



Trend Analysis of Groundwater Quality Changes Using Groundwater Quality Index (Study Area: Ghazvin Aquifer)

Mohammad Mofidi¹ | Farhad Hooshyaripor¹, | Hamid Kardan Moghadam² | Roohollah Noori³

1. Department of Civil Engineering, SRC, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

2. Water Research Institute, Ministry of Energy, Tehran, Iran.

3. Graduate Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran

✉Corresponding Author: Hooshyarypor@srbiau.ac.ir

Received:
30 July 2025

Accepted:
02 September 2025

Published:
22 September 2025

Keywords:

Groundwater,
Ghazvin Aquifer,
Water Quality,
Trend Analysis,
GWQI.

Extended abstract

Introduction

The challenge of groundwater quantity on the one hand and the issue of groundwater pollution risk are considered as a serious threat to exploitation. One of the simple methods that can express the quality conditions of groundwater resources is the use of the groundwater quality index, which is one of the most reliable indicators for assessing the quality of groundwater resources. The GWQI index is one of the most widely used indicators in examining spatial changes in groundwater quality from the point of view of various uses, especially drinking. Many studies have been conducted in the field of groundwater quality index. Studies conducted on the effectiveness of the GWQI index show that the studies and analyses were conducted in a short-term period, and ultimately for 5 years. Selection and analysis for a short-term period is a challenge considering the time conditions of qualitative changes in aquifers, and the behavior assessment of aquifers should be reviewed based on various factors. One of the most important factors in qualitative assessment is the analysis of the qualitative changes of the aquifer for a long-term period, which, in addition to the impact of different perceptions of the aquifer, also reflects the behavior of climatic fluctuations. Accordingly, the primary objective of this study is to examine the qualitative behavior of the Qazvin aquifer over a long-term period, enabling the analysis of the aquifer's dynamic behavior from a qualitative perspective using the GWQI index.

Cite this article: Mofidi, M., Hooshyaripor, F., Kardan Moghadam, H. & Noori, R. (2025). Trend Analysis of Groundwater Quality Changes Using Groundwater Quality Index (Study Area: Ghazvin Aquifer). *Journal of Aquifer and Qanat*, 6 (1), 107-130. DOI: <http://10.22077/jaaq.2025.9864.1120>.



Copyright: © 2025 by the authors. Licensee Journal of Aquifer and Qanat. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Investigating the long-term behavior from a qualitative point of view makes the issue of water resource management in this aquifer very important. A large part of the water supply sources in this aquifer are from wells in this aquifer, where qualitative changes and increased salt concentration directly affect consumption in the drinking sector and the performance of the agricultural sector. Long-term analysis, based on a qualitative index that encompasses a set of qualitative parameters, can provide trustees with a framework for sustainable exploitation planning.

Materials and Methods

Study Area: The study area is the Qazvin Plain, which encompasses part of Qazvin Province in the country's administrative divisions and is situated approximately 150 kilometers northwest of Tehran. The study area of Qazvin is located between the eastern longitudes of 10 minutes and 49 degrees and 40 minutes and 50 degrees and the northern latitudes of 20 minutes and 35 degrees and 20 minutes and 36 degrees geographically, and its maximum altitude is 2971 meters and a minimum of 1100 meters, and the average altitude of the region is about 1250 meters above sea level. Changes in the depth of the aquifer bedrock fluctuate from less than 70 meters to more than 370 meters.

Methodology: To calculate the Groundwater Quality Index (GWQI), the following steps are performed:

- a) Determine the weight of each groundwater quality component. The weight range of each quality component varies between 1 and 5. A weight of 1 is for the component that has the least importance, and a weight of 5 is for the component that has the most importance in groundwater quality. The relative weight is calculated from the following equation (Ostovari et al., 2014):

$$RW_i = \frac{W_i}{\sum W_i} \quad (1)$$

where RW_i is the relative weight of each quality component, W_i is the weight of each element, and the sum of the component weights

- b) The relative quality (Q_i) for each component is calculated from the following equation: (Ostovari et al., 2014):

$$Q_i = \left(\frac{C_i}{S_i} \right) \quad (2)$$

where C_i is the concentration or amount of each component in each water sample, and S_i is the World Health Organization standard for that component.

- c) The QW value is calculated for each component (Ostovari et al, 2014):

$$QW_i = Q_i * RW_i \quad (3)$$

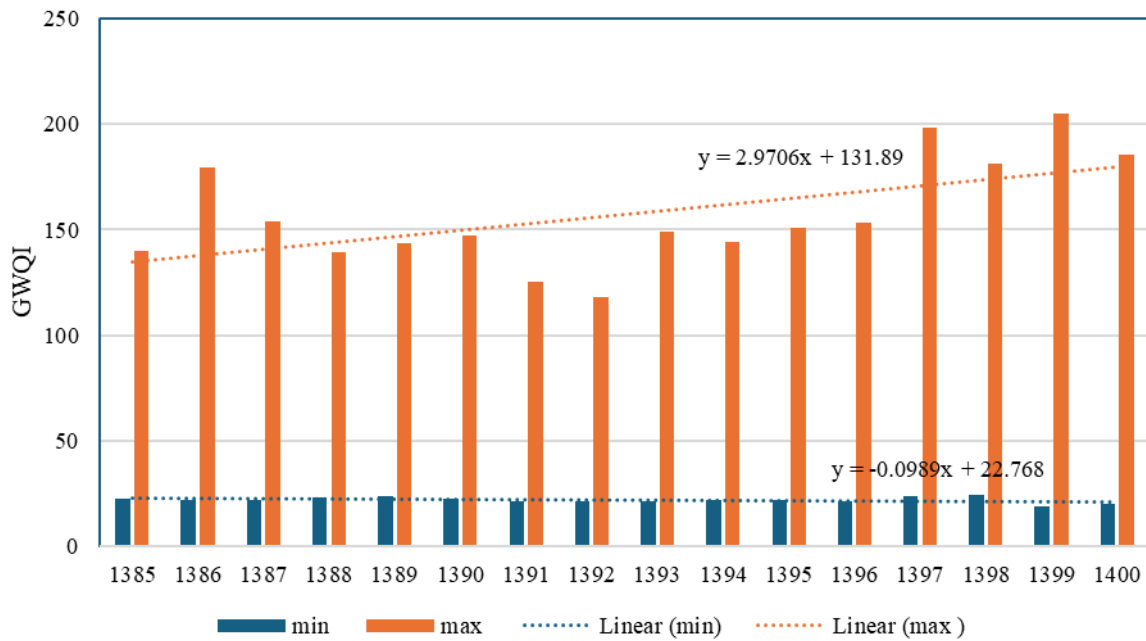
- d) Finally, the GWQI index is calculated from the following equation (Ostovari et al, 2014):

$$GWQI = \sum QW_i \quad (4)$$

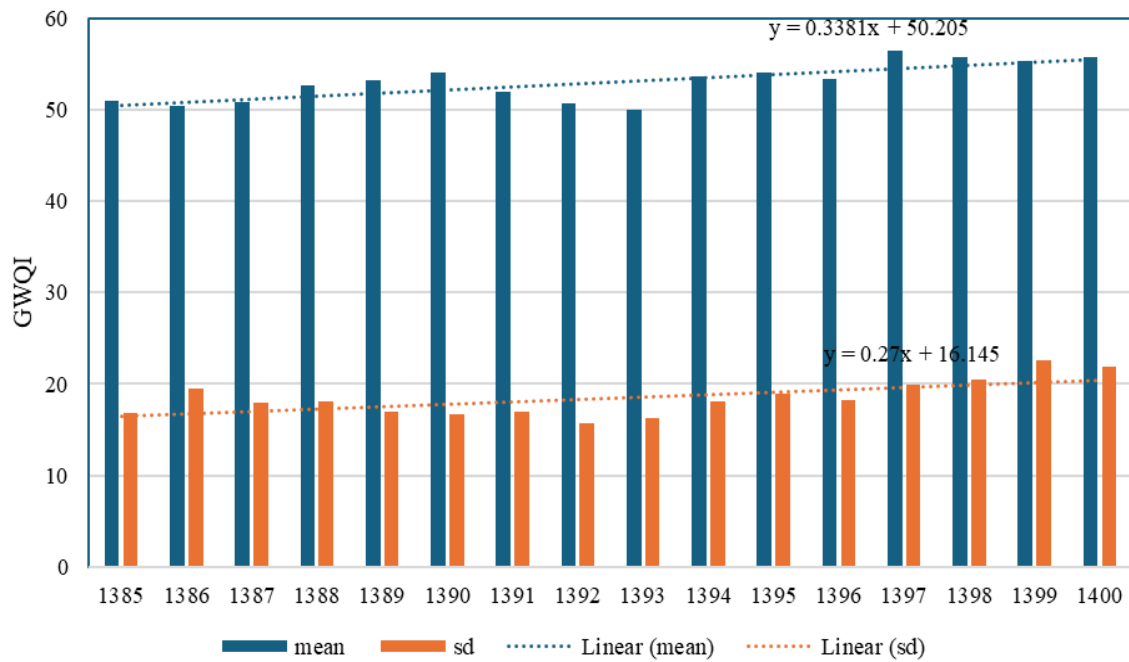
Results and Discussion

To better compare changes and more accurately identify the trend of changes, four statistics of the minimum, maximum, average, and standard deviation of the GWQI index in the years under study have been calculated and shown in Fig 1. According to the results, the maximum values of the index are increasing with a high slope from 1385 to 1400. This increase indicates a high injection of pollution into the aquifer in recent years. The results showed that the highest value of the index is related to 1399, when the index value reached 205. The continuation of this trend for the next 10 years can increase the maximum index to 235. On the other hand, the minimum value of the index has a decreasing trend with a small slope, which could be due to the depletion of the aquifer in the upper levels of the aquifer and the decrease in human and agricultural activities in the northern areas of the study area. According to the results, a GWQI index of less than 100 indicates suitable water quality for use in the drinking sector.

Figure 1b shows the average values and standard deviations of the GWQI index from 1385 to 1400. As can be seen, the average value of the index, similar to the maximum values, has an upward trend. This figure was about 51 in 1385 and reached more than 55 in 1400. This increase indicates that the quality situation of the Qazvin Plain is deteriorating, and measures should be taken to control pollution of the aquifer. If the current trend continues, 3.4 units will be added to the GWQI index every 10 years.



a)



b)

Fig 1. Temporal Changes in Main Statistical Indices of GWQI From 2006 To 2021, a) Minimum and Maximum Values, b) Average and Standard Deviation

The findings of this study highlight the importance of water quality monitoring in areas with high water resource use, such as the Qazvin aquifer. Given the observed trends, the need for strategies to improve water resource management is more than ever felt. These strategies should include continuous monitoring and preventive measures to control pollution. These measures include better management of agricultural runoff, improved waste management, and the use of sustainable water practices. As mentioned in the study by Fazelifard (2022), the combination of geochemical insights and indicators such as the GWQI provides valuable information for decision-makers to predict future water quality trends and take appropriate measures to protect this vital resource. In addition, the development of early warning systems based on climate data, as proposed in Zhou et al. (2024), can help predict major changes in water quality due to

climate change.

Conclusion

In this study, the GWQI quality index in the Qazvin aquifer was investigated. For this purpose, groundwater quality data of the plain from 2006 to 2011 were used. This study aimed to investigate the trend of changes in the groundwater quality index in the Qazvin plain and to investigate the critical points in this trend of changes. For this purpose, various statistics of maximum, minimum, average, and standard deviation were used, and finally, the Mann-Kendall method was used to test the breaking point of the time series. The results of the study showed that the minimum range of the GWQI quality index in the Qazvin plain changed from 18.6 in 2010 to 24.2 in 2019. Also, the range of changes in the average index was from 49.9 in 2014 to 55.7 in 2019, and the maximum value of the index in the Qazvin plain changed from 118.1 in 2013 to 205.2 in 2019. The results showed that the areas with the minimum GWQI mainly spread from the north to the southwest, and the areas with the maximum index were located in the eastern part, inclined toward the center. The study of the 20-year trend showed that the maximum and average GWQI values in the Qazvin plain area had an upward trend and the slope of the increase in the maximum values was very high, so that an average of 30 units were added to the GWQI index every 10 years, and if this trend continues, this value is expected to increase to 325 units by 1410.



تحلیل روند تغییرات کیفیت آب زیرزمینی با شاخص کیفی آب زیرزمینی (منطقه مورد مطالعه: آبخوان قزوین)

محمد مفیدی^۱ | فرهاد هوشیارپور^۱ | حمید کاردان مقدم^۲ | روح اله نوری^۳

۱. گروه علمی مدیریت ساخت و آب، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

۲. مؤسسه تحقیقات آب، وزارت نیرو، تهران، ایران.

۳. دانشکده تحصیلات تکمیلی محیط زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

✉ نویسنده مسئول: Hooshyarypor@srbiau.ac.ir

چکیده

شاخص کیفیت آب زیرزمینی (GWQI) برای ارزیابی کیفیت آب‌های زیرزمینی و مناسب بودن آن برای اهداف مختلف استفاده می‌شود. این شاخص توسط یکپارچه سازی داده‌ها و تولید یک عدد که بیانگر کلی کیفیت آب است به کار می‌رود. در این تحقیق تغییرات کیفیت آب زیرزمینی در آبخوان قزوین در یک دوره ۱۵ ساله منتهی به سال ۱۴۰۰ با استفاده از GWQI مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور طیف وسیعی از پارامترهای شیمیایی آب شامل SO_4 , Ca , Mg , Na , K , TH و EC استفاده شدند. نتایج نشان می‌دهد که حداقل مقدار GWQI از ۱۸/۶ تا ۲۴/۲ و مقدار حداکثری آن از ۱۱۸/۱ تا ۲۰۵/۲ متغیر بود. در میان پارامترهای کیفی EC و K به ترتیب بیشترین و کمترین تأثیر را در مقدار GWQI داشتند. نتایج آزمون روند من کنдал نیز نشان دهنده عدم وجود یک روند معنادار در شاخص GWQI بود. همچنین آنالیز مکانی نتایج نشان داد که محدوده مینیم GWQI در قسمت شمال و شمال غرب آبخوان و محدوده ماکزیمم آن در غرب آبخوان قرار داشتند. ذکر این نکته ضروریست که محدوده جغرافیایی مربوط به مینیم GWQI بسیار گسترده‌تر از محدوده ماکزیمم آن بود که نشان دهنده کیفیت مناسب آب زیرزمینی در اکثر نواحی بود.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۱۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۱۱

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۶/۳۱

کلیدواژه‌ها:

آب زیرزمینی،

آبخوان قزوین،

کیفیت آب،

تحلیل روند،

GWQI.

مقدمه

در مناطق خشک و نیمه خشک منابع آب زیرزمینی با توجه به پایداری تأمین آب از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (Adepelumi et al., 2007). ایران جز مناطق خشک و نیمه خشک جهان محسوب شده و منابع آب زیر زمینی مهم‌ترین منبع تأمین کننده آب برای مصارف مختلف است (Mirzavand et al., 2025). در سال‌های اخیر، این منبع حیاتی، به شدت تحت تأثیر برداشت بی رویه و افت شدید قرار گرفته است (Shanmugam and Ambujam, 2012). چالش کمی از یک طرف و موضوع خطر آلودگی آب زیرزمینی به عنوان تهدیدی جدی برای بهره برداری تلقی می‌شود. توسعه روزافزون جوامع بشری و گسترش فعالیت‌های صنعتی سبب شده تا سهم عمده‌ای در آلودگی محیط زیست مربوط به آب باشد. آلودگی آب‌های زیرزمینی باعث کاهش کیفیت آب شده و نگرانی‌های زیادی را از این منظر ایجاد می‌کند زیرا پس از آلوده شدن آب، اصلاح یا تصفیه آن بسیار دشوار است و نیاز به بودجه زیاد و زمان طولانی دارد که در این حین یافتن منبع جایگزین دشوار و اغلب غیرممکن است. یکی از روش‌های ساده که می‌تواند بیانگر شرایط کیفی منابع آب زیرزمینی باشد استفاده از شاخص کیفی آب زیرزمینی است که شاخص^۱ (GWQI) یکی از معتبرترین شاخص‌های ارزیابی کیفی منابع آب زیرزمینی است. شاخص GWQI یکی از پرکاربردترین شاخص‌ها در بررسی تغییرات مکانی کیفیت آب زیرزمینی از نقطه نظر مصارف مختلف خصوصاً شرب است. در زمینه شاخص کیفی آب زیرزمینی مطالعات زیادی صورت گرفته است؛ بررسی تغییرات کیفی منابع آب باختر کوهسرخ با استفاده از شاخص کیفیت آب زیرزمینی در محیط GIS توسط سلیمانی و همکاران (Soleimani et al, 2013) بررسی شد. نتایج بیانگر این بود

که آب‌های زیرزمینی منطقه از نظر استانداردهای آب‌های آشامیدنی در رده کیفیت مناسب تا قابل قبول قرار می‌گیرند. ارزیابی شاخص کیفیت آب زیرزمینی در آبخوان لنجانات با استفاده سیستم اطلاعات جغرافیایی توسط دشتی و همکاران (Dashti et al, 2013) بررسی شد. شاخص کیفی آب زیرزمینی نشان می‌دهد که کیفیت آب زیرزمینی در منطقه بررسی شده متوسط و نسبتاً زیاد است. ارزیابی شاخص کیفیت آب منابع آب زیرزمینی استان کرمان در سال ۱۳۹۴ توسط اسلامی و همکاران (Eslami et al, 2016) انجام شد. اکثر مناطق مورد مطالعه دارای کیفیت نامطلوب از نظر شاخص بودند. ارزیابی کیفیت آبخوان دشت جیرفت جهت مصارف شرب با استفاده از شاخص کیفیت آب زیرزمینی توسط فاریابی شجاع حیدری (Faryabi and Shojaheidari, 2019) انجام شد. نتایج نشان داد که آب زیرزمینی در بخش وسیعی از دشت جیرفت دارای کیفیت مناسبی برای شرب است. بررسی کارایی شاخص کیفیت آب زیرزمینی به منظور ارزیابی بلند مدت تأثیرات انتقال آب بین حوضه ای با کمک روش‌های ناپارامتری و GIS توسط سروی صدرآباد و چاهوکی (Sarvi Sadrabad and Chahooki, 2022) انجام شد. نتایج رتبه بندی پارامترها نشان داد کل جامدات محلول، کلر و منیزیم بیشترین تأثیر را بر کیفیت منابع آب زیرزمینی آبخوان داشتند. کاهه و همکاران (Kaheh, et al., 2022) کیفیت آب زیرزمینی محدوده مطالعاتی ساری-نکا را بررسی و پهنه بندی کردند. در این مطالعه از شاخص ویلکاکس برای ارزیابی و نقشه پهنه بندی کیفی محدوده استفاده شد. حسینی و همکاران (Hoseini et al., 2024) داده‌های آماری دشت مشهد را جمع آوری و به کمک روش درون یابی IDW نقشه‌های سطح آب و تراز آب زیرزمینی را در این دشت ترسیم نمودند. نتایج به دست آمده نشان داد که سطح آب زیرزمینی در ۵ سال اول ۰/۳۶ متر و در پنج سال دوم ۰/۳۲ متر افزایش یافته

^۱ . Groundwater Quality Index

است. همچنین هیدروگراف معرف آبخوان مشهد نشان می‌دهد در طی دوره ۱۱ ساله تراز آب زیرزمینی به‌طور متوسط سالانه ۰/۳۳ متر با کاهش مواجه شده است. بررسی عملکرد سامانه پخش سیلاب بر کیفیت آب زیرزمینی توسط پور امینی و همکاران (Pouramini et al., 2024) انجام شد. نتایج بررسی تغییرات مکانی پارامترها بیانگر افزایش کیفیت آب در پایین دست بخش سیلاب و خروجی آبخوان می‌باشد. کاربرد شاخص کیفی آب جهت ارزیابی کیفیت آب زیرزمینی در آبخوان نیسقیکور توسط مودو و همکاران (Modou et al., 2024) انجام شد. نتایج نشان داد که آب بیشتر چاه‌ها برای مصارف شرب نامناسب و نیاز به تصفیه دارند. کونی و همکاران (Kouni et al., 2024) با استفاده از ۱۳ محل نمونه‌برداری، شاخص‌های کیفیت آب را در سال‌های ۲۰۱۲ تا ۲۰۱۶ پایش کردند. نقشه‌های توزیع مکانی نشان می‌دهند که فعالیت‌های کشاورزی، تخلیه فاضلاب‌های خانگی و صنعتی از علل اساسی آلودگی آب در منطقه مورد مطالعه، به‌ویژه منطقه صنعتی گرومبالی، هستند. پایداری هیدروژئوشیمیایی و شاخص کیفی آب جهت دوام آب زیرزمینی در ناحیه ساحل توسط شایبو و همکاران (Shuaibou et al., 2024) بررسی شد. نتایج شاخص کیفیت آب زیرزمینی نشان دهنده این بود که ۶۳ و ۲۷ درصد آب زیرزمینی دارای کیفیت عالی و خوب برای آشامیدن بودند. زو و همکاران (Zhou et al., 2024) از یک رویکرد ترکیبی مبتنی بر مدل‌های هوش مصنوعی برای پیش‌بینی سری‌های زمانی پارامتر SAR ماهانه و از توابع توزیع احتمال برای تخمین مقادیر حدی استفاده کردند. مدل‌های مورد مطالعه تخمین‌های دقیق‌تری در مقایسه با مدل‌های پایه نشان دادند که نشان‌دهنده دقت بیشتر آنها بود. سالاری جزی و همکاران (Salarjazi et al., 2024) با حذف متغیرهای اصلی Mg^{+2} ، Ca^{+2} و Na^{+} ، از یک روش خلاقانه برای مدل‌سازی و پیش‌بینی SAR استفاده کردند. مهرابی نژاد

و همکاران (Mehrabinejad et al., 2025) شاخص CCMEWQI را برای ارزیابی کیفیت آب در مصارف مختلف، شاخص خطر سلامتی برای گروه‌های سنی مختلف بر اساس مواجهه با نیتрат، و شاخص آلودگی نیترات (NPI) را برای بررسی شدت آلودگی و توزیع مکانی نیترات استفاده کردند. مدیریت پایدار آب زیرزمینی از طریق شاخص کیفی آب زیرزمینی و شناخت ژئوشیمیایی در والساد هند توسط جودهانی و همکاران (Jodhani et al., 2025) بررسی شد. تحلیل شاخص کیفی آب نشان داد که 31/25 درصد دارای کیفیت عالی و 68/75 درصد دارای کیفیت خوب برای آشامیدن هستند.

مطالعات انجام شده در کارایی شاخص GWQI نشان می‌دهد که مطالعات و تحلیل‌های انجام شده در یک دوره کوتاه مدت و نهایتاً برای یک دوره ۵ ساله انجام شده است. انتخاب و تحلیل برای یک دوره کوتاه مدت باتوجه به شرایط زمانی تغییرات کیفی در آبخوان‌ها یک چالش بوده و رفتار سنجی آبخوان‌ها می‌بایست مبتنی بر عوامل مختلف مورد بازنگری قرار گیرد. یکی از مهم‌ترین عوامل در ارزیابی کیفی تحلیل تغییرات کیفی آبخوان برای یک دوره درازمدت که علاوه بر تأثیر برداشت‌های مختلف از آبخوان رفتار نوسانات اقلیمی نیز در آن منعکس شود. بر این اساس هدف اصلی از این مطالعه بررسی رفتار سنجی کیفی آبخوان قزوین در یک دوره بلندمدت است که بتوان تحلیل رفتار دینامیک آبخوان از نقطه نظر کیفی با استفاده از شاخص GWQI مورد آنالیز قرار گیرد. بررسی رفتار درازمدت از نقطه نظر کیفی، موضوع مدیریت منابع آب در این آبخوان را بسیار حائز اهمیت می‌کند. بخش اعظمی از منابع تأمین آب در این آبخوان از چاه‌های موجود در این آبخوان است که تغییرات کیفی و افزایش غلظت املاح روی مصرف در بخش شرب و عملکرد بخش کشاورزی به‌صورت مستقیم اثر دارد که تحلیل درازمدت مبتنی بر شاخص کیفی که عملاً در برگرفته مجموعه‌ای

در گام اول منطقه مورد مطالعه از لحاظ کیفیت منابع آب زیرزمینی مورد بررسی قرار می‌گیرد و در گام دوم شاخص GWQI محاسبه و روند تغییرات کیفی با استفاده از آزمون آماری آنالیز شده است. بر مبنای دو گام اصلی این مطالعه، روند نمای پژوهش در شکل ۱ آمده است.

از پارامترهای کیفی است می‌تواند برنامه‌ریزی برای بهره‌برداری پایدار را در اختیار متولیان قرار دهد.

مواد و روش

در این تحقیق تحلیل روند کیفیت آب زیرزمینی در آبخوان قزوین مورد بررسی قرار گرفته است. بر این اساس



شکل ۱. روند نمای انجام پژوهش

Fig 1. Flowchart of The Investigation

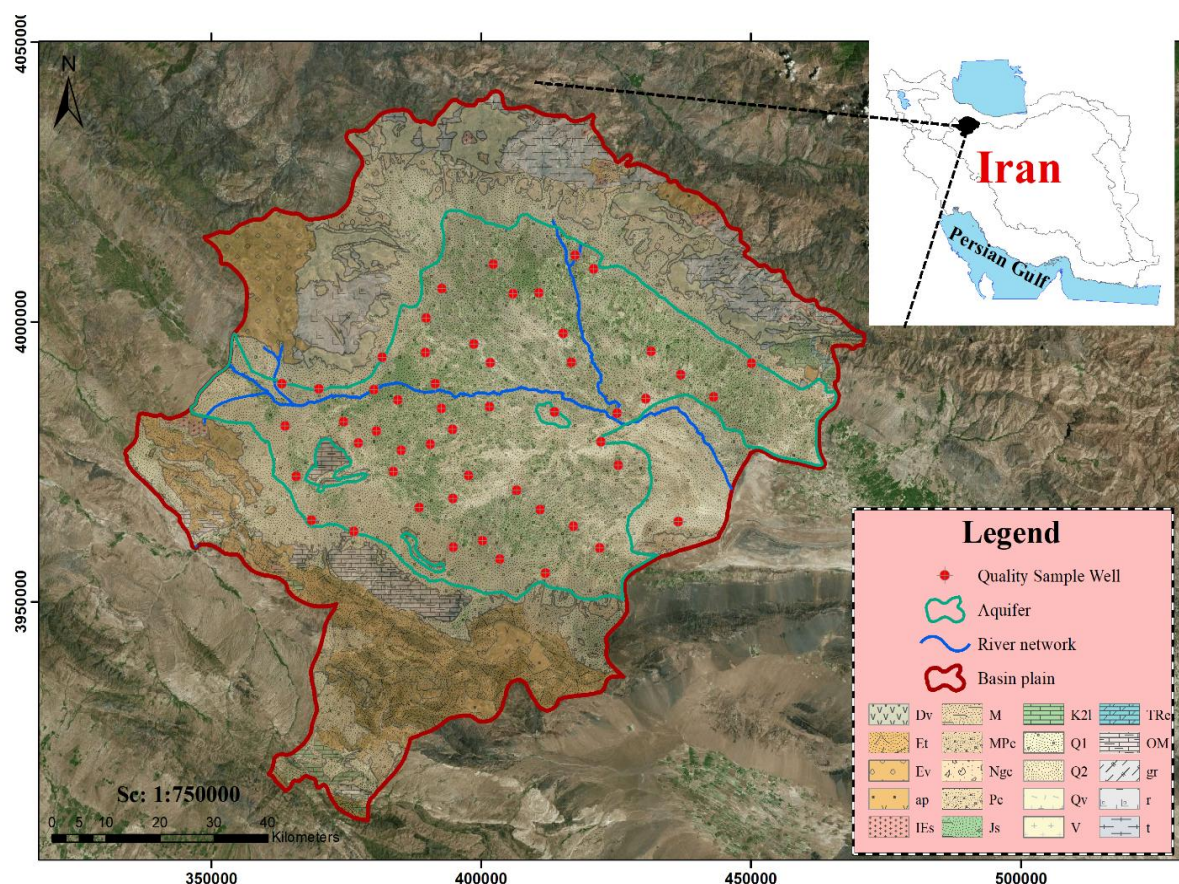
منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز دریاچه نمک با وسعت ۹۲۸۸۴ کیلومترمربع در شمال غرب قسمت مرکزی ایران قرار گرفته و شامل محدوده سیاسی استان‌های تهران، زنجان، همدان، مرکزی، قم، قزوین و اصفهان است. بیش از ۳۰٪ جمعیت کل کشور در این حوضه آبریز قرار گرفته و وجود مراکز حساس مملکتی، نظامی، سیاسی، کارخانجات مهم

صنعتی، قطب‌های مهم کشاورزی بر اهمیت آن می‌افزاید. تغییرات درجه حرارت حوزه آبریز دریاچه نمک بین ۳۷- تا ۵۱ درجه سانتی‌گراد و دمای متوسط سالانه آن ۱۴/۴ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. میزان بارندگی متوسط در این حوضه نیز از نقطه‌ای به نقطه دیگر بین ۱۱۰ تا ۸۰۶ میلی‌متر در سال تغییر می‌نماید در حالی که متوسط بارش سالانه آن حدود ۲۷۴ میلی‌متر می‌باشد. از رودخانه‌های مهم این منطقه رودخانه شور، جاجرود، کرج،

بین طول‌های شرقی ۱۰ دقیقه و ۴۹ درجه و ۴۰ دقیقه و ۵۰ درجه و عرض‌های شمالی ۲۰ دقیقه و ۳۵ درجه و ۲۰ دقیقه و ۳۶ درجه جغرافیایی قرار گرفته و ارتفاع آن حداکثر برابر ۲۹۷۱ متر و حداقل ۱۱۰۰ متر و متوسط ارتفاع منطقه حدود ۱۲۵۰ متر از سطح دریاست. تغییرات عمق سنگ کف آبخوان کمتر از ۷۰ متر تا بیش از ۳۷۰ متر در نوسان است. موقعیت منطقه مورد مطالعه و موقعیت پی‌زومترهای مورد استفاده در این مقاله در شکل ۲ آمده است.

قره‌چای، قمرود را می‌توان نام برد. حداکثر رتبه رودخانه‌های موجود در حوضه ۶ می‌باشد که متعلق به پایاب رودخانه‌های شور و قره‌چای است. مجموع طول آبراهه‌های موجود در این حوضه بالغ بر ۲۴ هزار کیلومتر می‌باشد که بدین ترتیب تراکم آبراهه‌ها حدود ۲۵۸ متر در کیلومترمربع است. منطقه مورد مطالعه دشت قزوین است که در تقسیمات کشوری، بخشی از استان قزوین را شامل می‌شود و در فاصله حدود ۱۵۰ کیلومتری شمال غربی تهران قرار گرفته است. محدوده مطالعاتی قزوین



شکل ۲. نقشه موقعیت آبخوان قزوین و چاه‌های مشاهداتی موجود

Fig 2. Map of The Location of The Qazvin Aquifer and Existing Observation Wells

(TDS)، هدایت الکتریکی آب (EC) و سختی کل (TH) می‌باشند. داده‌ها از شرکت مدیریت منابع آب ایران و شرکت آب منطقه‌ای استخراج و شامل داده‌های سال ۱۳۸۵ تا سال ۱۴۰۰ می‌باشد. از استاندارد جهانی WHO برای مناسب بودن آب از نظر شرب بودن و مناسب بودن

داده‌های کیفی

پارامترهای شیمیایی مورد بررسی شامل کاتیون‌های پتاسیم (K)، سدیم (Na)، منیزیم (Mg) و کلسیم (Ca) و آنیون‌های بی‌کربنات (HCO₃)، سولفات (SO₄) و کلراید (Cl) و همچنین پارامترهای pH، کل مواد جامد محلول

تعداد آنها بسیار محدود است (۰/۰۵ سطح احتمال) تا ۰/۹۵ گستردگی دارد که از مقدار میانگین بسیار دور است و نشانگر تغییرات زیاد به خصوص در مواقع سیلابی دارد. با دقت در سایر پارامترها همین روند را می توان پیش بینی کرد.

در شکل ۳ نیز، میانگین تغییرات زمانی پارامترها نشان داده شده است. این شکل نشان دهنده روند نسبی تغییرات هر پارامتر در بازه زمانی ۱۳۸۵ تا ۱۴۰۰ است.

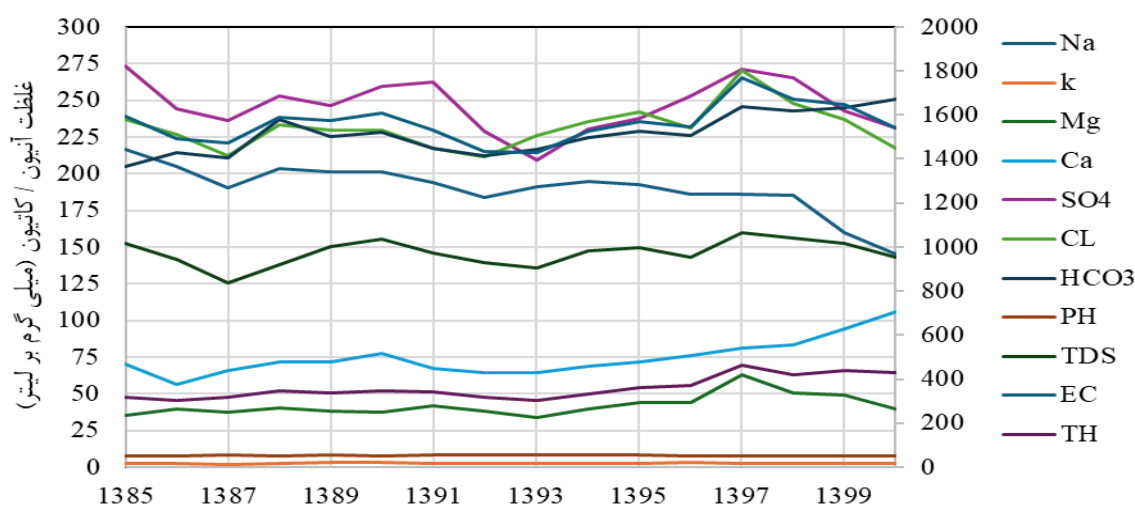
جهت کشاورزی استفاده می شود. حدود پارامترهای کیفی مورد استفاده در این پژوهش و حد بالای توزیع داده ها در سطح ۰/۹۵ احتمال مطابق جدول ۱ می باشد. همانطور که دیده می شود غلظت پتاسیم از صفر تا ۰/۹۵ با میانگین ۰/۰۶۸ و انحراف معیار ۰/۰۶۳ متغیر است و حد بالای آن با ۰/۹۵ سطح احتمال برابر ۰/۱۹ می باشد. این مقدار بیانگر یک توزیع با چولگی مثبت است که دنباله مثبت آن کشیدگی زیادی دارد. به عبارتی مقادیر بیشتر از ۰/۱۹ که

جدول ۱. مشخصات آماری پارامترهای شیمیایی آب در این تحقیق

(واحد یون ها، کل جامدات محلول و سختی کل mg/L و واحد هدایت الکتریکی $\mu\text{S/cm}$ است)

Table 1. Statistical Characteristics of Water Chemistry in This Research
(Unit For Ions, Total Dissolved Solids, and Total Hardness Is mg/L and Unit For Electrical Conductivity Is $\mu\text{S/cm}$)

پارامتر کیفی (Quality parameter)											پارامتر آماری (Statistic parameter)
K	Na	Mg	Ca	SO ₄	Cl	HCO ₃	pH	TDS	EC	TH	
0	0.04	0.11	0.3	0.1	0.11	0.29	6	144	234	37	حداقل (Minimum)
0.95	46	29.9	41.5	1661	47.7	18.2	10.3	5100	8038	2689	حداکثر (Maximum)
0.068	8.29	3.49	3.92	5.17	6.67	3.83	7.87	991.3	1592.6	370.4	میانگین (Mean)
0.06	6.44	2.65	3.04	4.27	7.33	1.46	0.43	677.4	1086.2	257.7	انحراف معیار (Standard deviation)
0.19	20.9	8.68	9.88	13.54	21.03	6.68	8.71	2319.1	3721.6	875.7	حد غلظت با ۰/۹۵ سطح احتمال (Concentration limit with 95% confidence level)



شکل ۳. میانگین تغییرات زمانی پارامترهای کیفی

Fig 3. Average Time Changes of Quality Parameters

وزن نسبی از معادله ۱ محاسبه می‌شود (Ostovari et al., 2014).

ب) کیفیت نسبی (Q_i) برای هر مولفه از معادله ۲ محاسبه می‌شود (Ostovari et al., 2014).

ج) برای هر مولفه مقدار QW محاسبه می‌شود (Ostovari et al., 2014).

د) در نهایت شاخص GWQI از معادله ۳ محاسبه می‌شود (Ostovari et al., 2014).

$$RW_i = \frac{W_i}{\sum W_i} \quad (1)$$

$$Q_i = \left(\frac{C_i}{S_i} \right) \quad (2)$$

$$QW_i = Q_i * RW_i \quad (3)$$

در معادلات فوق RW_i وزن نسبی هر مولفه کیفی، W_i وزن هر مولفه و $\sum W_i$ مجموع وزن مولفه‌ها، C_i غلظت یا مقدار هر مولفه در هر نمونه آب، S_i استاندارد سازمان بهداشت جهانی برای همان مولفه می‌باشد.

شاخص کیفیت آب یکی از مؤثرترین ابزارها برای انتقال اطلاعات در مورد کیفیت آب به شهروندان، مقامات دولتی و سیاست‌گذاران است. این شاخص تکنیک مهمی است که برای خلاصه کردن داده‌های فراوان کیفی آب به صورت یک شاخص و سپس تعیین کیفیت آب‌های زیرزمینی و مناسب بودن آن برای اهداف مختلف استفاده می‌شود. این شاخص برای فهم موضوعات کیفی آب توسط یکپارچه سازی داده‌های پیچیده و ایجاد یک عدد که پیکره کلی کیفیت آب را توصیف می‌کند، به کار می‌رود (Eslami et al., 2017). از خصوصیات این شاخص قابلیت فهم ساده و آسان برای مسئولین و تعیین شرایط رد یا قبولی استفاده از یک منبع آب برای کاربرد خاص می‌باشد. به‌منظور تعیین این شاخص یکسری پارامترهای کیفی نیاز است. برای محاسبه شاخص کیفیت آب زیرزمینی (GWQI) مراحل زیر انجام می‌شود:

الف) تعیین وزن هر مولفه کیفی آب زیرزمینی. دامنه وزن هر مولفه کیفی بین ۱ تا ۵ تغییر می‌کند. وزن ۱ برای مولفه‌ای است که کمترین اهمیت و وزن ۵ برای مولفه‌ای است که بیشترین اهمیت را در کیفیت آب زیرزمینی دارد.

جدول ۲. طبقه بندی کیفیت آب زیرزمینی بر اساس پارامتر GWQI (Fazelifard, 2022)

Table 2. Groundwater Quality Classification According to GWQI			
طبقه آب (Type of water)	GWQI	طبقه آب (Type of water)	GWQI
خیلی بد (Very poor)	200-300	عالی (Excellent)	<50
غیر قابل شرب (Unsuitable for drinking)	>300	خوب (Good)	50-100
		بد (Poor)	100-200

خاصی ندارند یا از ایستایی برخوردار نیستند، مناسب است (Barani and Karami, 2019). آزمون‌های پارامتریک مانند دیکی-فولر برای داده‌هایی که از توزیع خاصی پیروی می‌کنند و از ایستایی برخوردار هستند استفاده می‌شود

تحلیل روند زمانی

برای بررسی روند در سری‌های زمانی، می‌توان از آزمون‌های مختلفی استفاده کرد. این آزمون‌ها به دو دسته کلی پارامتریک و ناپارامتریک تقسیم می‌شوند. آزمون‌های ناپارامتریک مانند من کندیال برای داده‌هایی که توزیع

$$\begin{cases} 1 & (x_j - x_k) > 0 \\ 0 & (x_j - x_k) = 0 \\ -1 & (x_j - x_k) < 0 \end{cases} \quad (6)$$

$$\text{var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum t(t-1)(2t+5)}{18} \quad (7)$$

$$z = \begin{cases} \frac{S-1}{\text{var}(S)} \rightarrow \text{if } S > 0 \\ 0 \rightarrow \text{if } S = 0 \\ \frac{S+1}{\text{var}(S)} \rightarrow \text{if } S < 0 \end{cases} \quad (8)$$

بنابراین در آزمون دوطرفه روند، اگر رابطه $|Z| \leq Z_{\frac{\alpha}{2}}$ در سطح اطمینان ۹۵ در صد برقرار باشد باید قبول تصادفی بودن سری داده‌ها را پذیرفت (Mohammadi, 2010). اگر معنی داری در سطح ۹۹ درصد اطمینان آزمون شد فرض صفر در صورتی رد می‌شود که $|Z| > Z_{0.995}$ برابر ۲.۵۷۵ شود. مقادیر مثبت Z روند صعودی و مقادیر منفی روند نزولی را نشان می‌دهند.

پهنه بندی شاخص GWQI در منطقه

انتخاب مدل‌های درونیایی باید بر اساس اهداف تحقیقاتی خاص و ویژگی‌های اشیاء تحقیقاتی باشد (Qiao et al., 2018). با این حال، در مورد برتری بالقوه یک روش درونیایی نسبت به روش دیگر، نظرات متناقض است (Gong et al., 2014). در نتیجه، روش‌های درونیایی مانند درونیایی معکوس فاصله^۱ (IDW) و کریجینگ به‌طور گسترده در ارزیابی آب و نقشه‌برداری آلودگی مورد استفاده قرار گرفته‌اند (Mirzaei and Sakizadeh, 2016). انتخاب این روش‌ها در منابع آب زیرزمینی باتوجه به

(Noori et al., 2020). برای تجزیه و تحلیل داده‌های جمع آوری شده در طول زمان از آزمون من کندال (Mann-Kendall) استفاده می‌شود (Turgay and Ercan, 2005). من کندال یک تست ناپارامتریک است، به این معنی که برای همه توزیع‌ها کار می‌کند (یعنی داده‌ها نباید با فرض نرمال بودن مطابقت داشته باشند). آزمون من کندال برای تعیین اینکه آیا یک دنباله زمانی روند صعودی یا نزولی یکنواخت دارد استفاده می‌شود. (Moradzadeh and Pourhossein, 2024). در این آزمون نیازی نیست که داده‌ها به‌طور نرمال یا خطی توزیع شده باشند و مستلزم آن است که هیچ خودهمبستگی وجود نداشته باشد. از این آزمون می‌توان برای یافتن جهت مندی‌ها برای حداقل چهار نمونه استفاده کرد. هرچه نقاط داده بیشتری داشته باشید، احتمال بیشتری وجود دارد که آزمون یک روند واقعی را پیدا کند (برخلاف روندی که تصادفی یافت می‌شود). بنابراین حداقل تعداد اندازه گیری‌های توصیه شده ۸ تا ۱۰ است. (Alijani et al, 2012) فرضیه صفر برای این آزمون این است که هیچ روند یکنواختی در مجموعه وجود ندارد. فرضیه مقابل این است که یک روند وجود دارد. این روند می‌تواند مثبت، منفی یا غیر صفر باشد. اگر روندهای صعودی و نزولی متناوب در داده‌ها وجود داشته باشد، آزمون کار نخواهد کرد.

مراحل محاسبه آماره این آزمون در روابط ۵ و ۶ نشان داده شده است (Mohammadi, 2010). آزمون آماره‌های S میانگین صفر دارد و واریانس آن نیز از رابطه ۷ مشخص می‌شود (Mohammadi, 2010) شایان ذکر است که برای مواردی که $n > 10$ باشد آماره Z استاندارد شده به کمک رابطه ۸ محاسبه می‌گردد (Mohammadi, 2010).

$$S = \sum_{K=1}^{n-1} \sum_{j=K+1}^n \text{sgn}(x_j - x_K) \quad (5)$$

¹ Inverse Distance Weighting

است. تعیین اندازه شعاع جستجو بستگی به فاصله نقاط از همدیگر و نحوه تغییرات پدیده پیوسته دارد.

۲- روش تعداد همسایه: اگر نحوه تغییرات پدیده نامنظم باشد از روش تعداد همسایه استفاده می‌شود. تعداد همسایه‌ها معیار انتخاب نقاط معلوم برای درونیابی است.

در روش IDW، برای یک سری داده $\{x_i, u_i\}$ for $x_i \in \mathbb{R}^n, u_i \in \mathbb{R}\}_{i=1}^N$ تابع میانجیابی IDW $u_i(x) \in \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ به صورت رابطه ۹ تعریف می‌شود:

$$u(x) = \begin{cases} \frac{\sum_{i=1}^N w_i(x) u_i}{\sum_{i=1}^N w_i(x)} & \text{if } d(x, x_i) \neq 0 \text{ for all } i \\ u_i & \text{if } d(x, x_i) = 0 \text{ for some } i \end{cases} \quad (9)$$

که در آن $w(x)$ وزن هر داده است که از رابطه ۱۰ محاسبه می‌شود:

$$w_i(x) = \frac{1}{d(x, x_i)^p} \quad (10)$$

که در آن x نشان دهنده یک نقطه درونیابی شده (دلخواه)، x_i یک نقطه درونیابی شده (معلوم)، d فاصله داده شده (عملگر متریک) از نقطه معلوم x_i تا نقطه مجهول x ، N تعداد کل نقاط معلوم استفاده شده در درونیابی و p یک عدد حقیقی مثبت است که پارامتر توان نامیده می‌شود و در این مقاله برابر ۲ فرض می‌شود. در این بخش با استفاده از معادله ۴ شاخص GWQI برای پیرومترهای موجود در دشت قزوین محاسبه شده و نتایج صورت شکل ۶ ارائه شده است.

نتایج

ارزیابی شاخص GWQI

وزن پارامترهای کیفی در تحلیل شاخص کیفیت آب زیرزمینی معمولاً بر اساس اهمیت هر پارامتر در تأثیرگذاری بر کیفیت آب و سلامت انسان انجام می‌شود.

مطالعات مختلف و نتایج مناسب ارزیابی شده انتخاب شده است. پانالاکر و جاراگ (Panhalakr and Jarag, 2016) اعلام کردند که IDW حتی در مقایسه با کریجینگ برتری داشته و دقیق‌تر است. این ایده در تحقیقات دیگری نیز به اثبات رسیده است (El-Zeiny and Elbeih, 2019, Paul et al., 2019; Khouini et al., 2021). حسینی و همکاران (2024) برای تحلیل داده‌های آماری آبخوان دشت مشهد، روش درونیابی IDW را پیشنهاد نمودند. ایشان نقشه‌های سطح آب و تراز آب زیرزمینی برای دوره‌های ۱۱ ساله و دو دوره پنج ساله اول و دوم، را با موفقیت توسط این روش ترسیم نمودند. همچنین، مطالعه‌ای توسط گونگ و همکاران (Gong et al., 2014) نشان داد که روش IDW در پیش‌بینی برخی از سطوح آلاینده‌ها در آب‌های زیرزمینی، دقیق‌تر از رویکرد کریجینگ است. به همین دلیل و با توجه به قابلیت این روش ساده در پهنه بندی کیفی آب، از این روش در مقاله حاضر استفاده شده است.

نقشه‌های شاخص کیفیت آب زیرزمینی GWQI با استفاده از نرم‌افزار ArcMap 10.1 و با استفاده از روش IDW انجام شد. این روش یکی از روش‌های معمول و پرکاربرد درونیابی است. هدف اصلی در درونیابی مشخص کردن یک پارامتر در مناطقی است که در آنها نمونه برداری نشده است. این کار نیز با توجه به نقاط همسایه و میانگین‌گیری از نقاط نمونه که در همسایگی هر نقطه مجهول قرار دارند انجام می‌شود. در روش IDW فرض ما بر این است که تأثیر هر پدیده متناسب با توان معکوس از فاصله است، بنابراین تأثیر پدیده مورد نظر با افزایش فاصله کاهش می‌یابد. همسایگی در این روش به ۲ صورت تعریف می‌شود:

۱- روش شعاع جستجو: در این روش، دایره‌ای در نظر گرفته می‌شود و نقطه‌ی نامعلوم در مرکز آن قرار دارد. نقطه‌ای که در مرکز دایره قرار دارد، ارزش آن مجهول

غلظت‌های بسیار متفاوت در نمونه‌های مختلف)، وزن بالاتری دریافت می‌کنند و ۵) روش وزن‌دهی مساوی (در صورت عدم اطلاعات کافی) اگر داده‌های کافی یا تخصص لازم برای وزندهی دقیق وجود نداشته باشد، می‌توان به تمام پارامترها وزن یکسان داد. شایان ذکر است در این مقاله از روش اول بر مبنای اصلاحیه چهارم راهنمای آب آشامیدنی WHO استفاده شده (WHO, 2017) که مقادیر آن در جدول زیر گزارش شده است. همچنین به کمک معادله (۱) وزن نسبی نیز محاسبه و در جدول ۳ آمده است.

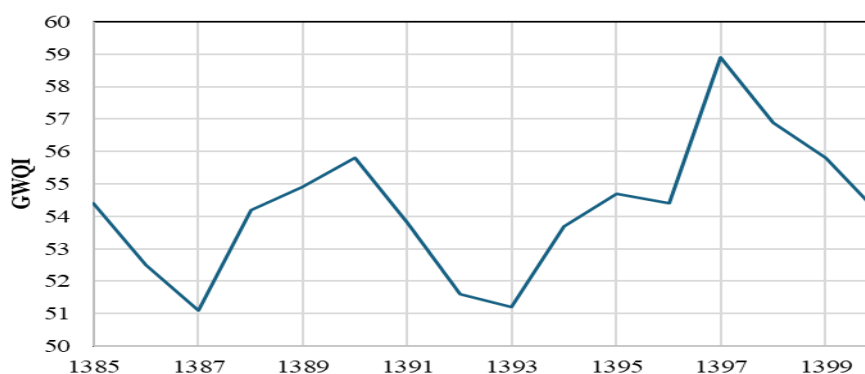
براساس نتایج ارائه شده در شکل ۴ نیز، مقدار شاخص کیفی در سال ۱۳۸۵ برابر با ۵۴/۴ بود که این مقدار در سال ۱۳۸۷ به کمترین مقدار خود یعنی ۵۱/۱ رسید دوباره تا سال ۱۳۹۰ روند صعودی و سپس تا سال ۱۳۹۳ روند نزولی شد. از سال ۱۳۹۴ روند صعودی و در سال ۱۳۹۷ به بیشترین مقدار خود یعنی ۵۸/۹ رسید و سپس دوباره روند نزولی شد و در سال ۱۴۰۰ به ۵۴/۱ رسید.

پژوهشگران از روش‌های مختلفی برای تعیین وزن پارامترها استفاده کرده‌اند از جمله ۱) روش وزن‌دهی بر اساس استانداردهای کیفیت آب مانند WHO یا EPA که در آن، پارامترهایی که حد مجاز آنها در استانداردهای بین‌المللی پایین‌تر است، وزن بیشتری دریافت می‌کنند، زیرا نشان‌دهنده حساسیت بیشتر به آن پارامتر است؛ ۲) روش آنالیز مؤلفه‌های اصلی (PCA) که در این روش از تکنیک‌های آماری سهم هر پارامتر در تغییرپذیری کیفیت آب تعیین شده و پارامترهایی که بیشترین تأثیر را بر تغییرات کیفیت آب دارند، وزن بالاتری دریافت می‌کنند؛ روش فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی که در آن از نظرات کارشناسان برای مقایسه زوجی پارامترها استفاده شده و یک ماتریس مقایسه تشکیل می‌شود و وزن هر پارامتر بر اساس اولویت‌های تعیین‌شده محاسبه می‌گردد؛ ۴) روش آنتروپی شانون که در این روش، وزن پارامترها بر اساس میزان اطلاعاتی که هر پارامتر ارائه می‌دهد، تعیین می‌شود و پارامترهایی که تغییرپذیری بیشتری دارند (مثلاً

دول ۳. مقادیر وزن پارامترها در محاسبه شاخص (WHO, 2017) GWQI

Table3. Weight of Water Chemistry Parameters For Calculation of The GWQI

TH	EC	TDS	pH	HCO ₃	Cl	SO ₄	Ca	Mg	Na	K	پارامتر کیفی (Parameter)
1	3	3	3	2	2	3	1	1	1	2	وزن شاخص (Weight)
0.05	0.14	0.14	0.14	0.09	0.09	0.14	0.05	0.05	0.05	0.09	وزن نسبی (Relative weight)



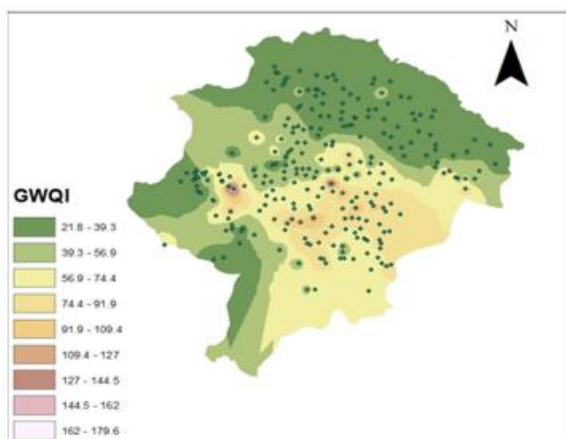
شکل ۴. تغییرات زمانی Gwqi محاسبه شده بر مبنای میانگین داده‌های شیمیایی آب در چاه‌ها

Fig 4. Temporal Change in GWQI Calculated By The Mean Values of Water Chemistry Data in The Wells

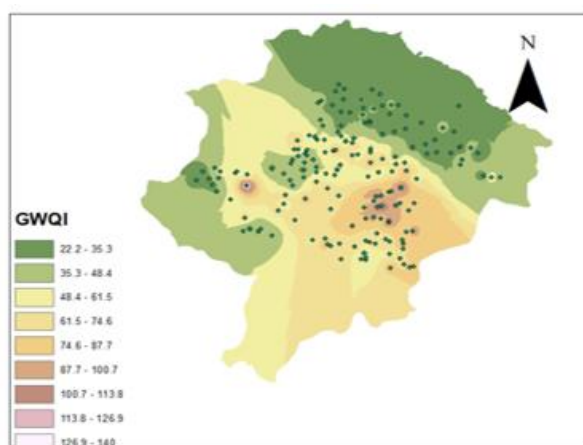
پهنه بندی GWQI در دشت قزوین

با توجه به نتایج به دست آمده در بخش قبل از روش IDW برای میان‌یابی و پهنه بندی شاخص GWQI در GIS استفاده شد. با توجه به اینکه داده‌های مورد استفاده مربوط به یک سری زمانی از سال ۱۳۸۵ تا ۱۴۰۰ است، در این بخش ابتدا نقشه‌های مربوطه ارائه می‌شود (شکل ۵). همانطور که مشاهده می‌شود، در سال ۱۳۸۵ کمترین مقادیر GWQI در قسمت شمال دشت قرار داشته و بیشترین مقادیر شاخص در قسمت مرکز متمایل به شرق قرار دارد. در قسمت غرب منطقه مطالعاتی، مقادیر متوسط GWQI دیده می‌شود که بخش وسیعی از شمال غرب تا جنوب غرب منطقه را پوشش می‌دهد. این توزیع شاخص در سال‌های بعد نیز به همین ترتیب قابل مشاهده است با توجه به نتایج در سال ۱۳۸۶ منطقه دربرگیرنده

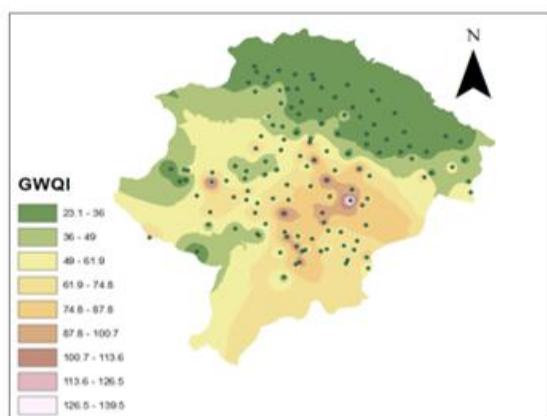
مقادیر مینیمم و میانگین توسعه بیشتری یافته است. قابل ذکر است در سال‌های ۱۳۸۷ تا ۱۳۹۶، وضعیت کیفیت آب زیرزمینی به شدت کاهش یافته است و همانطور که مشاهده می‌شود، پهنه وسیع‌تری از محدوده مطالعاتی با مقادیر بزرگ‌تر شاخص مواجه شده است. نکته مهم دیگری که در بررسی نمودارها قابل استخراج است، بدتر شدن شرایط کیفیت آب زیرزمینی است. بدین ترتیب که در سال ۱۳۸۵ (ابتدای دوره) شاخص GWQI بین ۲۲ تا ۱۴۰ تغییر کرده است در حالی که در سال ۱۴۰۰ (انتهای دوره) حدود تغییرات شاخص بین ۳۸ تا ۱۸۵ بوده است. این نتیجه به معنی روند مخرب تنزل کیفیت منابع آب زیرزمینی در دشت قزوین است. اگرچه در سال ۱۳۹۹ مقدار شاخص کیفیت آب به ۲۰۵ نیز تنزل پیدا کرده است.



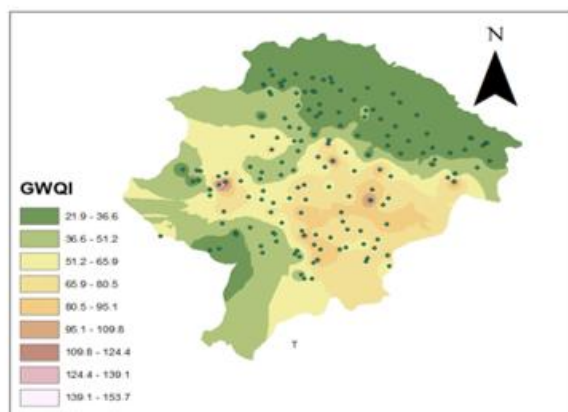
(۱۳۸۶) ۲۰۰۷



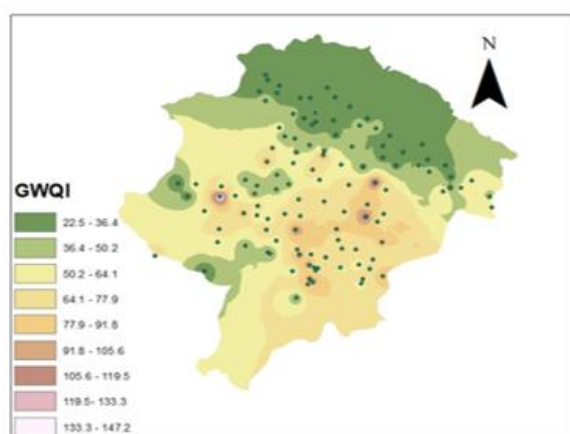
(۱۳۸۵) ۲۰۰۶



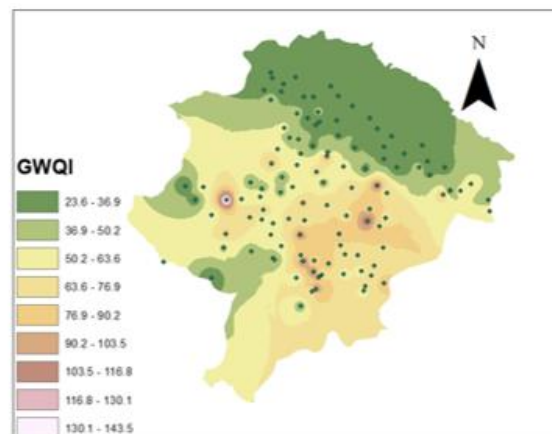
(۱۳۸۸) ۲۰۰۹



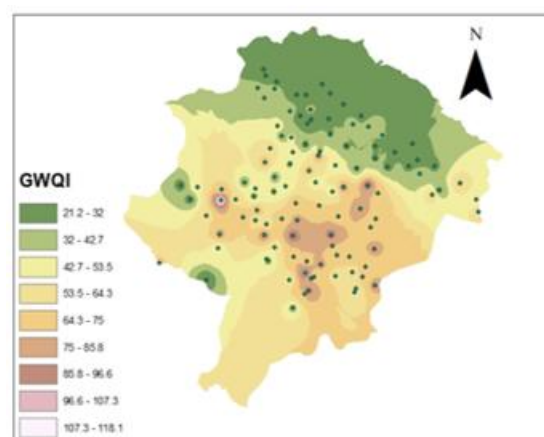
(۱۳۸۷) ۲۰۰۸



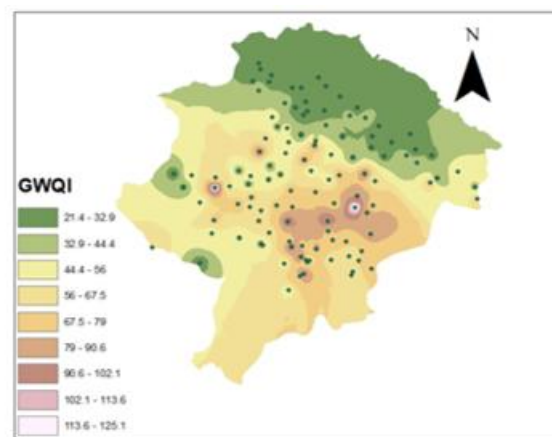
(2011) ۱۳۹۰



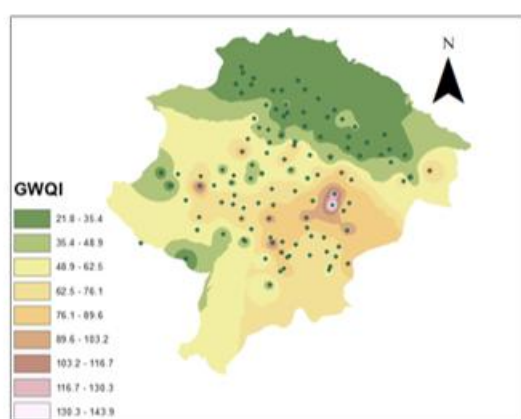
(2010) ۱۳۸۹



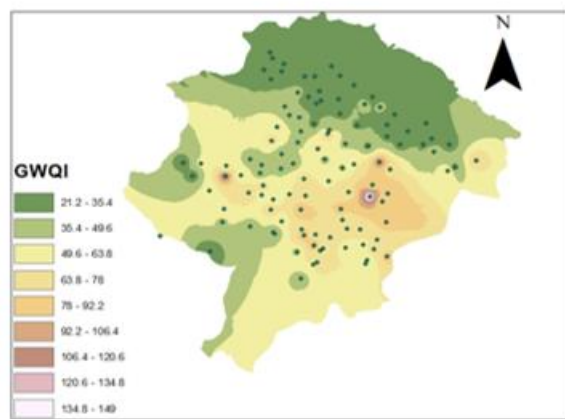
(2013) ۱۳۹۲



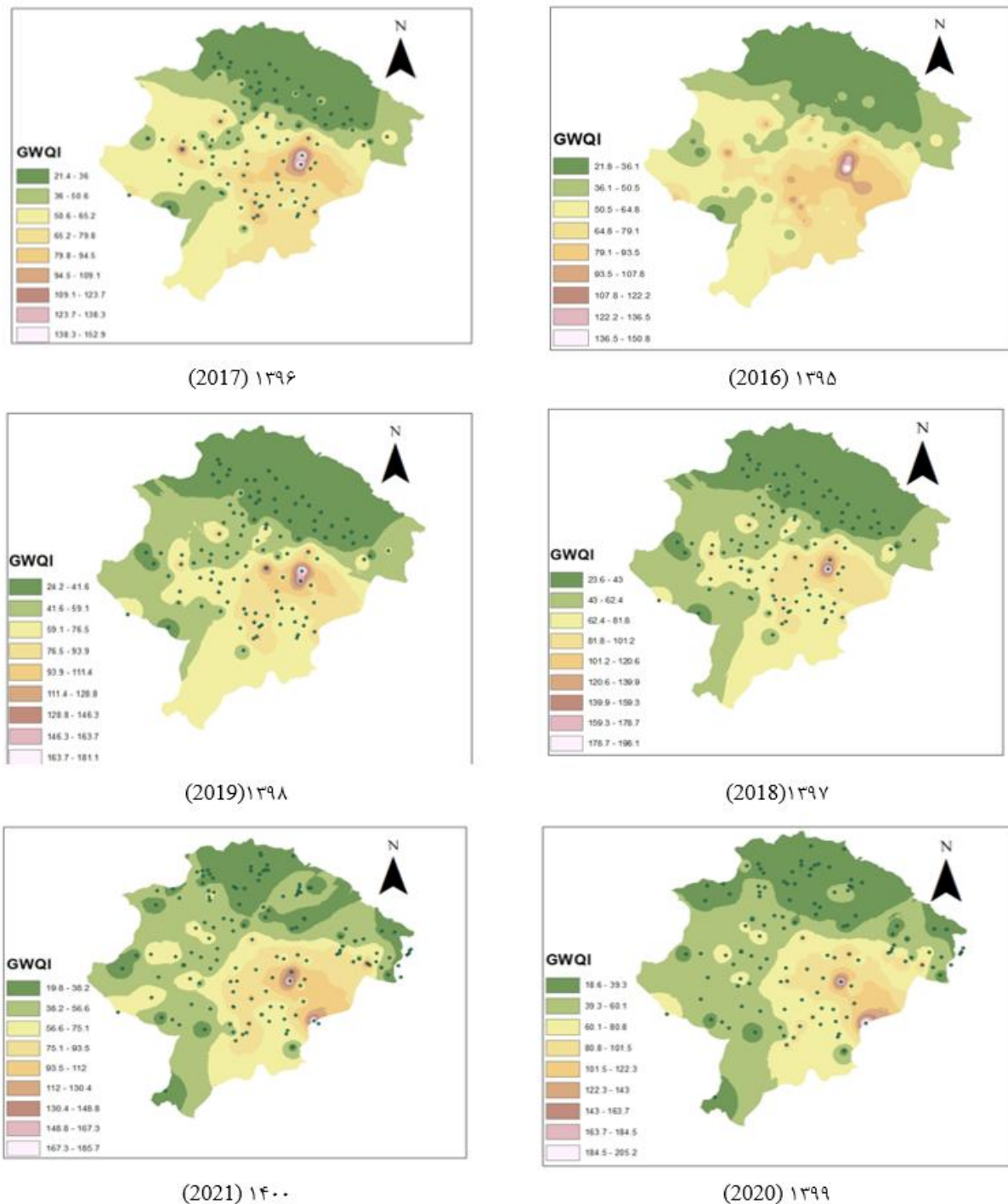
(2012) ۱۳۹۱



(2015) ۱۳۹۴



(2014) ۱۳۹۳



شکل ۵. نقشه پهنه بندی GWQI با استفاده از درونیابی IDW
 Fig 5. GWQI Zoning Map Using IDW Interpolation

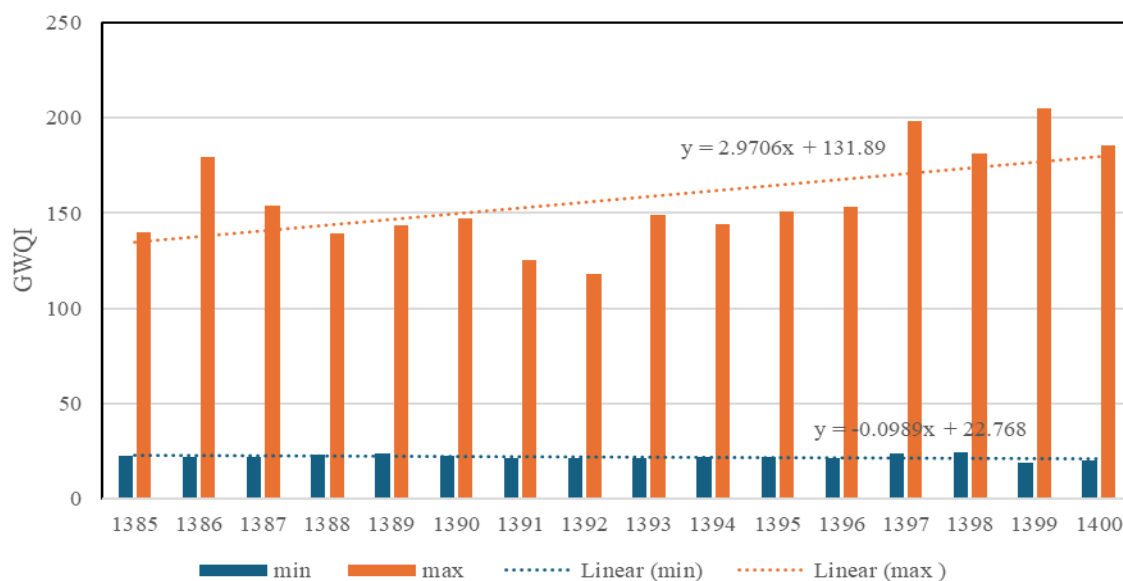
مقادیر حداکثری شاخص با یک شیب زیاد از سال ۱۳۸۵ تا ۱۴۰۰ در حال افزایش است. این افزایش نشان دهنده تزریق زیاد آلودگی در آبخوان در سال‌های اخیر است. شایان ذکر است مطابق شکل ۶ الف مقدار حداکثری شاخص تا سال ۱۳۹۲ روندی نزولی داشته و از آن به بعد

تحلیل روند تغییرات GWQI

برای مقایسه بهتر تغییرات و تشخیص دقیق‌تر روند تغییرات، چهار آماره حداقل، حداکثر، میانگین و انحراف معیار شاخص GWQI در سال‌های مورد بررسی محاسبه و در شکل ۶ آورده شده است. همانطور که دیده می‌شود

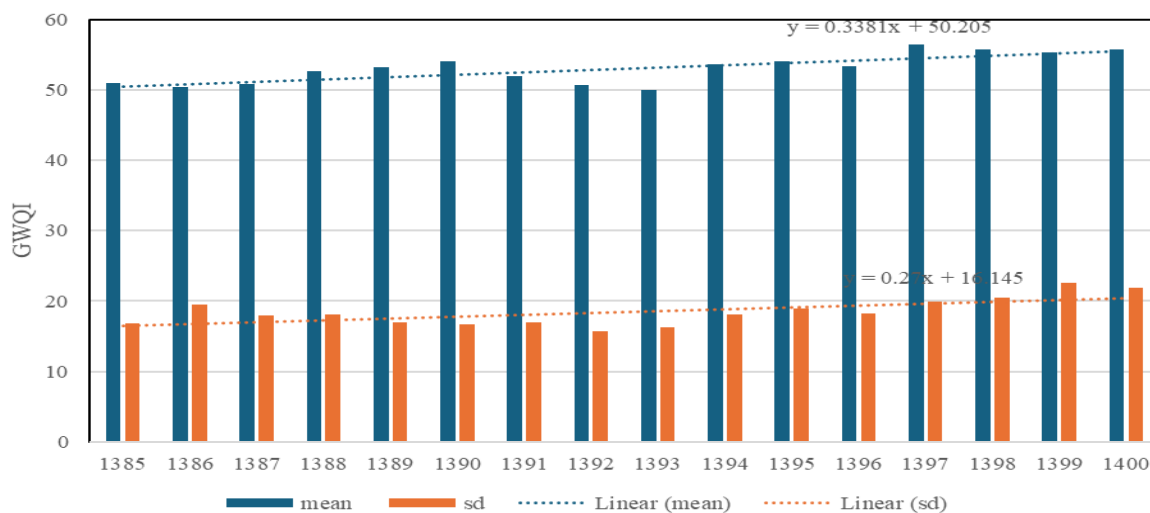
ترازهای بالای آبخوان و کمتر شدن فعالیت‌های انسانی و کشاورزی در نواحی شمالی منطقه مطالعاتی باشد. همانطور که در جدول ۲ آمده است شاخص GWQI کمتر از ۱۰۰ نشان دهنده کیفیت مناسب آب برای استفاده در بخش شرب می‌باشد.

شروع به افزایش نموده است. مشاهده می‌شود که بیشترین مقدار شاخص مربوط به سال ۱۳۹۹ است که مقدار شاخص ۲۰۵ رسیده است. واضح است ادامه این روند تا ۱۰ سال آینده می‌تواند حداکثر شاخص را به ۲۳۵ برساند. از طرفی مقدار حداقلی شاخص با شیب کمی روندی نزولی دارد که می‌تواند به دلیل تخلیه آبخوان در



الف

a



ب

b

شکل ۶. تغییرات زمانی مهم‌ترین شاخص‌های آماری GWQI در سال‌های ۱۳۸۵ تا ۱۴۰۰ (الف) مقادیر حداکثری و حداقلی و (ب) میانگین و انحراف معیار

Fig 6. Temporal Changes in Main Statistical Indices of GWQI From 2006 to 2021 a) Minimum and Maximum Values b) Mean and Standard Deviation

معیار بیشتر باشد نشان‌دهنده حدود تغییرات بیشتر و بالعکس هر چه کمتر باشد به معنای حدود تغییرات کمتر شاخص است. با این توصیف با توجه به روند افزایشی انحراف معیار، می‌توان به این نتیجه رسید که با گذشت زمان باند تغییرات مقادیر شاخص GWQI رو به افزایش است و تنوع مقادیر شاخص در دشت قزوین رو به افزایش است.

نتایج آزمون من کندال

آزمون من کندال برای بررسی وجود روند در سری داده زمانی به کار می‌رود. نتایج آزمون روند در این تحقیق به صورت شکل ۷ می‌باشد:

در شکل ۶ ب مقادیر متوسط و انحراف معیار شاخص GWQI در سال‌های ۱۳۸۵ تا ۱۴۰۰ نشان داده شده است. همانطور که دیده می‌شود، مقدار میانگین شاخص مشابه مقادیر حداکثری، روندی صعودی دارد. این آماره در سال ۱۳۸۵ حدود ۵۱ بوده و در سال ۱۴۰۰ به بیش از ۵۵ رسیده است. این افزایش نشان می‌دهد که وضعیت کیفی دشت قزوین رو به وخیم‌تر شدن است و باید تمهیداتی برای کنترل آلودگی‌های آبخوان اندیشه شود. در صورت ادامه روند فعلی هر ۱۰ سال ۳/۴ واحد به شاخص GWQI افزوده می‌شود.

به علاوه نمودار شکل ۶ ب حاوی روند تغییرات انحراف معیار شاخص است. این آماره پراکندگی مقدار شاخص GWQI را اطراف میانگین نشان می‌دهد. هر چه انحراف



شکل ۷. روند ۱۵ ساله GWQI بر اساس آزمون من کندال

Fig 7.A 15-Year Trend of GWQI According to Mann Kendall Test

داری ۱/۹۶ و ۲/۲۷۵ نبوده است. همچنین طبق جدول ۴ نیز فرض عدم وجود روند اثبات می‌شود البته یک روند ضعیف صعودی را می‌توان برای شاخص کیفی متصور شد.

تحلیل من کندال نشان داد که در طول دوره مطالعه هیچ‌گونه روندی در شاخص کیفی مشاهده نشد. زیرا قدر مطلق Z در هیچ زمانی بالاتر یا پایین‌تر از محدوده معنی

جدول ۴. تغییرات متوسط زمانی GWQI

Table 4. Temporal Variation of The Average of GWQI

سال	1385	1386	1387	1388	1389	1390	1391	1392	1393	1394	1395	1396	1397	1398	1399	1400
year	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
GWQI	54.4	52.5	51.1	54.2	54.9	55.8	53.8	51.6	51.2	53.7	54.7	54.4	58.9	56.9	55.8	54.1

بحث

در این مطالعه، هدف اصلی ارزیابی تغییرات فضایی-زمانی کیفیت آب زیرزمینی در آبخوان قزوین با استفاده از شاخص کیفیت آب زیرزمینی (GWQI) و تحلیل روند تغییرات کیفیت آب در دوره زمانی ۱۵ ساله (۱۳۸۵-۱۴۰۰) بود. نتایج نشان‌دهنده تغییرات قابل توجه در کیفیت آب و توزیع فضایی آن بود که به‌طور مستقیم تحت تأثیر عواملی همچون تغییرات اقلیمی و فعالیت‌های انسانی قرار دارد. این یافته‌ها با مطالعات مشابه در سایر نقاط ایران، از جمله مناطق شهری و مناطق کشاورزی، تطابق دارد. تحلیل روند شاخص GWQI با استفاده از آزمون من کندال هیچ روند معناداری را در طول ۱۵ سال نشان نداد، که نشان‌دهنده تغییرات نسبتاً پایدار کیفیت آب بود، گرچه نوسانات قابل توجهی مشاهده شد. این نتایج مشابه با مطالعات (Adepelumi et al (2007 است که بر تأثیرات مهم فعالیت‌های شهری و کشاورزی بر کیفیت آب زیرزمینی تأکید داشت. اگرچه کیفیت آب در طول زمان کمی کاهش یافته است، اما روند مشخصی مشاهده نمی‌شود که می‌تواند به دلیل تغییرات اقلیمی و مدیریت منابع آب متغیر باشد.

با این حال، در مقایسه با نتایج (Soleimani et al (2013 و (Eslami et al (2016، مشهود است که مناطق با سطح بالای صنعتی شدن و فعالیت‌های کشاورزی، مانند منطقه آبخوان قزوین، در معرض کاهش کیفیت آب در طول زمان قرار دارند. این مسئله در مطالعات (Faryabi and Shojaheidari (2019 نیز مشاهده شد که نشان‌دهنده بدتر شدن کیفیت آب زیرزمینی به‌ویژه در مناطق استفاده‌کننده از آب برای شرب است. تغییرات بلندمدت در توزیع فضایی پارامترهای کیفیت آب به نوسانات فصلی و بین‌سالی اقلیمی مربوط می‌شود که بر کمیت و کیفیت بارش تأثیر می‌گذارند. افزایش دما و الگوهای بارش نامنظم، همان‌طور که در (Barani and Karami (2019

ذکر شده، نقش کلیدی در توزیع فضایی کیفیت آب در آبخوان قزوین دارند. افزایش دما همراه با خشکسالی‌های دوره‌ای باعث کاهش تغذیه آبخوان و در نتیجه افزایش غلظت آلاینده‌های خطرناک می‌شود.

نتایج این مطالعه با یافته‌های (Gong et al (2014 و (Khouni et al (2021 مطابقت دارد که از روش‌های مبتنی بر GIS برای ارزیابی کیفیت آب در مناطق مختلف استفاده کردند. این مطالعات نشان دادند که روش‌های درون‌یابی مبتنی بر GIS، مانند روش درون‌یابی معکوس فاصله (IDW)، در شبیه‌سازی تغییرات فضایی کیفیت آب بسیار مؤثر هستند. در این مطالعه نیز از روش IDW برای ایجاد نقشه‌هایی با دقت بالا در مورد توزیع کیفیت آب استفاده شده است که مشابه نتایج مطالعات قبلی است.

در حالی که روند تغییرات کیفیت آب در قزوین نشان‌دهنده برخی نوسانات منطقه‌ای بود، به‌طور کلی افزایش شاخص GWQI در منطقه نشان‌دهنده احتمال وجود آلودگی است. این مسئله به‌ویژه در نواحی با افزایش بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی مشهود است که به تدریج کیفیت آب را کاهش می‌دهد.

یافته‌های این مطالعه نشان‌دهنده اهمیت پایش کیفیت آب در مناطقی است که استفاده زیادی از منابع آب دارند، مانند آبخوان قزوین. با توجه به روندهای مشاهده‌شده، نیاز به استراتژی‌های بهبود مدیریت منابع آب بیشتر از پیش احساس می‌شود. این استراتژی‌ها باید شامل پایش مداوم و اقدامات پیشگیرانه برای کنترل آلودگی‌ها باشد. این اقدامات شامل مدیریت بهتر رواناب‌های کشاورزی، بهبود مدیریت زباله‌ها و استفاده از شیوه‌های پایدار مصرف آب است. همان‌طور که در مطالعه (Fazelifard (2022 ذکر شده، ترکیب بین بینش‌های ژئوشیمیایی و شاخص‌هایی مانند GWQI اطلاعات ارزشمندی برای تصمیم‌گیرندگان فراهم می‌آورد تا بتوانند روندهای آینده کیفیت آب را پیش‌بینی کرده و اقدامات مناسبی برای حفاظت از این

منابع

- Adepelumi, A., Ako, B.D., Ajayi, T.R., Afolabi, O. & Omotoso, E.J. (2007). Delineation of saltwater intrusion into the freshwater aquifer of Lekki Peninsula, Lagos, Nigeria, *Environ. Geol.*, 56(5), 927-933. <https://doi.org/10.1007/s00254-008-1194-3>.
- Alijani, B., Mahmoudi, P. & Chogan, A. (2012). A Study of Annual and Seasonal Precipitation Trends in Iran Using a Nonparametric Method (Sen's Slope Estimator), *Journal of Climate Research*. 3(9), 106-105. SID. <https://sid.ir/paper/401943/en>. (In Persian)
- Barani, N. & Karami, A. (2019). Annual trend analysis of climate parameters of temperature and precipitation in decuple agroecology regions of Iran, *Environmental Sciences* 17(4), 75-90. <https://doi.org/10.29252/envs.17.4.75>. (In Persian)
- Dashti, M., Rezaie, M. & Saberi Nasr, A. (2013). Evaluation of groundwater quality index in the Lenjanat Aquifer using geographic information system, *Journal of Geology Engineering*. 8(2), 2121-2138. <http://jeg.khu.ac.ir/article-1-416-en.html>. (In Persian)
- El-Zeiny, A.M. & Elbeih, S.F. (2019). GIS-based evaluation of groundwater quality and suitability in Dakhla Oases, Egypt, *Earth Syst. Environ.*, 3, 507-523. <https://doi.org/10.1007/s41748-019-00112-1>.
- Eslami, F., Shokoohi, R., Mazloomi, S., Darvish Motevalli, S. & Salari, M. (2016). Evaluation of Water Quality Index of Groundwater Supplies in Kerman Province, *Journal of Occupational and Environmental Health*. 3(1), 48-58. <https://hsenk.ir/?p=8178>. (In Persian)
- Faryabi, M. & Shojahedari, R. (2019). Assessment of Groundwater Quality of Jiroft plain for drinking water using Groundwater Quality Index. *Human and environment*, 1(60), 183-197. <https://sid.ir/paper/1043293/en>. (In Persian)
- Fazelifard, M. (2022). Assessment of aquifer vulnerability using meta-heuristic methods and GWQI index (case study: Varamin Aquifer, Tehran, Iran), MSc. dissertation. Water Resources Engineering, University of Tehran, Iran. (In Persian)
- Gong, G., Mattevada, S., & O'Bryant, S.E. (2014). Comparison of the accuracy of kriging and IDW interpolations in estimating groundwater arsenic concentrations in Texas, *Environ. Res.*, 130, 59-69. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2013.12.005>
- منبع حیاتی اتخاذ کنند. علاوه بر این، توسعه سیستم‌های هشدار زود هنگام مبتنی بر داده‌های اقلیمی، همان‌طور که در Zhou et al., (2024) مطرح شده است، می‌تواند به پیش‌بینی تغییرات عمده در کیفیت آب ناشی از تغییرات اقلیمی کمک کند.
- ### نتیجه‌گیری
- در این تحقیق شاخص کیفی GWQI در آبخوان قزوین بررسی گردید. برای این کار از داده‌های کیفیت آب زیرزمینی دشت از سال ۱۳۸۵ تا سال ۱۴۰۰ استفاده گردید. هدف از این مطالعه بررسی روند تغییرات شاخص کیفیت آب زیرزمینی در دشت قزوین و بررسی نقاط بحرانی در این روند تغییرات بوده است. برای این کار از آماره‌های مختلف حداکثر، حداقل، میانگین و انحراف معیار استفاده گردید و در نهایت از روش من کندال برای آزمون نقطه شکست سری زمانی استفاده گردید. نتایج تحقیق نشان داد که حدود حداقلی شاخص کیفی GWQI در پهنه دشت قزوین از ۱۸/۶ در سال ۱۳۹۹ تا ۲۴/۲ در سال ۱۳۹۸ تغییر می‌کرد. همچنین محدوده تغییرات میانگین شاخص از ۴۹/۹ در سال ۱۳۹۳ تا ۵۵/۷ در سال ۱۳۹۸ بوده است و حداکثر مقدار شاخص در دشت قزوین از ۱۱۸/۱ در سال ۱۳۹۲ تا ۲۰۵/۲ در سال ۱۳۹۹ تغییر کرده است. نتایج نشان داد که محدوده‌هایی که مینیمم GWQI را به خود اختصاص داده‌اند، عمدتاً از شمال تا جنوب غرب گسترش داشته و محدوده‌هایی با بیشینه شاخص، در قسمت شرقی متمایل به مرکز قرار دارند. بررسی روند ۲۰ ساله نشان داد که مقادیر حداکثر و متوسط GWQI در پهنه دشت قزوین، روندی صعودی داشته و شیب افزایش مقادیر حداکثری بسیار بالاست به طوریکه هر ۱۰ سال به‌طور متوسط ۳۰ واحد به شاخص GWQI اضافه شده است و با ادامه این روند تا سال ۱۴۱۰ انتظار است این مقدار به ۳۲۵ واحد افزایش یابد.

- Gong, G., Mattevada, S., & O'Bryant, S.E. (2014). Comparison of the accuracy of kriging and IDW interpolations in estimating groundwater arsenic concentrations in Texas, *Environ. Res.*, 130, 59-69. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2013.12.005>
- Hoseini, S.Z., Shahidi, A. & Hanafi, H. (2024). Investigating Spatial and Temporal Changes of Quantitative Parameters of Underground Water Resources Using Inverse Distance Weighting Interpolation Method (Case Study: Mashhad Plain), *Journal of Aquifer and Qanat*, 4(2), 103-114. <https://doi.org/10.22077/jaaq.2024.7330.1064>. (In Persian)
- Kaheh, M., Kardan Moghaddam, H., Ramezani, M. & Javadi, S. (2022), Evaluation of groundwater quality of aquifer based on agricultural consumption (Case study: Sari aquifer), *Journal of Aquifer and Qanat*, 3(2), 89-97. <https://doi.org/10.22077/jaaq.2019.1736.1009>. (In Persian)
- Kardan Moghaddam, H. & Akbarzadeh, A. (2025). Evaluating climatic periods in predicting subsidence rates using numerical modeling (Case study: Najafabad aquifer), *Eco Hydrology Journal*, 11(4), 511-526. <https://doi.org/10.22059/ije.2025.386827.1855>. (In Persian)
- Khouni, I., Louhichi, G. & Ghrabi, A. (2021). Use of GIS-based Inverse Distance Weighted interpolation to assess surface water quality: Case of Wadi El Bey, Tunisia, *Environmental Technology & Innovation*, 24, 101892. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101892>.
- Jodhani, K.H., Gupta, N., Dadia, S., Patel, H., Patel, D., Jamjareegulgarn, P., Singh, S K & Rathnayake, R. (2025). Sustainable groundwater management through water quality index and geochemical insights in Valsad, India, *Sci Rep.*, 15 (1), 8769. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-92053-1>.
- Mehrabinejad, A., Kalantari, N., Alijani, F., Mousavi, S.F., & Mohammadi, H. (2025). Nitrate Pollution of the Izeh Urban Aquifer: Health Risks and Local Management, *Journal of Aquifer and Qanat*, 5(2), 203-220. <https://doi.org/10.22077/jaaq.2025.9299.1111>. (In Persian)
- Mirzaei, R. & Sakizadeh, M. (2016). Comparison of interpolation methods for the estimation of groundwater contamination in Andimeshk-Shush Plain, Southwest of Iran, *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 23(3), 2758-2769. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-5507-2>. (In Persian)
- Mirzavand, M., Sadatinejad, S.J. & Kardan Moghaddam, H. (2025). Assessment of Groundwater Quality Affected by Saltwater Intrusion and Theoretical Mixing Ratio Calculation of Saline and Fresh Groundwater, *Journal of Aquifer and Qanat*, 5(2), 63-78. <https://doi.org/10.22077/jaaq.2025.9007.1102>. (In Persian)
- Modou M., EL Hammoudani Y., Dimane F., Haboubi K., Achouki I., EL Boudamoussi M., Faiz H. et Touzani A. (2024). Application of the water quality index (IQEs) to assess the quality of groundwater in the Ghiss-Nekkour aquifer, Al-Hoceima, Northern Morocco. *BIO Web of Conferences* 109, 01018 (2024).
- Mohammadi, B. (2010). Trend Analysis of annual rainfall over Iran. *Journal of Geography and Environmental Planning.* 22(3), 95-106. <https://doi.org/20.1001.1.20085362.1390.22.3.6.1>. (In Persian)
- Moradzadeh, M. & Pourhosein, H. (2024). Assessment of Sudden Drought and Flood Occurrence (Case Study of the Karun River Basin). *Environmental Sciences Studies*. 9(4), 9379-9389. <https://doi.org/10.22034/jess.2024.433131.2201>. (In Persian)
- Noori, R., Hooshyaripor, F., Javadi, S., Dodangeh, M., Tian, F., et al. (2020). PODMT3DMS-Tool: Proper orthogonal decomposition linked to the MT3DMS model for nitrate simulation in aquifers, *Hydrogeology Journal* 28 (3), 1125-1142. <https://doi.org/10.1007/s10040-020-02114-0>.
- Ostovari, Y., Beigi-Harchegani, H. & Davooudian, A. (2014). Assessment of Groundwater Quality Index (GWQI) and its Geostatistical Analysis in Lordegan Plain Aquifer. *J. Env. Sci. Tech.*, 19(2), 227-238. <https://www.magiran.com/p1804345>. (In Persian)
- Panhalakr, S.S. & Jarag, A.P. (2016). Assessment of spatial interpolation techniques for river bathymetry generation of Panchganga River basin using geoinformatic techniques, *Asian J. Geoinform.*, 15(3), 9-15.
- Paul, R., Brindha, K., Gowrisankar, G., Tan, M.L. & Singh, M.K. (2019). Identification of hydrogeochemical processes controlling groundwater quality in Tripura, Northeast India using evaluation indices, GIS, and multivariate statistical methods, *Environ. Earth Sci.*, 78(15), 470. <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8479-6>.
- Pouramini, T., Fotouhi Firoozabad, F., & Barkhordari, J. (2024). Performance Investigation of Flood Spreading System on the Groundwater Quality, *Environ. Water Eng.*, 10(2), 212-226. <https://doi.org/10.22034/ewe.2023.409401.1883>
- Qiao, P., Lei, M., Yang, S., Yang, J., Guo, G. & Zhou, X. (2018). Comparing ordinary kriging and

- inverse distance weighting for soil as pollution in Beijing, Environ. Sci. Pollut. Res., 25, 15597-15608. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-1552-y>.
- Salarijazi, M., Ahmadianfar, I. & Yaseen, Z.M. (2024). Prediction enhancement for surface water sodium adsorption ratio using limited inputs: Implementation of hybridized stacked ensemble model with feature selection algorithm, Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 134, 103561. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2024.103561>.
- 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). Journal of Water and Soil. 35(6), 791-804. <https://doi.org/10.22067/jsw.2021.71571.1073>. (In Persian)
- Shuaibou, A., Kalin, R.M., Phoenix, V., Banda, L.C. & Lawal, I.M. (2024). Hydrogeochemistry and Water Quality Index for Groundwater Sustainability in the Komadugu-Yobe Basin, Sahel Region, Water, 16(4), 601. <https://doi.org/10.3390/w16040601>.
- Shanmugam, P. & Ambujam, N.K. (2012). A Hydrochemical and Geological Investigation on the Mambakkam Mini Watershed, Kancheepuram District, Tamil Nadu. J. Environmental Monitoring and Assessment May, 184(5), 3293-306. <https://doi.org/10.1007/s10661-011-2189-1>.
- Soleimani, S., Mahmoodi Gharaie, M.H., Ghasemzadeh, F. & Sayareh, A. (2013). Investigation on Water Resources Quality by Application of GQI Index and GIS in the West of Kooch-Sorkh. Earth science, 23(89), 175-182. <https://doi.org/10.22071/gsj.2013.53601>. (In Persian)
- Turgay, P. & Ercan, K. (2005). Trend Analysis in Turkish Precipitation Data. Hydrological processes, 29(9), 2011-2026. <https://doi.org/10.1002/hyp.5993>.
- WHO (World Health Organization) (2017). Guidelines for drinking-water quality: small water supplies, fourth edition incorporating the first and second addenda, <https://www.who.int/publications/i/item/9789240045064>
- Zhou, X., Leng, Y., Salarijazi, M., Ahmadianfar, I. & Farooque, A.A. (2024). Development of forecasting of monthly SAR time series in river systems: A multivariate data decomposition-based hybrid approach, Process Safety and Environmental Protection, 188, 1355-1375. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2024.06.050>

