و همکاران (Joghatayi et al., 2015) به بررسی

با توجه به کاهش بارندگی‌ها و خشکسالی‌های متناوب و افت شدید سفره آب زیرزمینی در سال‌های گذشته در دشت‌های کیار، خانمیرزا، لردگان، بروجن و اردل از توابع استان چهارمحال و بختیاری، پژوهشی با هدف ارزیابی کیفی و تحلیل تغییرات مکانی آب زیرزمینی در دشت‌های فوق‌الذکر بر مبنای شاخص GQI ضروری است تا بتوان اطلاعات کاربردی از وضعیت کیفی این منابع در زمینه شرب ارائه داد.

مواد و روش‌ها

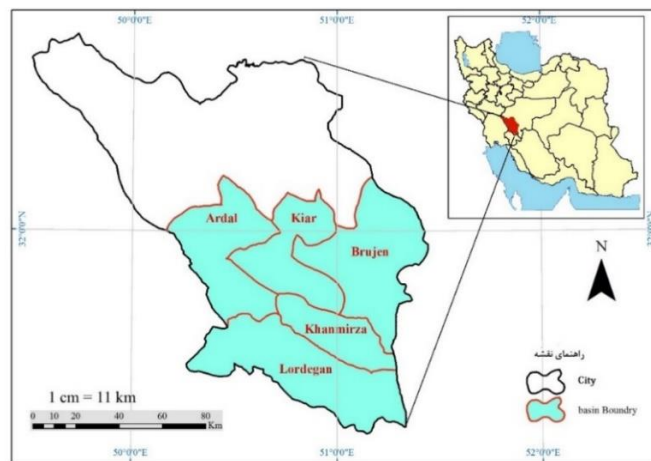
استان چهارمحال و بختیاری با مساحت 16532 km^2 بین 31° و 29° تا 33° و $48'$ عرض شمالی و نیز 49° و $28'$ تا 51° و $25'$ طول شرقی قرار دارد. این استان منطقه‌ای کوهستانی در امتداد سلسله جبال زاگرس است که از شمال غربی به‌طرف جنوب شرقی امتداد دارد. وجود تنوع ناهمواری از یک سو و قرارگیری این استان بر سر راه توده هوای غربی زمستانه از سوی دیگر سبب ایجاد خرداقلیم‌های متمایزی در استان گردیده است. محدوده مطالعاتی در این پژوهش شهرستان‌های خانمیرزا، لردگان، بروجن، اردل و کیار می‌باشند که موقعیت آن‌ها در شکل (۱) نشان داده شده است. اقلیم منطقه مورد مطالعه بر مبنای روش آمبرژه از خشک سرد در شهرستان‌های بروجن تا اقلیم مرطوب در شهرستان‌های لردگان و خانمیرزا متغیر است. میانگین ده‌ساله و سی‌ساله دما در این استان برابر با $11/71$ و $10/85$ سانتی‌گراد است.

نمودار روند بارندگی سالیانه استان در شکل (۲) نشان داده شده است. به دلیل محدودیت عمق آبرفت، ذخیره دشت‌های استان محدود است و برداشت‌های بی‌رویه که نتیجه عدم رعایت و شناخت بیلان دشت بوده باعث افت شدید سطح آب در این دشت‌ها شده و علاوه بر کمیت، بر کیفیت آن نیز اثر گذاشته است. از طرفی خشکسالی‌های متناوب اخیر و کاهش بارندگی و نزولات جوی نیز بر افت چشمگیر سطح آب زیرزمینی اثرگذار می‌باشد (Anonymous, 2021). لذا ضرورت دارد با اعمال مدیریت صحیح در این مناطق نسبت به بازگشت وضعیت دشت‌ها به حالت نرمال اقدام گردد (به سایت سازمان هواشناسی استان چهارمحال و بختیاری رجوع گردد (Anonymous, 2023).

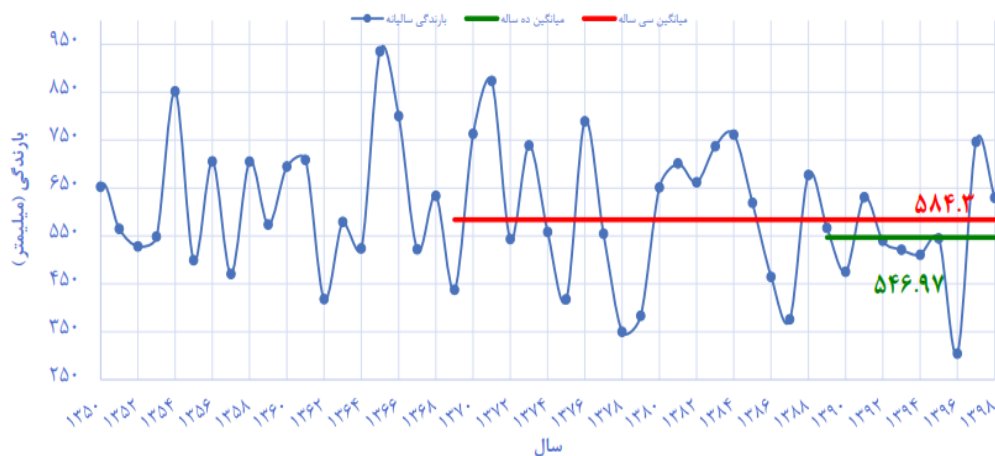
در حال حاضر چاه‌های انتخابی برای نمونه‌برداری، کاربری کشاورزی داشته و با توجه به کمبود منابع آب، قابلیت نمونه‌های موجود نسبت به پارامترهای اندازه‌گیری شده برای مصارف شرب مورد بررسی قرار گرفت.

در این پژوهش جهت بررسی تغییرات آب زیرزمینی و ارزیابی تناسب آن برای مصارف کشاورزی، شرب و صنعت از ۲۸ حلقه چاه منتخب در شهرستان‌های خانمیرزا، لردگان، بروجن، اردل و کیار در بازه‌ی زمانی ۲۰۲۰-۲۰۲۱ نمونه‌برداری شد.

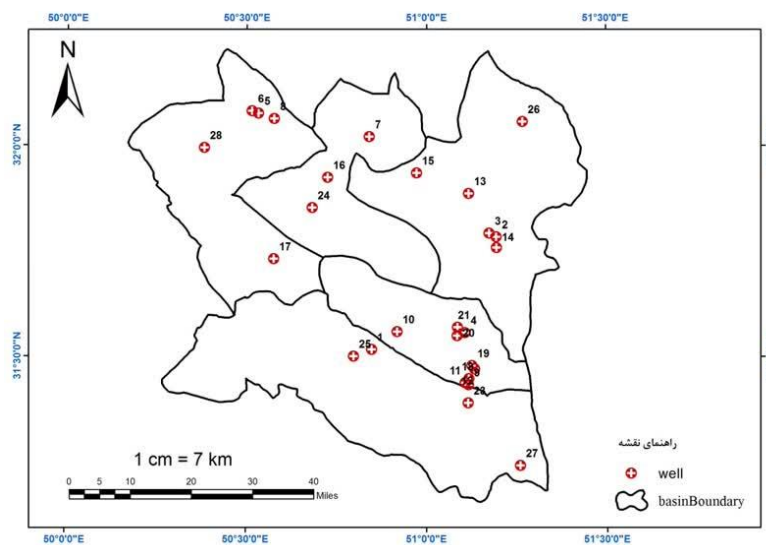
درصد نمونه‌های آب در طبقه کیفیت خوب یا عالی برای مصارف خانگی با استفاده از شاخص WQI قرار گرفتند (Hagan et al., 2022). سروی صدرآباد و زارع چاهوکی به بررسی کارایی شاخص کیفیت آب زیرزمینی (GQI) به منظور ارزیابی بلندمدت تأثیرات انتقال آب بین حوضه‌ای با کمک روش‌های ناپارامتری و GIS در آبخوان یزد- اردکان پرداختند. نتایج نشان داد که کیفیت کلی آبخوان یزد- اردکان، حتی با توجه به افت نسبتاً زیاد آب زیرزمینی، در ابتدا و انتهای دوره زمانی مورد بررسی در رده‌ی متوسط ($60-80$) و قابل قبول قرار دارد و کاهش کیفیت در این دوره بسیار کم و قابل چشم‌پوشی است (Sarvi Sadrabad and Zare Chahouki, 2022). در تحقیقی به ارزیابی کیفیت آب زیرزمینی با استفاده از شاخص کیفیت آب زیرزمینی GWQI و شاخص آلودگی آب زیرزمینی وزنی آنژیروپی EGPI و تجزیه و تحلیل جغرافیایی برای منطقه ساحلی در گجرات هند برای مصارف شرب پرداختند. تجزیه و تحلیل شیمیایی ۵۷ نمونه آب زیرزمینی برای بررسی شاخص‌های مهم کیفیت آب آشامیدنی انجام شد. علاوه بر این، نقشه‌های فضایی با استفاده از تحلیل‌های مکانی مختلف برای نشان دادن توزیع جغرافیایی کیفیت آب زیرزمینی قابل شرب و مناطق آلودگی آب‌های زیرزمینی با توجه به GWQI و EGPI محاسبه شده تهیه گردید. نتایج نشان داد که $26/32$ درصد نمونه‌ها بر طبق شاخص GWQI بیش از ۳۰۰ بود که نشان می‌دهد کیفیت آب زیرزمینی به عنوان آب آشامیدنی قابل قبول نیست (Bhavsar & Patel, 2023). در تحقیقی در کشور بنگلادش به ارزیابی کیفیت آب آشامیدنی براساس مقادیر شاخص شامل دستورالعمل‌های WHO و استانداردهای این کشور پرداخته شد. ۵۰ نمونه شامل چند نمونه آب زیرزمینی جمع‌آوری شد. شاخص کیفیت آب (WQI)، برای دسته‌بندی کیفیت آب‌های زیرزمینی بر اساس دستورالعمل‌های سازمان بهداشت جهانی (WHO) و استانداردهای بنگلادش (BD) استفاده شد. بر اساس مقادیر WQI، نمونه‌های آب به دسته‌های عالی، خوب، ضعیف، بسیار ضعیف و نامناسب تقسیم شدند که از استانداردهای BD تا دستورالعمل‌های WHO برای اهداف آشامیدنی متفاوت بودند. 14% ، 54% ، 26% و 6% از نمونه‌ها به ترتیب در دسته‌های عالی، خوب، ضعیف و دسته‌های پایین‌تر به عنوان استانداردهای BD قرار گرفتند (Rahman et al., 2023). محمدی و حسن زاده به بررسی تغییرات مکانی و زمانی شاخص کیفیت و کمیت آب زیرزمینی دشت بم-نرماشیر با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی و زمین آمار پرداختند. نتایج نشان داد که در بخش بسیار کوچکی از جنوب دشت کیفیت آب زیرزمینی جهت مصارف شرب خوب و به جز این بخش در سایر نقاط دشت کیفیت آب زیرزمینی جهت مصارف شرب مناسب نمی‌باشد (Mohamadi and Hassanzadeh, 2023).



شکل ۱- منطقه مورد مطالعه
Figure 1. Study area



شکل ۲- روند بارندگی سالیانه استان
Figure 2. Annual rainfall trend of the province



شکل ۳- توزیع چاه‌های مورد بررسی در منطقه مورد مطالعه
Figure 3. Distribution of investigated wells in the studied area

پراکنش چاه‌های نمونه‌برداری شده در محدوده مورد مطالعه در شکل (۳) نشان داده شده است. نمونه‌های برداشت شده تحویل آزمایشگاه گردید و مورد آنالیز و ارزیابی قرار گرفت. در

جدول ۱- مشخصه‌های آماری مؤلفه‌های مختلف شیمیایی

Table 1. Statistical characteristics of different chemical components

SO ₄	Cl	CO ₃	HCO ₃	K	Na	Mg	Ca	pH	TDS	EC	نمونه Parameter
ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	-	ppm	μ mho/cm	واحد unit
28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	تعداد نمونه The number of samples
3.3	53.07	3.93	289.3	2.18	14.55	21.94	78.51	7.74	429.31	606.18	میانگین حسابی Arithmetic mean
5.35	29.33	5.13	137.1	1.79	9.21	11.13	34.11	0.35	238.99	290.91	انحراف معیار Standard deviation
162.12	55.27	130.5	47.41	82.11	63.3	50.73	43.45	4.52	55.67	47.99	ضریب تغییرات (درصد) Coefficient of Variation (percentage)
29.28	116.4	15.6	744.8	7.02	35.28	60.72	188	8.79	1225.7	1577	ماکزیمم Maximum
0.05	14.56	0	122.6	0.39	0.23	7.08	38.6	7.15	167.28	264	مینیمم Minimum
3.84	45.8	0	236.7	0.78	20.93	19.8	98.6	7.82	514.31	732	مد Mode
2.16	42.78	0.315	252.8	1.56	14.84	19.92	66.8	7.805	390.62	553.5	میان The middle
29.23	101.9	15.6	622.2	6.63	35.05	53.64	149.4	1.64	1058.4	1313	دامنه تغییرات Range of changes
4.51	1.08	1.08	2	1.5	0.3	1.73	1.86	0.61	1.98	1.85	چولگی Skewness
28.64	860.2	26.29	18809	3.22	84.77	123.9	1163.6	0.12	57115	84630	کشیدگی Variance

گام سوم، تهیه نقشه‌های رتبه از نقشه‌های نرمال شده با استفاده از رابطه (۲) است.

$$R = 0.5k^2 + 4.5k + 5 \quad (2)$$

هر پیکسل در نقشه رتبه مقداری بین ۱ تا ۱۰ دارد. کمترین مقدار هر پیکسل در نقشه نرمال که ۱- است، معادل ۱ در نقشه رتبه و بیشترین مقدار هر پیکسل در نقشه نرمال که ۱۰ + است، معادل ۱۰ در نقشه رتبه است. سپس، میانگین هر مؤلفه از نقشه رتبه آن استخراج و به‌عنوان وزن آن مؤلفه در گام بعدی مورد استفاده قرار گرفت.

گام چهارم، محاسبه شاخص کیفی و تهیه نقشه نهایی با استفاده از رابطه (۳) است:

$$GQI = 100 - \frac{W_1R_1 + W_2R_2 + \dots + W_nR_n}{n} \quad (3)$$

که در این رابطه W_n وزن نسبی هر مؤلفه، R_n رتبه هر مؤلفه و n تعداد مؤلفه‌های کیفی به‌کار رفته است. مقدار عددی پیکسل‌های نقشه نهایی شاخص کیفی بین صفر تا ۹۹ قرار می‌گیرد. بابیکر در سال ۲۰۰۷ شاخص کیفی GQI را در پنج کلاس مطابق با جدول (۲) طبقه‌بندی نمود (Abbasi et al., 2019; Babiker, Mohamed, & Hiyama, 2007).

برای ارزیابی منابع آبی جهت استفاده در شرب از شاخص GQI (Ground Water Quality Index) استفاده گردید. برای محاسبه این شاخص گام اول تهیه نقشه‌های رستری غلظت هریک از پارامترهای موردبررسی شامل پارامترهای هدایت الکتریکی، اسیدیته، مجموع نمک‌های محلول در آب، یون کلسیم، سدیم، منیزیم، پتاسیم، کربنات و بی‌کربنات، کلر و سولفات با استفاده از روش درون‌یابی وزن‌دهی عکس فاصله در محیط سامانه اطلاعات جغرافیایی است. در گام دوم برای این‌که داده‌های متفاوت دارای مقیاس و معیار مشترک شوند، غلظت‌های هر پیکسل از نقشه‌های رستری مرحله قبل با مقدار استاندارد مربوطه آن پارامتر با استفاده از رابطه (۱) ارتباط برقرار کرده و نقشه‌های نرمال تهیه شد.

$$K = \frac{k - k_{WHO}}{k + k_{WHO}} \quad (1)$$

K مقدار هر پیکسل برای نقشه نرمال هر مؤلفه، k مقدار هر پیکسل در نقشه اولیه هر مؤلفه k_{WHO} ، بیشترین حد استاندارد سازمان بهداشت جهانی در سال ۲۰۱۷ برای هر مؤلفه است (Organization, 2017). در نقشه‌های حاصل، مقدار هر پیکسل بین ۱- و ۱+ قرار می‌گیرد.

جدول ۲- طبقه‌بندی شاخص GQI

Table 2. Classification of GQI index

(90-100)	(70-90)	(50-70)	(25-50)	(0-25)	دامنه range
مناسب Suitable	قابل قبول acceptable	متوسط medium	نامناسب Unsuitable	نامطلوب unfavorable	وضعیت شاخص Indicator status

تحلیل حساسیت شاخص GQI

آنالیز حساسیت به معنی مشخص کردن حساسیت مدل نسبت به پارامترهای مختلف آن است. در واقع آنالیز حساسیت شیوه بررسی تغییرات در یک مدل ریاضی است که با استفاده از آن بررسی می‌شود که در جواب‌های به‌دست آمده چه تغییری رخ خواهد داد. برای تحلیل حساسیت شاخص فوق به‌روش زیر عمل شد.

نقشه پهنه‌بندی شاخص به دفعات ۱۰ مرتبه، هربار با حذف یکی از نقشه‌های رتبه مربوط به یک مؤلفه، تهیه و اثر حذف هر مؤلفه با نقشه شاخص کلی از رابطه (۴) بررسی شد.

$$V_{wi} = \frac{100 * (GQI - GQI_{wi})}{GQI} \quad (4)$$

که در این رابطه: V_{wi} شاخص تغییر بدون نقشه نام، GQI_{wi} نقشه شاخص کیفیت آب بدون نقشه نام و GQI شاخص کیفیت آب با حضور همه مؤلفه‌های کیفی است (Babiker, Mohamed, & Hiyama, 2007).

تهیه نقشه پراکندگی مکانی مقادیر شاخص

برای تهیه نقشه ارزیابی کیفیت آب زیرزمینی منطقه، ابتدا پلیگون محدوده مطالعاتی در محیط نرم‌افزاری ArcGIS 10.5 فراخوانی شده و موقعیت ۲۸ حلقه چاهی که نمونه‌برداری از آن منابع صورت گرفته بود به‌صورت لایه‌های وکتوری از نوع نقطه‌ای روی نقشه جانمایی و لایه‌های اطلاعاتی تک تک پارامترهای اندازه‌گیری شده با استفاده از روش وزن‌دهی عکس فاصله (IDW) به‌شکل نقشه رستری ترسیم شدند. سپس با استفاده از توابع عملیاتی موجود در محیط نرم‌افزار و بهره‌گیری از معادله (۳) پهنه‌بندی تغییرات مکانی شاخص GQI در محدوده مورد مطالعه انجام شد. خروجی این عملیات به‌شکل لایه رستری و طیف رنگی با مقادیر عددی از صفر تا ۱۰۰ متغیر خواهد بود.

نتایج به‌دست آمده از تحقیقات گذشته کارایی روش وزن‌دهی عکس فاصله را در مسائل آب زیرزمینی مطلوب ارزیابی نموده است. در تحقیقی در کشور چین به ارزیابی روش‌های درون‌یابی برای تغییرات عمق سفره‌های آب زیرزمینی پرداخته شد. نتایج نشان داد که روش وزن‌دهی عکس فاصله دقیق‌تر بود (Sun et al., 2009). در تحقیقی در کشور هند به تجزیه و تحلیل فضایی نقشه‌برداری کیفیت آب زیرزمینی در ناحیه سنگ سخت در نواحی آکولا و بولدانا در ماهاراشترا پرداخته شد. نتایج حاکی از عملکرد مطلوب روش وزن‌دهی عکس فاصله بود (Pande & Moharir, 2018). لذا در این تحقیق هم با توجه به تحقیقات صورت گرفته وزن‌دهی عکس فاصله مورد استفاده قرار گرفت.

روش وزن‌دهی عکس فاصله (IDW)

این روش درون‌یابی یکی از معمول‌ترین روش‌های درون‌یابی نقاط پراکنده در فضا است که اساس آن بر مبنای این فرضیه است که در یک سطح درون‌یابی، اثر یک پارامتر بر نقاط اطراف یکسان نبوده و نقاط نزدیک بیشتر و نقاط دور کمتر تحت تأثیر هستند و هرچه فاصله از مبدأ افزایش یابد اثر پارامتر

کمتر می‌شود. در واقع در این روش برای هریک از نقاط اندازه‌گیری وزنی براساس فاصله بین آن نقطه تا موقعیت نقطه مجهول در نظر می‌گیرند. سپس این وزن‌ها توسط توان وزن‌دهی کنترل می‌شود. به‌طوریکه توان‌های بزرگتر اثر نقاط دورتر از نقطه مورد برآورد را کاهش داده و توان‌های کوچکتر وزن‌ها را به‌طور یکنواخت‌تری بین نقاط همجوار توزیع می‌کنند. البته باید توجه داشت که این روش بدون توجه به موقعیت و آرایش نقاط، فقط فاصله آن‌ها را در نظر می‌گیرد، یعنی نقاطی که دارای فاصله یکسانی از نقطه برآورد هستند دارای وزن یکسانی می‌باشند. نتایج این روش از رابطه (۵) تخمین زده می‌شود:

$$Z(X_i) = \frac{\sum_{i=1}^n X_i \frac{1Z(X_i)}{d_i^q}}{\sum_{i=1}^n X_i \frac{1Z}{d_i^q}} \quad (5)$$

که در این رابطه d_i فاصله بین نقطه تخمین تا هریک از نمونه‌های واقع در همسایگی آن، $Z(X_i)$ مقدار تخمین خاصیت موردنظر در نقطه X_i ، $Z(X_i)$ مقدار مشاهده شده خاصیت مورد نظر در X_i و α توان عکس فاصله است (Isaaks & Srivastava, 1989).

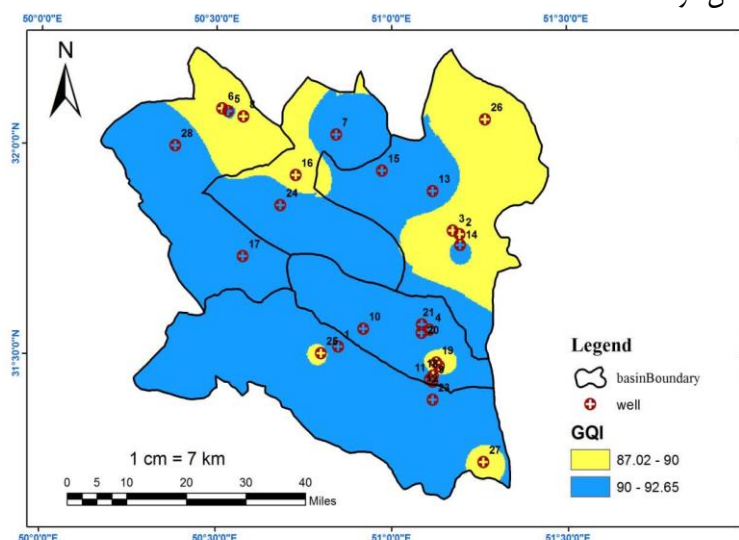
نتایج و بحث

مطالعات متعددی در رابطه با استفاده از شاخص همپوشانی GQI در بررسی کیفیت آب‌های زیرزمینی وجود دارد (Asghari Moghadam et al., 2015; Abbasi et al., 2019). با توجه به اینکه این روش از مشخصه‌های مختلفی همانند اسیدیته آب زیرزمینی، هدایت الکتریکی، میزان یون‌های محلول در آبخوان از قبیل کلسیم، منیزیم، سدیم، کلر، پتاسیم، کربنات و بی‌کربنات، سولفات و مجموع نمک‌های محلول در آب آبخوان بهره‌گیری می‌کند، گزینش وزن‌ها و نسبت‌های مناسب از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این پژوهش برای تحلیل و ارزیابی کیفی منابع آب مورد بررسی برای مصارف شرب از پهنه‌بندی شاخص GQI در محیط نرم‌افزار سامانه داده‌های جغرافیایی GIS 10.5 بهره‌گیری شد. شکل (۵) نقشه پهنه‌بندی کیفی آب زیرزمینی محدوده مطالعاتی بر مبنای شاخص GQI محاسبه شده با استفاده از کلیه پارامترهای ۱۱ گانه ارائه شده در جدول (۱) می‌باشد.

نتایج محاسبه شاخص GQI نشان داد که دامنه این شاخص از ۸۷ تا ۹۲ در محدوده مطالعاتی متغیر است. با توجه به طبقه‌بندی بایبکر نمونه‌های مورد بررسی برای استفاده جهت مصارف شرب در طبقه قابل قبول می‌باشد. براساس نقشه پهنه‌بندی شاخص GQI (شکل ۵) اکثر نمونه‌ها در طبقه کیفیت قابل قبول برای مصارف شرب قرار می‌گیرند. طبق نقشه فوق بخش اعظمی از سطح منطقه مورد مطالعه در محدوده شاخص ۹۰ تا ۹۲ و بخش اندکی از شرق و شمال غربی سطح مورد مطالعه کمتر از ۹۰ می‌باشد. این امر نشان‌دهنده آن است که کیفیت آب زیرزمینی برای استفاده در شرب مطلوب بوده و آب‌های زیرزمینی منطقه مورد مطالعه تحت تأثیر تغییرات ناشی از پارامترهای مورد آزمون در بخش شرب قرار نگرفته‌اند. با

به‌طور کلی نقشه GQI نشان داد که کیفیت آب شرب از جنوب به‌سمت شمال و شمال شرق کاهش می‌یابد؛ علت این امر را می‌توان به‌وجود مراکز صنعتی و تأثیر آن‌ها بر کیفیت آب‌های زیرزمینی، به‌ویژه در شهرستان بروجن نسبت داد.

توجه به شکل، منطقه غرب و جنوب منطقه مورد مطالعه دارای کیفیت بهتری از آب زیرزمینی می‌باشد. برای بررسی چگونگی و دلیل تغییرات مکانی کیفیت آب زیرزمینی می‌توان اطلاعات نقشه پهنه‌بندی را با اطلاعات زمین‌شناسی، کاربری اراضی و عمق سطح ایستابی ارتباط داد، تا عوامل کنترل‌کننده تغییرات کیفی آب زیرزمینی مشخص گردند.



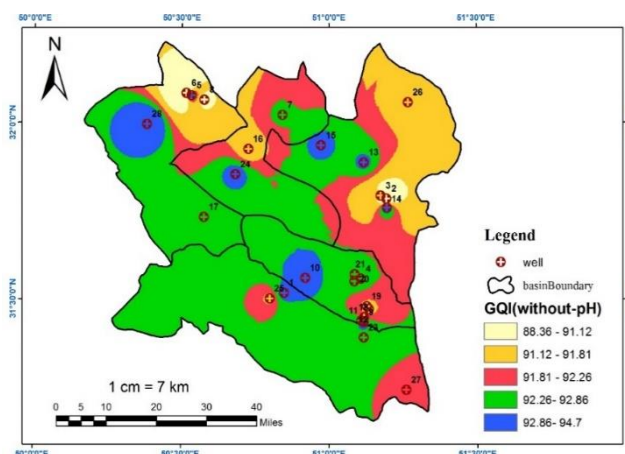
شکل ۵- پهنه‌بندی شاخص کیفی GQI
Figure 5. GQI quality index distribution

حذف هر مؤلفه با نقشه کلی شاخص مقایسه و نتایج آن در جدول (۳) ارائه شد.

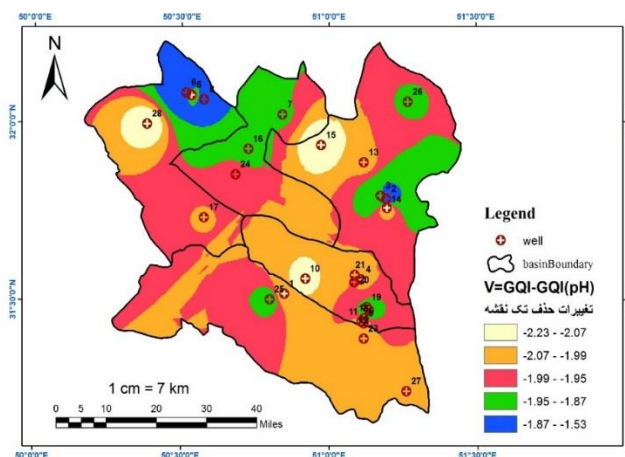
در ادامه به تحلیل حساسیت شاخص فوق پرداخته شد. برای این‌منظور نقشه شاخص به دفعات ۱۰ مرتبه و هر بار با حذف یکی از نقشه‌های رتبه مربوط به یک مؤلفه، تهیه شده و اثر

جدول ۳- ویژگی‌های آماری شاخص تغییر با حذف تک نقشه (درصد)

Table 3. Statistical characteristics of the change index by removing a single map (percentage)					حذف تک نقشه مربوط به وزن اعمال شده در محاسبه شاخص	پارامتر
انحراف معیار تغییرات شاخص	میانگین تغییرات شاخص درصد	درصد حداکثر تغییرات شاخص	درصد حداقل تغییرات شاخص	درصد حداقل تغییرات شاخص	The weight applied in Delete a single map calculating the index related to the parameter	
Standard deviation of index changes	Average percentage of index changes	Percentage of maximum index changes	Percentage of minimum index changes	Percentage of minimum index changes		
0.059	-1.983	-1.537	-2.238	5.07		pH
0.049	-0.016	0.205	-0.371	3.11		EC
0.109	0.600	0.854	0.015	2.16		K
0.100	-0.116	0.174	-0.615	3.24		Mg
0.063	1.035	1.498	0.75	1.06		HCO ₃
0.072	-0.078	0.228	-0.564	3.19		TDS
0.061	0.901	1.314	0.673	1.49		Na
0.149	-1.922	-1.292	-2.84	5.02		Ca
0.050	0.552	0.748	0.327	2.25		Cl
0.064	1.027	1.502	0.745	1.09		SO ₄



شکل ۶- (الف) نقشه مقادیر شاخص کیفی GQI با حذف تک نقشه pH
Figure 6. (A) GQI qualitative index by removing one pH



شکل ۶- (ب) نقشه اختلاف مقادیر شاخص کیفی GQI با و بدون حذف تک نقشه pH
Figure 6. (B) changes GQI qualitative index by removing one pH map

از حذف این دو پارامتر ۰/۰۱۶ و ۰/۰۷۸ و تأثیرشان در برآورد شاخص کیفی به صورت کاهنده بوده است.

مشخصه سولفات، سدیم و بی‌کربنات نسبت به سایر مشخصه‌ها با وزن نظری کمتری (وزن تعریف شده در شاخص) در تعیین شاخص مؤثر بوده‌اند.

تحلیل حساسیت به روش حذف تک نقشه‌ها نشان داد که میانگین تغییرات شاخص GQI در آبخوان به ترتیب نسبت به اسیدیت، کلسیم، بی‌کربنات، سولفات، سدیم، پتاسیم، کلر، منیزیم، نمک‌های محلول و هدایت الکتریکی حساس است و این مؤلفه‌ها به ترتیب اولویت بایستی با دقت و تکرار بیشتری اندازه‌گیری شوند. در جدول (۳) و مطابق با شکل (۶) مشاهده می‌شود که مؤلفه اسیدیت همان گونه که بیشترین وزن را در محاسبه شاخص فوق‌الذکر به خود اختصاص داده است، به نسبت بیشترین تأثیر (منفی) را نیز با مقدار تغییرات ۱/۹۸۳- درصد بر کاهش شاخص دارا بوده است.

در مقایسه مقادیر کمینه و بیشینه برآورد شده مطابق شکل‌های ۵ و ۶ با حذف تک نقشه پهنه‌بندی pH از محاسبه شاخص GQI، مقادیر شاخص از بازه ۸۷/۰۲ تا ۸۸/۳۶ به ۸۸/۳۶ تا ۹۴/۷ افزایش یافته است. پس افزودن مؤلفه pH به

بررسی انجام شده تأثیر وزن‌های داده شده به مشخصه‌ها را به صورت تحلیل حساسیت تک نقشه‌ای ارزیابی می‌کند. براساس جدول شماره ۳ (در بخش مربوط به درصد تغییرات شاخص) تحلیل حساسیت با روش حذف تک نقشه نشان داد که همه مشخصه‌های شاخص GQI در ارزیابی کیفی آب اهمیت داشته و درصد تغییرات نقشه‌های ثانویه پس از حذف تک پارامترها بسیار ارقام کوچکی را نزدیک به صفر نشان می‌دهد. بنابراین می‌توان گفت که همه پارامترها از حساسیت بسیار نزدیکی نسبت به حذف برخوردار بوده و نمی‌توان از هیچ کدام صرف‌نظر نمود.

نتایج در منطقه مورد بررسی نشان داد که کل نمک‌های محلول در آب و همچنین هدایت الکتریکی آب با آن که یکی از مهم‌ترین مشخصه‌ها در برآورد میزان شاخص و با وزن بالا بوده‌اند ولی میانگین تغییرات شاخص با و بدون حذف نقشه‌های مربوط به این دو مشخصه، حداقل میزان خود را داشته است. وزن این دو پارامتر در جدول ۳ آورده شده که نشان می‌دهد EC و TDS با وزن‌های ۳/۱۱ و ۳/۱۹ در محاسبه شاخص دخالت داشته‌اند ولیکن میانگین تغییرات شاخص به ترتیب پس

نتیجه‌گیری کلی

با توجه به کاهش بارندگی‌ها، خشک‌سالی‌های متناوب اخیر، افزایش برداشت از سفره‌های آب زیرزمینی و کاهش چشم‌گیر منابع آب سطحی، بررسی کیفی آب‌های زیرزمینی ضروری است. در این پژوهش برای ارزیابی کیفی نمونه‌ها جهت استفاده در بخش شرب از شاخص GQI استفاده گردید. از ۲۸ حلقه چاه موجود در شهرستان‌های خانمیرزا، لردگان، بروجن، اردل و کیار در بازه‌ی زمانی ۲۰۲۰-۲۰۲۱ نمونه‌برداری انجام شد. نمونه‌های برداشت شده تحویل آزمایشگاه شده و ۱۱ پارامتر کیفی مورد آنالیز قرار گرفت سپس با استفاده از پارامترها و رابطه مربوطه، نقشه پهنه‌بندی شاخص فوق با استفاده از روش درون‌یابی وزن‌دهی عکس فاصله (IDW)، در منطقه مورد مطالعه تهیه شد. نتایج نشان داد:

۱- بر طبق طبقه‌بندی شاخص GQI اکثر نمونه‌ها در رده آب‌های با کیفیت مناسب قرار گرفته و برای شرب مناسب هستند.

۲- در آنالیز حساسیت انجام شده با کنترل تک تک پارامترها و مقایسه نتایج به‌دست آمده ضریب تأثیر آنها مشخص شده و می‌توان نتیجه گرفت که پارامترهای مورد استفاده در برآورد این شاخص تفسیری واقعی از پهنه‌بندی و تشخیص آلودگی در سطح محدوده مورد مطالعه را نشان می‌دهند.

۳- با بررسی آنالیز حساسیت صورت گرفته به‌ترتیب پارامترهای اسیدیت، کلسیم، منیزیم، کل نمک‌های محلول و هدایت الکتریکی با تأثیر منفی (به‌معنی تأثیر در افزایش مقادیر شاخص و افزایش کیفیت آب پس از حذف تک پارامتر) و غلظت بی‌کربنات، سولفات، سدیم، پتاسیم و کلر به‌ترتیب با تأثیر مثبت (به‌معنی تأثیر در کاهش مقادیر شاخص و کاهش کیفیت آب پس از حذف تک پارامتر) بیشترین تا کمترین تغییرات را در برآورد شاخص GQI به‌خود اختصاص داده‌اند. به بیان دیگر استفاده از پارامترهای اسیدیت و کلسیم در برآورد شاخص با تأثیر منفی (کاهش کیفی) و افزودن غلظت بی‌کربنات با تأثیر مثبت (افزایش کیفی) بیشترین تغییرات را در شاخص GQI به‌خود اختصاص داده‌اند.

در محاسبه شاخص GQI به‌ترتیب پارامترهای اسیدیت، کلسیم، منیزیم، نمک‌های محلول و هدایت الکتریکی، کلر، پتاسیم، سدیم، سولفات و بی‌کربنات با توجه به وزن‌های اعمال شده در اولویت قرار داشته‌اند و این نشان دهنده این است که با حذف هر پارامتری که وزن بالاتری دارد الزاماً بیشترین تأثیر در برآورد تغییرات شاخص اتفاق نخواهد افتاد (Abbasi et al., 2019). یا به‌عبارت دیگر لزوماً دارا بودن وزن بالاتر مؤلفه‌ها حاکی از حساسیت بیشتر مدل نسبت به آن مؤلفه نیست. به‌عنوان مثال با توجه به مقادیری که در تغییرات شاخص رخ داده برخی پارامترهای مورد بررسی با وجودی که وزن بالاتری در محاسبه شاخص داشته‌اند ولی درصد تغییرات شاخص با وجود و عدم وجود آن پارامتر مقدار قابل‌توجهی را نشان نداده است. به‌عنوان نمونه مؤلفه بی‌کربنات که وزن پایین‌تری را نسبت به یون منیزیم در جدول شماره ۳ دارا بوده ولی تغییرات درصد شاخص ناشی از حذف آن در مقایسه با

سایر مؤلفه‌ها باعث کاهش مقادیر شاخص در سطح محدوده مطالعاتی شده و کاهش کیفیت آب را در این مناطق به‌دنبال داشته است. پس از اسیدیت، غلظت کلسیم با تأثیر منفی و غلظت بی‌کربنات با تأثیر مثبت، بیشترین تغییرات را در محاسبه مقدار شاخص به‌خود اختصاص داده‌اند. همان‌طور که در جدول (۳) نیز این نکته قابل مشاهده است با وجودی که پارامتر pH بیشترین وزن را در محاسبه شاخص داشته است ولی مقادیر میانگین تغییرات نقشه شاخص قبل و بعد از حذف پارامتر مذکور منفی بوده است. بنابراین اعداد منفی در جدول (۳) نشانگر افزایش مقدار شاخص و اعداد مثبت نشان دهنده کاهش مقدار شاخص برآوردی پس از حذف تک نقشه می‌باشد. همچنین پس از اسیدیت، غلظت کلسیم و بی‌کربنات بیشترین تأثیر در تغییرات شاخص را به‌خود اختصاص داده‌اند.

نتایج این پژوهش با تحقیقات انجام شده در کشور و سایر نقاط جهان همخوانی دارد. در پژوهشی ارزیابی کیفیت آب‌های زیرزمینی با استفاده از شاخص کیفیت آب و تکنیک GIS در حوضه رودخانه مدجو، اتیوپی مرکزی پرداخته شد. نتایج نشان می‌دهد که بر طبق شاخص WQI، ۳/۲۳ درصد و ۹۳/۵۴ درصد نمونه‌های آب زیرزمینی به‌ترتیب دارای کیفیت آب عالی و خوب هستند (Kawo & Karuppanan, 2018).

در تحقیقی به ارزیابی کیفیت منابع آب زیرزمینی دشت عجب‌شیر بر پایه شاخص کیفی آب زیرزمینی GQI و نرم‌افزار GIS پرداخته شد. نتایج نشان داد که مقدار شاخص کیفی بین ۶۱ تا ۸۱ در رده‌های متوسط تا قابل قبول است. همچنین تحلیل حساسیت مدل به‌روش حذف تک‌نقشه نشان داد که شاخص کیفی نسبت به پتاسیم حساس‌تر است (Abbasi et al., 2019). در پژوهشی به ارزیابی کیفیت آب زیرزمینی برای اهداف آشامیدنی و آبیاری در منطقه هانگو، پاکستان پرداخته شد. نمونه‌ها از منابع مختلف آب زیرزمینی چشمه، چاه و ... در منطقه مطالعاتی جمع‌آوری و مورد آنالیز قرار گرفت. نتایج نشان داد که این منابع جهت استفاده شرب از خوب تا ضعیف طبقه‌بندی شد. همچنین نتایج نشان داد که به‌جز ۵ درصد از نمونه‌ها، مابقی برای آبیاری مناسب بودند (Din et al., 2023). طبقه‌بندی کیفی آب با توجه به پارامترهای تحلیل شده و تعیین شاخص کیفی در سطح محدوده مطالعاتی می‌تواند در شناسایی نقاط حساسی که دارای پتانسیل آلودگی هستند، کمک نموده و منشأ گسترش آن‌را بیابند و نسبت به ریشه‌یابی و رفع مشکل، برنامه‌ریزی شایسته نمایند. توجه به اهداف توسعه پایدار و پهنه‌بندی مناسب با لحاظ نمودن کیفیت آب موجود از جمله مواردی هستند که در تغییر الگوی استقرار جمعیت و بهبود آن نقش دارند. بنابراین تهیه نقشه‌های تغییرات ویژگی‌های شیمیایی آب‌های زیرزمینی، نقشی ارزنده را در فرایند تصمیم‌گیری و مدیریت استفاده و بهره‌برداری از آب‌های زیرزمینی ایفا می‌کند. در این پژوهش، از شاخص کیفیت آب زیرزمینی GQI مبتنی بر سیستم اطلاعات جغرافیایی استفاده شد که داده‌های کیفیت آب را به‌شکلی قابل‌فهم بیان می‌دارد. پیشنهاد می‌شود در تحقیقات بعدی مقادیر این شاخص با شاخص‌های دیگر در این زمینه مقایسه و نتایج بررسی گردد.

درصد تغییرات شاخص ناشی از حذف منیزیم، مقدار بیشتری بهره‌برداری و نگهداری از منابع آب زیرزمینی برنامه‌ریزی جامع برآورد شده است.

۴- نتایج این مطالعه کمک می‌نماید تا با دیدی روشن با توجه به نقشه‌های کیفیت آب زیرزمینی بتوان در خصوص

References

- AsghariMoghadam, A., Javanmard, Z., Vadieti, M., Najib, M. (2015). Evaluating the Quality of Mehraban Plain Groundwater Resources Using GQI and FGQI Methods. *Hydrogeomorphology*, 2(2), 79-98 (In Persian).
- Afzali, A., & Shahedi, K. (2015). Investigation on Trend of Groundwater Quantity-Quality Variation in Amol-Babol Plain. *J Watershed Manage Res*, 5(10), 144-156 (In Persian).
- Abbasi, Z., Azimzadeh, H., Talebi, A., & Sotoudeh, A. (2019). Evaluating quality of Ajabshir groundwater resources based on Groundwater Quality Indicator (GQI) and geographical information system. *Journal of Water and Soil Science*, 22(4), (In Persian).
- Adimalla, N., & Qian, H. (2019). Groundwater quality evaluation using water quality index (WQI) for drinking purposes and human health risk (HHR) assessment in an agricultural region of Nanganur, south India. *Ecotoxicology and environmental safety*, 176, 153-161.
- Anonymous. (2021). *Water Scarcity Adaptation National Workgroup*.
- Anonymous. (2023). *Chaharmahal and Bakhtiari meteorological Administration*.
- Babiker, I. S., Mohamed, M. A., & Hiyama, T. (2007). Assessing groundwater quality using GIS. *Water Resources Management*, 21, 699-715.
- Bhavsar, Z., & Patel, J. (2023). Assessing potability of groundwater using groundwater quality index (GWQI), entropy weighted groundwater pollution index (EGPI) and geospatial analysis for khambhat coastal region of Gujarat. *Groundwater for Sustainable Development*, 21, 100916.
- Das, C. R., Das, S., & Panda, S. (2022). Groundwater quality monitoring by correlation, regression and hierarchical clustering analyses using WQI and PAST tools. *Groundwater for Sustainable Development*, 16, 100708.
- Dev, R., & Bali, M. (2019). Evaluation of groundwater quality and its suitability for drinking and agricultural use in district Kangra of Himachal Pradesh, India. *Journal of the Saudi society of agricultural sciences*, 18(4), 462-468.
- Din, I. U., Muhammad, S., & ur Rehman, I. (2023). Groundwater quality assessment for drinking and irrigation purposes in the Hangu District, Pakistan. *Journal of Food Composition and Analysis*, 115, 104919.
- Dutta, N., Thakur, B. K., Nurujjaman, M., Debnath, K., & Bal, D. P. (2022). An assessment of the water quality index (WQI) of drinking water in the Eastern Himalayas of South Sikkim, India. *Groundwater for Sustainable Development*, 17, 100735.
- Hagan, G. B., Minkah, R., Yiran, G. A., & Dankyi, E. (2022). Assessing groundwater quality in peri-urban Accra, Ghana: Implications for drinking and irrigation purposes. *Groundwater for Sustainable Development*, 17, 100761.
- Isaaks, E. H., & Srivastava, R. M. (1989). *Applied geostatistics. (No Title)*.
- Joghatayi, H., Dabiri, R., Moslempour, M. E., Otari, M., & Sharifiyan Attar, R. (2015). Groundwater quality assessment using the Groundwater Quality Index and GIS in Joghatay plain, NE Iran. *Human & Environment*, 13(4), 17-25 (In Persian).
- Kawo, N. S., & Karuppannan, S. (2018). Groundwater quality assessment using water quality index and GIS technique in Modjo River Basin, central Ethiopia. *Journal of African Earth Sciences*, 147, 300-311.
- Khalid, S. (2019). An assessment of groundwater quality for irrigation and drinking purposes around brick kilns in three districts of Balochistan province, Pakistan, through water quality index and multivariate statistical approaches. *Journal of Geochemical Exploration*, 197, 14-26.
- Kundzewicz, Z. W. (1997). Water resources for sustainable development. *Hydrological Sciences Journal*, 42(4), 467-480.
- Mohamadi, S., & Hassanzadeh, R. (2023). A survey on spatial and temporal variations of groundwater quality and quantity index using Geographic Information System and Geostatistics (Case study: Bam-Narmashir plain). *J Watershed Manage Res*. 14(28), 55-67.
- Nas, B., & Berkta, A. (2010). Groundwater quality mapping in urban groundwater using GIS. *Environmental monitoring and assessment*, 160, 215-227.
- Nordin, N. F. C., Mohd, N. S., Koting, S., Ismail, Z., Sherif, M., & El-Shafie, A. (2021). Groundwater quality forecasting modelling using artificial intelligence: A review. *Groundwater for Sustainable Development*, 14, 100643.
- Organization, W. H. (2017). *Guidelines for drinking-water quality: first addendum to the fourth edition*.
- Pande, C. B., & Moharir, K. (2018). Spatial analysis of groundwater quality mapping in hard rock area in the Akola and Buldhana districts of Maharashtra, India. *Applied Water Science*, 8, 1-17.

- Rahman, M. M., Haque, T., Mahmud, A., Al Amin, M., Hossain, M. S., Hasan, M. Y., Shaibur, M. R., Hossain, S., Hossain, M. A., & Bai, L. (2023). Drinking water quality assessment based on index values incorporating WHO guidelines and Bangladesh standards. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 129, 103353.
- Shabbir, R., & Ahmad, S. S. (2015). Use of geographic information system and water quality index to assess groundwater quality in Rawalpindi and Islamabad. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 40, 2033-2047.
- Shahnawaz, H., Kirpalni, C., & Iqbal, M. A. (2021). Investigation & assessment on groundwater water quality index from sanganer tehsil jaipur (rajasthan). *Materials Today: Proceedings*, 42, 1732-1736.
- Sun, Y., Kang, S., Li, F., & Zhang, L. (2009). Comparison of interpolation methods for depth to groundwater and its temporal and spatial variations in the Minqin oasis of northwest China. *Environmental Modelling & Software*, 24(10), 1163-1170.
- Sarvi Sadrabad, 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).
- Varol, S., Şener, Ş., & Şener, E. (2021). Assessment of groundwater quality and human health risk related to arsenic using index methods and GIS: A case of Şuhut Plain (Afyonkarahisar/Turkey). *Environmental Research*, 202, 111623.