

Research Article

Evaluation of groundwater resources in Varzeqan City by introducing unsupervised combination method to determine the categories of drinkability

 Zahra Sedghi¹, Ata Allah Nadiri^{1*}

1- Natural Sciences Faculty, Tabriz University, Tabriz

Keywords: GWQI, GQI, Unsupervised method, Drinking water, WHO, ISIRI, Varzeqan plain

1- Introduction

The ecological, economic, and social potential of large and large uses is influenced by the quantity and quality of the waters. Therefore, appropriate methods of surface water and groundwater have been investigated qualitatively and quantitatively and used results in assessing the power of the land. One of the crucial factors for sustainable development is the available water resources for different uses, considering the quality. Therefore, investigations of the spatial variations of GQI and GWQI are significant in determining the best management program. The purpose of this study was to evaluate the quality of drinking water resources in the Varzeqan watershed using the GWQI, GQI index and to, introduce an unsupervised method (weight averaging), also to compare the results of 3 methods used to evaluate the water quality of Varzeqan alluvial plain and select the best method with determining the quality category of drinking water.

2- Materials and methods

2-1- Hydrogeological characteristics of the study area

Ahar Chay drains Varzeqan plain and receives a significant number of tributaries before it falls to Qarasu (black water) approximately 50 km east of Ahar, and this is a tributary of the River Araz flowing through the Republic of Azerbaijan before it falls to the Caspian Sea. A Pliocene conglomerate covers the plain and the bedrock of the aquifer. The aquifer is recharged by seasonal rivers flowing and snowmelts at the northern mountain ranges known (as Qara Dagh) and southern mountain ranges (Ala Dagh). The Sattarkhan hydroelectric dam embanks ahar Chay just outside of Varzeqan plain at its east. There is also a tailing dam to the north of Ahar alluvial plain impounding the Sungun Copper Mines' wastewater. The groundwater flow direction coincides with the surface water flow direction from west to east.

2-2- GWQI

The groundwater quality index (GWQI) method reflects the composite influence of the different water quality parameters on the suitability for drinking purposes (Stigter et al., 2006). As a pre-processing to calculate GWQI, different weights (w_i) were assigned to each chemical parameter in the range of 1 to 5 (minimum and maximum effects on water quality) based on their perceived effects on primary health and relative importance in the drinking water quality.

$$GWQI = \sum SI_i = \sum (w_i \times q_i) = \sum \left(\left(\frac{w_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \right) \times \left(\frac{C_i}{S_i} \times 100 \right) \right) \quad (1)$$

2- 3- GQI

Computation of GQI, as defined, involves three steps: (i) calculating contamination index (C) for the annual mean values of every parameter by relating its value with WHO prescribed limit, (ii) rating C between 1 and 10

* Corresponding author: nadiri@tabrizu.ac.ir

DOI: 10.22055/AAG.2021.35265.2169

Received 2020-10-02

Accepted 2021-01-24

by generating rank (R), and (iii) computing GQI using ranks (R) and relative weights (W) of every parameter using the following equations (Babiker et al., 2007):

$$C = (X_r - X) / (X_r + X) \quad (2)$$

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

$$GQI = 100 - ((r_1w_1 + r_2w_2 + \dots + r_nw_n) / n) \quad (4)$$

2-4- Hydrochemical data

Thirty-nine (39) samples were collected from springs, qanats, and water wells distributed over the study area (Nadiri et al., 2017c, 2018a; 2018b). The groundwater samples were analyzed in the hydrogeological laboratory at the University of Tabriz and the East Azerbaijan Regional Water Authority laboratory. For many parameters such as pH, Electric Conductivity (EC), Total Hardness (TH), Bicarbonate (HCO_3^-), Chloride (Cl^-), Sulfate (SO_4^{2-}), Calcium (Ca^{+2}), Magnesium (Mg^{+2}), Sodium (Na^+), Potassium (K^+), and minor elements such as nitrate (NO_3^-), Fluoride (F^-), and trace elements such as Arsenic (As) by standard methods (APHA, 2012). Analysis accuracy was checked for charge balance for the water samples. The charge balance values for all the samples were <5%. Therefore, the analysis results were reliable. According to the analysis results, the samples measured nitrate, fluoride, and arsenic levels higher than the WHO standard (World Health Organization, 2008; EPA, 2003). The WHO standard for nitrate, Fluoride and Arsenic elements, respectively, were 1.5 and 50 and 0.01 ppm.

2-5- Unsupervised method (DSGM)

The unsupervised method combines the results of the Indicators mentioned above, including GQI and GWQI, through Eq. 5 as follows,

$$\text{Unsupervised Method} = \frac{CI_{\text{As-NO}_3} \times GQI + CI_{\text{As-NO}_3} \times GWQI}{\sum CI_i} \quad (5)$$

GQI and GWQI are the spatial distribution of the groundwater quality index, CI_i represents the correlation between anomalies (nitrate-arsenic) and groundwater quality index, and the unsupervised method is the groundwater quality index obtained by the combined strategy. Notably, a method with a higher Correlation Index (CI) gives a higher weight. In this combination, the groundwater quality index's spatial distribution for these indicators must be obtained over the same period. For this purpose, the results of the groundwater quality indicators between 0 and 1 are normalized by the following equation:

$$X_{\text{norm}} = \frac{X_i - X_{\text{min}}}{X_{\text{max}} - X_{\text{min}}} \quad (6)$$

Where X_{norm} is the normalized groundwater quality index, and X_{max} and X_{min} are the highest and lowest rates of groundwater quality, respectively.

3- Results and discussion

Based on the GQI index results, the GQI index's value varies numerically in the range of 58 to 82. According to this range of numbers, the study area's groundwater is classified as poor, good and excellent quality in terms of drinking water standards. On the other hand, according to the GWQI index results, numerical values fluctuate in the range of 35 to 272 and are in 4 categories of water unsuitable for drinking, very poor, poor, and good. Due to the commonalities in the calculation mechanism and having the same parameters for these two indicators, both presented different results, making it difficult to choose one of these two as a superior indicator in evaluating the quality of drinking water in Varzeqan City. Therefore, in this study, more acceptable results were obtained, confirmed according to the validation performed by introducing and using the unsupervised combination method. As a result, according to the GQI, GWQI index, and the unsupervised combination method, the best method for determining the region's drinking water quality categories is the unsupervised combination method.

3-1- Validation

The correlation coefficient between groundwater quality maps and nitrate-arsenic data was calculated to determine more accurately and compare the indicators and methods presented in this study. The unsupervised method has the highest correlation coefficient and exhibits better performance.

4- Conclusions

Developing drinking water quality indicators is expected to quickly identify places with the highest and lowest efficiency in an area for drinking purposes. This study uses the results of laboratory analyses obtained for 39 samples of groundwater sources with 13 parameters. It considers the guidelines of the World Health Organization (WHO) and the Industrial Research Organization of Iran (ISIRI, 2009) criteria using two common and practical indicators, GQI and GWQI, the quality categories of groundwater resources in terms of drinking were determined. The output map was obtained for both indicators by determining the quality categories of drinking water. However, despite the commonalities in calculating both indicators, different results were obtained with different categories to drink groundwater resources in Varzeqan City. Therefore, it was not possible to select one of these two indicators for water resources in the region to determine the quality categories of drinking water. As a result, for the first time in this study, the unsupervised combination method was introduced to determine the drinking water quality categories of the region more accurately. The unsupervised method provided a more accurate output than the previous maps, combining the two mentioned indicators' results. It shows a more significant correlation (CI) with areas with anomalies affecting (nitrate-arsenic) residents' health.

References

- APHA, 2012. Standard methods for the examination of water and wastewater, 22nd edn. American Public Health Association, Washington, DC.
- Babiker, I.S., Mohamed, M.A.A., Hiyama, T., 2007. Assessing ground water quality using GIS. *Water Resources Management* 11, 669 – 715.
- ISIRI, 2009. Drinking water, Physical and chemical properties. Institute of Standards and Industrial Research of Iran 1053.
- EPA, 2003. Standard Operating Procedure for Groundwater Sampling. New England. The Office of Environmental Measurement and Evaluation.
- Nadiri, A.A., Sedghi, Z., Kazemian, N., 2018a. Optimization of DRASTIC method using ANN to evaluating of vulnerability of multiple Varzeqan. *Iranian journal of Ecohydrology* 4, 1089-1103 (In Persian).
- Nadiri, A.A., Sedghi, Z., Khatibi, R., Gharekhani, M., 2017c. Mapping vulnerability of multiple aquifers using multiple models and fuzzy logic to objectively derive model structures. *Science of The Total Environment* 593-594, 75-90.
- Nadiri, A.A., Sedghi, Z., Khatibi, R., Sadeghfam, S., 2018b. Mapping specific vulnerability of multiple confined and unconfined aquifers by using artificial intelligence to learn from multiple DRASTIC frameworks. *Journal of Environmental Management* 227, 415-128.
- Stigter, T.Y., Ribeiro, L., Carvalho, A.M.M., 2006. Application of a groundwater quality index as an assessment and communication tool in agro-environmental policies – Two Portuguese case studies. *Journal of Hydrology* 327, 578-591.
- WHO (World Health Organization), 2008. Guidelines for Drinking Water Quality, Second addendum 1, Recommendations, 3rd ed., p. 1-515.

HOW TO CITE THIS ARTICLE:

Sedghi, Z., Nadiri, A.A., 2022. Evaluation of groundwater resources in Varzeqan City by introducing unsupervised combination method to determine the categories of drinkability. *Adv. Appl. Geol.* 12(1), 58-74.

DOI: 10.22055/AAG.2021.35265.2169

url: https://aag.scu.ac.ir/article_16791.html

ارزیابی کیفیت منابع آب زیرزمینی شهرستان ورزقان با معرفی روش ترکیب غیرنظارت شده برای تعیین رده-

های قابلیت شرب

زهرا صدقی

دانشجوی دکتری هیدروژئولوژی، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز

عطاالله ندیری*

دانشیار گروه علوم زمین، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۷/۱۱ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۱/۵

*nadiri.ata@gmail.com

چکیده

با توجه به انجام فعالیت‌های کشاورزی و معدنی گسترده و همچنین وجود آنومالی‌های نیترات و آرسنیک در دشت ورزقان و وابسته بودن آب شرب این منطقه به منابع آب زیرزمینی، ارزیابی کیفیت آب زیرزمینی از لحاظ شرب بسیار ضروری است. بدین منظور نتایج آنالیز منابع آب زیرزمینی دشت ورزقان در ۳۹ نقطه نمونه برداری با احتساب ۱۳ پارامتر موثر برای ارزیابی قابلیت شرب با جامع‌ترین سری پارامترها شامل عناصر اصلی، ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی، عناصر فرعی و کمیاب برای تعیین کیفیت آب شرب استفاده شد که در نتیجه بررسی‌ها از منظر ریسک سلامت مصرف‌کنندگان این منابع آبی و با توجه به استانداردهای سازمان بهداشت جهانی (WHO) و استاندارد تحقیقات صنعتی ایران (ISIRI)، تاثیرگذارترین این پارامترها در بحث کیفیت آب شرب، نیترات و آرسنیک است. در این پژوهش برای ارزیابی از شاخص‌های GQI و GWQI استفاده شد و با توجه به نقشه‌های خروجی این دو شاخص که نشان از تفاوت در تعیین رده‌های کیفیت آب شرب منطقه است، انتخاب یکی از این دو شاخص برای تعیین قابلیت شرب منابع آبی منطقه ممکن نبود در نتیجه برای اولین بار در این پژوهش با توجه به تفاوت موجود در خروجی‌های دو شاخص استفاده شده، جهت دستیابی به یک نقشه واحد که به‌طور دقیق‌تری بیان‌کننده رده‌های کیفیتی آب شرب منطقه باشد، روش ترکیب غیرنظارت‌شده معرفی و استفاده شد. نتایج پژوهش گویای این است که *unsupervised method* با داشتن CI بالاتر نسبت به نتایج دو شاخص ذکر شده، روش ایده‌آل تری برای ارزیابی کیفیت منابع آبی منطقه و تعیین صحیح‌تر رده‌های قابلیت شرب است.

کلمات کلیدی: شاخص کیفیت آب زیرزمینی، روش غیرنظارت شده، آب آشامیدنی، سازمان بهداشت جهانی، سازمان استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران، دشت ورزقان

مقدمه

افزایش روز افزون آلاینده‌های شیمیایی شهری، صنعتی و شیوه‌های نوین کشاورزی تهدیدی جدی برای تنزل کیفیت منابع آب آشامیدنی به حساب می‌آیند. کیفیت آب از مهم‌ترین عواملی است که می‌بایست به هنگام تدوین سیاست‌های توسعه مناسب یک منطقه، در نظر گرفته شود (Cordoba et al., 2010). کیفیت آب زیرزمینی حاصل کلیه فرآیندها و واکنش‌هایی است که از زمان تشکیل قطرات آب در اتمسفر تا زمان برداشت از یک چاه یا خروج از یک چشمه، رخ می‌دهد (Todd, 1980). کیفیت آب زیرزمینی تا حد زیادی توسط فرآیندهای طبیعی (زمین‌شناسی)، فعالیت‌های انسانی (تولید محصولات کشاورزی، صنعتی، شهرنشینی) و ورودی اتمسفر مثل بارش کنترل می‌شود (Helena et al., 2000).

کیفیت آب زیرزمینی بیانگر اطلاعاتی در مورد ترکیب شیمیایی، بیولوژیکی، مقدار مواد محلول و درجه حرارت است. تعیین این مهم که آیا این آب به منظور مصارف آشامیدنی، کشاورزی و صنعت با توجه به عوامل مربوط به هر یک، مناسب است یا نه، بسیار اهمیت داشته و

آلودگی منابع آب زیرزمینی به علت نفوذ آلاینده‌ها از سطح زمین به سیستم آب زیرزمینی به خصوص در مناطق خشک و نیمه‌خشک که با کمبود منابع آب مواجه هستند یکی از معضلات جدی به شمار می‌آید. باتوجه به کاهش نزولات جوی، خشکسالی سال‌های اخیر و در نتیجه کمبود آب در پهنه وسیعی از کشور و افزایش میزان تقاضا برای مصارف مختلف، عدم شناخت صحیح و بهره‌برداری بی‌رویه از این منابع، خسارات جبران‌ناپذیری مانند کاهش کیفیت آب و مهم‌ترین مسئله مرتبط با کیفیت آب یعنی سلامتی مصرف‌کنندگان وارد شده است. طی سال‌های اخیر بیشتر بحث و بررسی‌های آب زیرزمینی در کشورهای صنعتی از مسائل و مشکلات تهیه آب به مسائل مرتبط با کیفیت آن تغییر یافته است. در نتیجه مصرفی بودن زندگی بشری، محیط‌های هیدروژئولوژیکی به طور پیوسته با افزایش مواد شیمیایی محلول در آب زیرزمینی مواجه شده است. با گذشت زمان، منابع آب شیرین سطح زمین در اثر فعالیت‌های بشری تنزل کیفیت پیدا کرده است (Freeze and Cherry, 1979).

یک منطقه وسیع برای استفاده و کاربری‌های خاص است. شاخص‌های کیفی متعددی که پارامترهای مختلف را با یکدیگر تلفیق و با معیارهای جهانی مقایسه می‌کنند، در بررسی تغییرات مکانی کیفیت آب زیرزمینی استفاده می‌شوند. محاسبه شاخص کیفی آب، مکانیسمی است که در آن برای سطح مشخص کیفیت آب زیرزمینی از یک بیان عددی استفاده می‌کند. از جمله شاخص‌ها که برای آنالیز کیفی آب از نظر شرب کاربرد دارد $GWQI$ و GQI است که امروزه این شاخص‌ها با توجه به قابلیت بالای آن در بیان و توصیف اطلاعات کیفی آب و همچنین به‌کارگیری پارامترهای مهم و تاثیرگذار در ارزیابی و مدیریت کیفیت آب زیرزمینی، در بسیاری از نقاط جهان مورد توجه و استفاده قرار می‌گیرد (Simoes et al., 2008). یک سوم جمعیت جهان از آب‌های زیرزمینی برای شرب استفاده می‌کنند؛ بنابراین بررسی و پایش کیفیت آب‌های زیرزمینی می‌تواند نقش مهمی در دستیابی به توسعه پایدار ایفا کند (Mosafieri et al., 2014). از مهمترین شاخص‌هایی که تاکنون توسط پژوهشگران برای ارزیابی کیفی آب استفاده شده است، عبارتند از: WQI (Lobato et al., 2015)، $NSFWQI$ (Giordani et al., 2009)، WQI_{min} (Terrado et al., 2014)، WQI_{moc} (Fernández-Cavia et al., 2014)، $GWQI^c$ (Hurley et al., 2010)، $OWQI^d$ (Tziritis et al., 2014) با توجه به شاخص‌های ارائه شده برای ارزیابی کیفیت آب شرب، $GWQI$ و GQI جز شاخص‌های پرکاربرد جهت پهنه‌بندی کیفی آب بوده که نسبت به سایر شاخص‌های ارزیابی کیفیت آب به دلیل سادگی و در دسترس بودن مشخصه‌های کیفی، توسط بیشتر محققین به‌کار گرفته شده است (Yidana et al., 2010). شاخص‌های $GWQI$ و GQI از نوع شاخص‌های با مقیاس کاهشی و افزایشی است یعنی با افزایش میزان آلودگی آب، مقدار آن‌ها به ترتیب افزایش و کاهش می‌یابد. هدف شاخص کیفیت آب، تبدیل داده‌های پیچیده کیفی آب به اطلاعات قابل درک و کاربردی است. شاخص کیفیت آب، مقدار زیادی از داده‌های پارامترهای شیمیایی، فیزیکی و بیولوژیکی آنالیز آب را با روشی ساده به یک عدد تبدیل می‌کند که مزیت اصلی آن است (Rajdeep and Singh, 2011). طی سال‌های گذشته، مطالعات زیادی در خصوص کیفیت منابع آب زیرزمینی و تحلیل و تفسیر آن صورت گرفته است. از جمله، Adimalla و همکاران (۲۰۱۹)، در طی پژوهشی به محاسبه شاخص کیفیت آب برای اهداف آشامیدنی، آبیاری و همچنین ارزیابی ریسک سلامتی منابع آبی جنوب هند پرداخته‌اند و نتایج آنالیزهای شیمیایی وجود غلظت‌های بالایی از فلوراید و نیترات را در منطقه نشان داده که ریسک سلامتی غیرسرطان‌زای مرتبط با این آنومالی‌ها را مورد بررسی

نیازمند مطالعات دقیق و جامعی در این زمینه است (Bouwer, 1978).

متأسفانه مسائل مربوط به تنزل کیفیت آب زیرزمینی در بیشتر موارد به سختی می‌تواند حل شود، به این دلیل که زمانی می‌توان به عوامل آلودگی پی برد که آثار آلودگی در چاه پمپاژ مشخص شود و سرعت کم آب زیرزمینی و ناهمگنی موجود در آبخوان‌ها موجب می‌شود که آشکارشدن مواد آلاینده خیلی دیر صورت گیرد. در واقع در دنیایی که پیش‌بینی شده میزان مصرف آب افزایش می‌یابد و کمبود آب به شدت محسوس است و وابستگی به استفاده مجدد از آب به یک روش معمول بدل خواهد شد؛ تعیین و پایش آلاینده‌های موثر بر کیفیت آب آشامیدنی ضروری است. کیفیت آب می‌بایست براساس متغیرهای فیزیکی و شیمیایی در ارتباط با استفاده از آب (شرب، صنعت، کشاورزی)، تعریف شده باشد. اگرچه مفهوم کیفیت آب زیرزمینی واضح به نظر می‌رسد، اما چگونگی بررسی و ارزیابی آن، نیاز به برخی ترفندها دارد (Babiker et al., 2007). ترکیب شیمیایی آب زیرزمینی، مقیاسی از تناسب آن به عنوان منبع آبی برای مصارف انسانی و حیوانی، آبیاری و برای اهداف صنعتی و ... را شامل می‌شود. بنابراین هدف تعریف کیفیت آب نیست؛ بلکه استفاده مطلوب از آب در جامعه مورد نظر متخصصان است (Elamassi, et al., 2012). براساس استانداردهای مختلف موجود، برای هر متغیر مقادیر قابل پذیرش و غیرقابل پذیرش تعریف شده است که اگر کیفیت آب از این استانداردها تجاوزکند؛ قبل از استفاده باید تصفیه شود (WHO, 2008). تعریف آلودگی آب از نظر سازمان بهداشت جهانی (WHO) عبارت است از وجود هر نوع ماده‌ای از قبیل گازها، ذرات معلق، مواد شیمیایی یا بیولوژیکی در آب و در واقع حالتی که تاثیر نامطلوب بر سلامت موجودات زنده بگذارد و مانع از استفاده مطلوب از آن گردد. بسیاری از ترکیبات شیمیایی پتانسیل آلودگی مشخصی داشته اما توسعه مستمر این ترکیبات جدید همراه با عدم آگاهی و درک ضعیف از کیفیت آب زیرزمینی مانع از مدیریت پایدار این منابع با ارزش در بسیاری از مناطق شده است (Mateo-Sagasta et al., 2017; Sorensen et al., 2015). جزئیات مقررات موجود یا فقدان آن برای محدودیت غلظت ترکیبات شیمیایی در آب زیرزمینی برای اکثر کشورها در دسترس است و دستورالعمل‌های مربوط به کیفیت آب آشامیدنی توسط سازمان بهداشت جهانی ارائه شده است (WHO, 2008). هدف اصلی بررسی‌های کیفی آب آشامیدنی حفظ بهداشت عمومی و سلامت مصرف کنندگان است. بر این اساس، باید ضمن فراهم نمودن آب کافی و در دسترس قرار دادن آن، نسبت به انطباق ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی با استانداردهای تدوین شده اقدام گردد (Terrado et al., 2010). یکی از راه‌های بررسی کیفیت آب‌های زیرزمینی از نظر قابلیت شرب، استفاده از شاخص‌های کیفی آب زیرزمینی است که قابلیت نمایش توزیع مکانی همزمان اثرات پارامترهای مختلف هیدروشیمی و آلودگی را بر کیفیت آب دارند. هدف از توسعه شاخص‌های کیفی عموماً تشخیص سریع و مناسب مکان‌هایی با بیشترین و کمترین مطلوبیت کیفیت آب در سطح

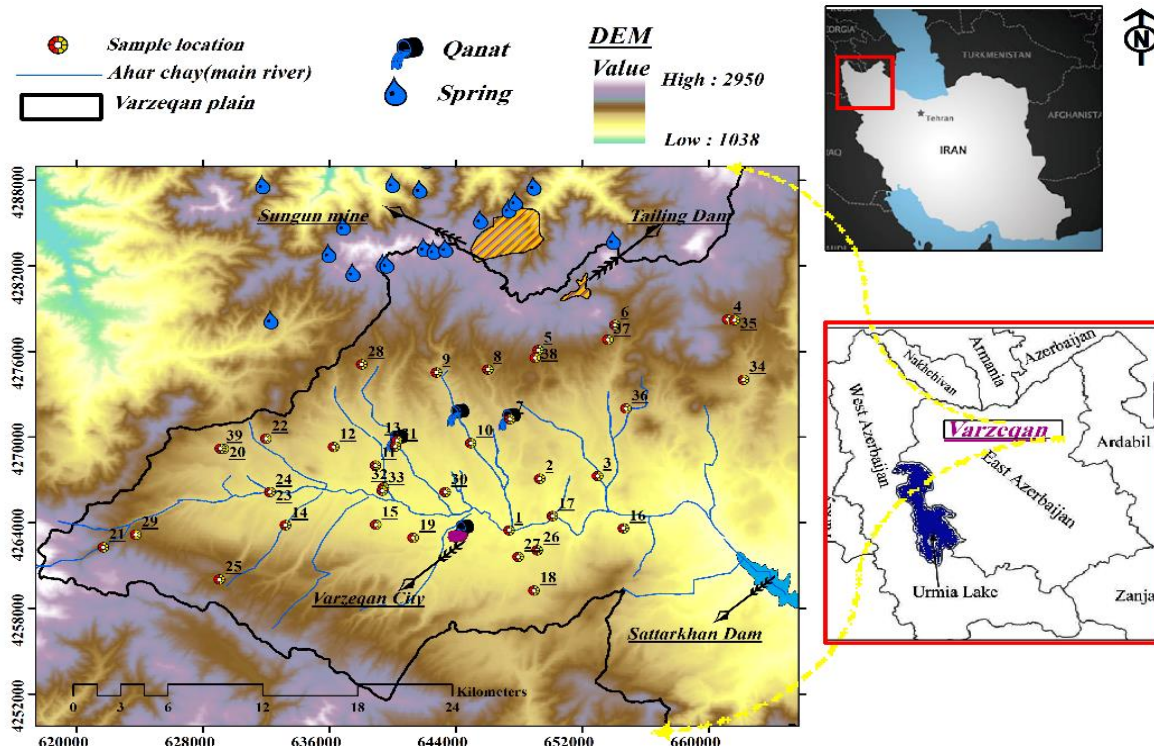
- 1- Water Quality Index
- 2- National Sanitation Foundation Water Quality Index
- 3- Water Quality with minimum subsidence
- 4- Water Quality with five subsidence
- 5- Oregon water quality index
- 6- Groundwater Quality Index

al., 2017c; Nadiri et al., 2018a; Nadiri et al., 2018b). اما با وجود مقادیر بالای آنومالی نترات و آرسنیک در منابع آبی این منطقه، پژوهشی در زمینه ارزیابی کیفیت منابع آب زیرزمینی با هدف تعیین رده‌های قابلیت شرب در منطقه مورد نظر انجام نشده و در واقع به تعیین شاخص کیفیت آب شرب برای این منابع مهم پرداخته نشده است. برای انجام این پژوهش علاوه بر نتایج آنالیزهای ۳۹ موقعیت نمونه‌برداری (چاه، چشمه و قنات)، از دستورالعمل‌های دو استاندارد سازمان بهداشت جهانی و سازمان تحقیقات صنعتی ایران نیز بهره‌برده شده است (WHO, 2008; ISIRI, 2009). همچنین با توجه به بررسی‌های انجام شده در مطالعات پیشین جهت ارزیابی منابع آبی با استفاده از شاخص‌های کیفی پارامترهای محدودی دخیل بوده که به-تنهایی نمی‌تواند بیانگر مطلوبیت این منابع برای اهداف شرب باشد لذا در این پژوهش مجموعه پارامترهای جامعی که وجود آن‌ها در منابع آب زیرزمینی محتمل است؛ شامل عناصر اصلی، ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی، عناصر فرعی و عناصر کمیاب برای تعیین کیفیت آب شرب با توجه به سلامت مصرف‌کنندگان انتخاب شد که امری ضروری بوده و در واقع با توجه به ارزیابی‌های انجام شده در حیطه پژوهش‌های کیفیت آب برای اهداف شرب برای اولین بار از مجموعه پارامترهایی با این جامعیت استفاده شد. برای ارزیابی کیفیت آب شرب منطقه دو شاخص GWQI و GQI به کار گرفته شد و همچنین در حیطه بررسی کیفیت منابع آب زیرزمینی برای اهداف آشامیدن، برای اولین بار روش ترکیب غیر نظارت‌شده به منظور تعیین دقیق‌تر رده‌های کیفیت آب شرب ارائه و در نهایت انتخاب بهترین روش برای تعیین رده‌های کیفیت آب شرب محدودی مورد مطالعه انجام شد.

منطقه مورد مطالعه

محدوده مطالعاتی مورد نظر آبخوان چندگانه دشت ورزقان واقع در استان آذربایجان شرقی و در ۷۰ کیلومتری شمال تبریز است. وسعت محدوده مورد مطالعه در حدود ۱۰۰۰ کیلومترمربع بوده که دربرگیرنده بخش‌های غربی حوضه آبریز رودخانه اهرچای است. منطقه مورد مطالعه در کل از توپوگرافی همواری برخوردار بوده و دارای شیب ملایمی به سمت جنوب شرق است. ارتفاع متوسط منطقه در حدود ۱۷۵۰ متر از سطح آزاد دریا است. مرتفع‌ترین نقاط دارای ارتفاع تقریبی ۲۷۰۰ متر مربوط به بخش‌های شمالی و پست‌ترین نقاط نیز در بخش‌های میانی و دارای ارتفاع تقریبی ۱۵۵۰ متر از سطح آزاد دریا است. رودخانه اهرچای و شاخه‌های فرعی آن بر بستری جریان دارند که از طرفین شمالی و جنوبی توسط ارتفاعات احاطه شده‌اند. همین امر نیز موجب شده است تا جهت جریان آب‌های زیرزمینی و هم چنین زهکشی منابع آب سطحی به سمت بخش‌های شرقی و خروجی حوضه آبریز رودخانه اهرچای باشد. مهمترین رودخانه منطقه ورزقان یعنی رودخانه اهرچای در جهت غرب به شرق جریان یافته و پس از زهکشی بخش بزرگی از منطقه، از سمت شرق ورزقان وارد منطقه اهر شده است و بعد از طی مسیری طولانی به دریای خزر می‌ریزد.

قرار داده و نتایج بررسی‌ها نشان داده است که اکثر نمونه‌های آبی برای اهداف آشامیدن نامناسب بوده و کودکان نسبت به بزرگسالان در معرض ریسک بیشتری نسبت به بیماری‌های غیرسرطان‌زا قرار دارند (Adimalla et al., 2019). در طی پژوهشی عابسی و سعیدی جهت بررسی کیفیت آب زیرزمینی دشت قزوین یک روش پیشنهادی مبتنی بر تحلیل‌های چند متغیره جهت توسعه شاخص کیفی آب زیرزمینی ارائه داده‌اند که با بهره‌گیری از استانداردهای محلی و منطقه‌ای انجام پذیرفته است، در این روش با انتخاب مجموعه‌ای از پارامترهای همجنس، مقدار غلظت نرمال ترکیبات، محاسبه و براساس وزن‌های پیشنهادی شاخص نهایی کیفیت آب زیرزمینی با وزن‌دهی کمیت‌های استاندارد شده به طور مستقل تعیین گردیده است که نتایج این مطالعه گویای نزدیکی محتوای املاح معدنی و پارامترهای عمومی آب زیرزمینی منطقه مورد مطالعه به کیفیت آب معدنی که از نظر شرب مورد تایید بوده است (Abessi and Saedi, 2013). Rahmani و همکاران سال (۲۰۱۳) پژوهشی را با هدف پایش منابع آب آشامیدنی شهرستان بوئین زهرا بر پایه تحلیل چند متغیره برای تعیین شاخص کیفیت آب زیرزمینی (GWQI) با استفاده از ۹ پارامتر انجام داده‌اند و نسبت غلظت مشاهده شده به حداکثر غلظت مجاز، به عنوان ارزش نرمال هر پارامتر در چاه‌های انتخابی محاسبه و شاخص نهایی برای هر چاه با توجه به وزن هر پارامتر تعیین شده است که با توجه به رتبه‌بندی کیفیت آب زیرزمینی، درجه کیفی آب چاه‌ها در وضعیت مطلوب قرار داشته است (Rahmani et al., 2013). ندیری و همکاران در مطالعه‌ای که تحت عنوان "آنالیز هیدروژئوشیمیایی آبخوان دشت تسوج" انجام داده‌اند، اظهار داشته‌اند که کیفیت آب زیرزمینی در مناطق مختلف حوضه آبریز تسوج، به دلیل تنوع سازندها و ساختارهای زمین‌شناسی و عوامل هیدروژئولوژیکی بسیار متفاوت است که با مطالعات هیدروژئولوژی و هیدروشیمی منطقه و آنالیز نمونه‌ها، عوامل موثر بر کیفیت آب زیرزمینی شناسایی شده که این عوامل در شمال و شمال شرقی منطقه و در قسمت‌های غربی دشت بسیار موثر عمل کرده است و همچنین مشخص شده که در جبهه ورودی آب زیرزمینی در قسمت‌های شرقی، شیب هیدرولیکی و ساختمان زمین‌شناسی و در مناطق مرکزی نیز آب برگشتی کشاورزی از عوامل موثر غالب در کیفیت آب زیرزمینی بوده است (Nadiri et al., 2013). شهرستان ورزقان در استان آذربایجان شرقی با وجود اراضی مستعد کشاورزی و فعالیت‌های گسترده معدنی (معدن مس سونگون، معدن طلای اندریان، مزرعه شادی و...)، اهمیت و جایگاه بالایی در اقتصاد استان و کشور دارد. لذا توجه به منابع آب‌های زیرزمینی با کیفیت قابل قبول از نظر شرب در جایگاه کنونی این شهرستان و نیز در تداوم بقای سلامت ساکنین منطقه در آینده، کارکرد مهمی دارد. با مروری بر پژوهش‌های انجام گرفته در راستای ارزیابی منابع آبی شهرستان ورزقان، تاکنون مطالعات متعددی در بحث شناخت ویژگی‌های هیدروژئولوژیکی، هیدروشیمی و تعیین مناطق آسیب‌پذیر دشت ورزقان با شناخت عوامل تاثیرگذار بر منابع آب زیرزمینی با استفاده از روش‌های روز دنیا انجام شده است (Nadiri et



شکل ۱- نقشه موقعیت محدوده مورد مطالعه.

Fig. 1. Location map of the study area.

مواد و روش‌ها

نمونه‌برداری و آنالیز نمونه‌ها

به منظور بررسی هیدروشیمی منطقه مورد مطالعه و با برنامه‌ریزی قبلی از ۳۹ منبع آب زیرزمینی (چشمه، چاه و قنات) با پراکندگی مناسب نمونه‌برداری انجام شد که این منابع شامل ۱۵ حلقه چاه، ۲۲ رشته چشمه و ۲ رشته قنات است. در هنگام نمونه برداری پارامترهای EC، pH و درجه حرارت در محل نمونه‌برداری توسط دستگاه‌های قابل حمل مورد ارزیابی قرار گرفته و سایر پارامترها در آزمایشگاه آب‌شناسی، دانشکده علوم طبیعی دانشگاه تبریز و همچنین آزمایشگاه آب و فاضلاب استان آذربایجان شرقی مورد آنالیز قرار گرفت و برای دومین بار پارامترهای pH و EC در شرایط آزمایشگاهی (۲۵°C) نیز اندازه‌گیری شد و صحت نتایج آنالیز با استفاده از تعادل یونی تایید گردید. با توجه به نتایج آنالیزها، مقادیر هدایت الکتریکی، سختی کل، منیزیم، فلوراید و مهم‌تر از همه آرسنیک و نیترات بیشتر از حد استاندارد سازمان بهداشت جهانی نشان داده شده است. روش‌های استاندارد اندازه‌گیری پارامترهای دخیل در ارزیابی کیفیت آب شرب محدوده مورد مطالعه در جدول ۱ و

همچنین خصوصیات آماری پارامترهای هیدروشیمیایی منطقه مورد مطالعه در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲ خلاصه آماری غلظت‌های اندازه‌گیری شده ۱۳ پارامتر دخیل در محاسبه کیفیت منابع تامین آب شرب محدوده مورد مطالعه که در آن میزان حداقل، حداکثر، میانگین، انحراف معیار، حد مجاز و حد استاندارد را نشان می‌دهد ارائه و همچنین غلظت‌های آستانه را برحسب دو استاندارد سازمان بهداشت جهانی و سازمان استاندارد تحقیقات صنعتی ایران بیان می‌کند. سازمان بهداشت جهانی به عنوان بالاترین نهاد بین المللی در کنترل کیفیت آب، چهارچوبی برای آلاینده‌های مختلف آب آشامیدنی ارائه داده است و علاوه بر آن، استاندارد ملی آب شرب ایران که توسط موسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران (ISIRI) در سال ۱۳۸۸ و بر مبنای دستورالعمل سازمان بهداشت جهانی تدوین شده است بر کنترل کیفیت آب نظارت دارد (WHO, 2008; ISIRI, 2009). غلظت یون‌های اصلی و غلظت عناصر فرعی بر حسب میلی گرم بر لیتر ارائه شده و همچنین کل مواد جامد محلول بر حسب میلی گرم بر لیتر و هدایت الکتریکی بر حسب میکروموس بر سانتی متر است.

جدول ۱- روش‌های استاندارد اندازه‌گیری پارامترها.

Table 1. Standard methods of measuring parameters.

Parameter	Units	Method
TH	(mg/L.CaCO ₃)	-
pH	-	In situ measurement/pH meter
F ⁻	mg/L	Ion chromatography
Cl ⁻	mg/L	Ion chromatography
SO ₄ ⁻²	mg/L	Ion chromatography
HCO ₃ ⁻²	mg/L	-
Na ⁺	mg/L	Flame atomic absorption spectrophotometry
K ⁺	mg/L	Flame atomic absorption spectrophotometry
Ca ⁺²	mg/L	EDTA titrimetric method
Mg ⁺²	mg/L	EDTA titrimetric method
As	mg/L	ICP-mass spectrometry (ICP-MS)
NO ₃ ⁻	mg/L	Ion chromatography
EC	(μS/cm)	Electric Conductivity meter

جدول ۲- اطلاعات آماری پارامترهای کیفی آب زیرزمینی و مقایسه با مقادیر آستانه استاندارد.

Table 2. Statistical information of groundwater quality parameters and comparison with standard threshold values.

Parameter	Units	Permissible	Minimum	Maximum	Mean	Std. Dev.	ISIRI	WHO
Na ⁺	mg/L	0.2	0.27	11	2.73	2.12	250	200
K ⁺	mg/L	-	0.002	1.44	0.14	0.24	12	12
TH	(mg/L.CaCO ₃)	150	51.87	661.9	300	140	150	150
Ca ²⁺	mg/L	0.3	0.8	10.8	3.2	2.08	300	300
Mg ²⁺	mg/L	0.15	0.23	6.4	2.02	1.5	200	30
HCO ₃ ⁻	mg/L	-	2	10	5.02	2.04	800	-
Cl ⁻	mg/L	0.4	0.19	7.2	1.33	1.35	400	250
SO ₄ ⁻²	mg/L	0.5	0.04	12.1	1.45	2.31	400	250
NO ₃ ⁻	mg/L	10	5.52	250.95	59.7	58.6	50	10
As	mg/L	0.01	0.0	0.1	0.01	0.02	0.01	0.01
F ⁻	mg/L	1.5	0.51	5.2	1.33	0.96	4	1.5
EC	μmoh/cm	-	200	2520	747.07	464.46	500	1000
pH	-	8.5	6.81	8.8	7.74	0.42	7.5	6.5-9

مقدار کلراید در غلظت‌های زیاد طعم نامطبوعی ایجاد می‌کند و از عناصر اصلی سدیم موجود در منابع آب آشامیدنی بیشتر باشد؛ برای افرادی که فشارخون بالا و بیماری قلبی دارند مضر است (WHO, 2008).

افزایش منیزیم موجب سختی آب شده و افزایش کلسیم امکان ابتلا به سرطان روده و پوکی استخوان را افزایش می‌دهد (Condon et al., 1993) یکی از مهم ترین عوامل تاثیرگذار بر کیفیت آب آشامیدنی، وجود نیترات است که تحت تاثیر فعالیت‌های انسانی وارد منابع آبی شده و موجبات خطر برای سلامتی انسان را در پی دارد. خطر اولیه نیترات در آب آشامیدنی زمانی رخ می‌دهد که در

آنومالی‌های موجود در محدوده مورد مطالعه

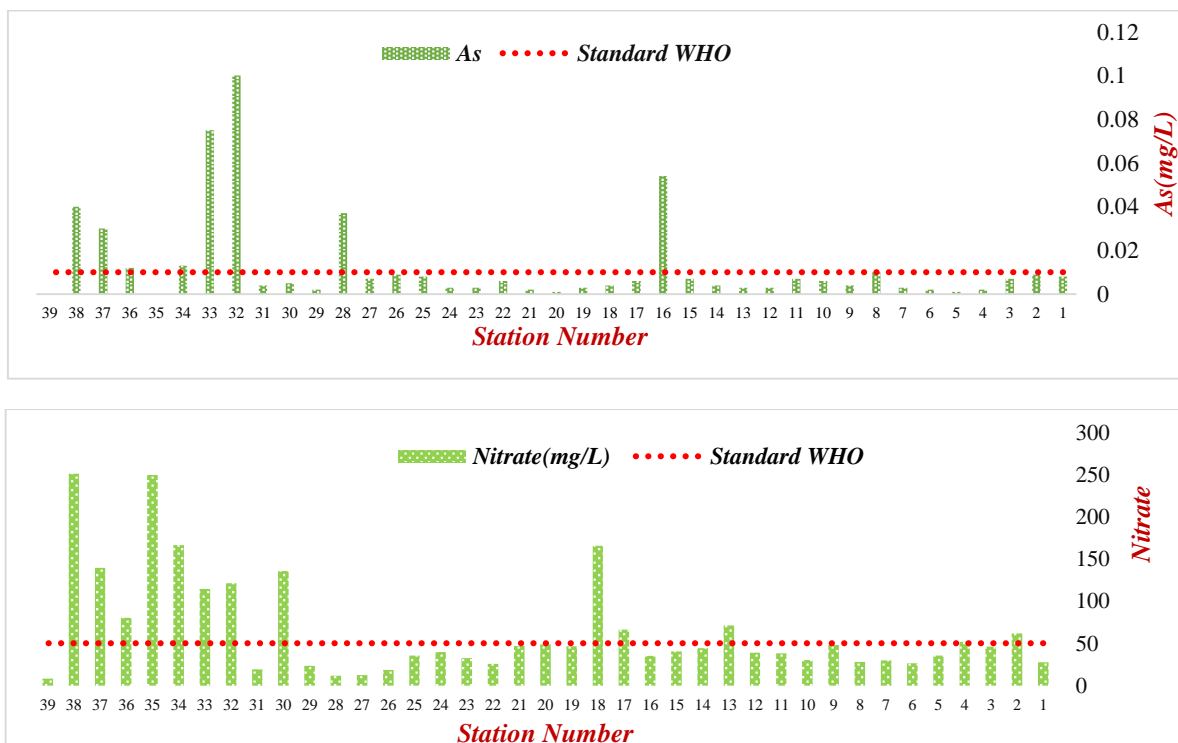
مروری بر سو اثرات پارامترهای موثر در ارزیابی کیفیت آب شرب محدوده مورد مطالعه و تعیین تاثیرگذارترین پارامتر

بر سلامت ساکنین شهرستان ورزقان

توزیع مکانی غلظت متغیرهای محاسبه شده در ارزیابی کیفیت آب شرب حوضه آبریز دشت ورزقان در شکل ۳ نشان داده شده است. هریک از املاح محلول در آب اثری خاص بر بدن انسان دارد به عنوان مثال، غلظت سولفات در صورتی که بیش از ۵۰ میلی گرم بر لیتر باشد، مزه تلخ و در غلظت‌های بالاتر از ۴۰۰ موجب سستی بدن می‌شود و یا

قرارگیری با آرسنیک در دوزهای پایین تر (۳ میکروگرم بر لیتر) نیز گزارش شده است و بسته به اینکه آرسنیک در چه غلظتی و طی چه مدتی استفاده شود؛ می‌تواند باعث تغییرات سلول‌های سفید خونی شود. آرسنیک به علت مهار فعالیت سلول، تحریک، استرس اکسیداتیو در سلول و کاهش آنتی اکسیدان‌های سلولی در فرآیندهای ایمنی موجب کاهش تعداد سلول‌های خونی می‌گردد. ضعف عمومی در عضلات، آرسنوکوزیس، کاهش اشتها، تهوع، التهاب غشاهای مخاطی چشم، بینی و حنجره و همچنین ضایعات پوستی، اختلالات روانی، عصبی و بیماری‌های قلبی از عوارض مواجهه با آرسنیک است. (Machiwal et al., 2007; Rosado et al., 2011). با بیان این اثرات سو برای پارامترهای دخیل در ارزیابی کیفیت آب شرب شهرستان ورزقان می‌توان گفت که آرسنیک و نیترات جز سمی‌ترین و تاثیرگذارترین پارامترها بر آب شرب و در نتیجه آن، سلامت اهالی منطقه است به طوری که با توجه به نتایج آنالیزها میزان آلودگی آرسنیک دشت ورزقان بیشتر از ۱۰ برابر و نیترات بیش از ۵ برابر استاندارد سازمان بهداشت جهانی گزارش شده است که شکل ۲ مقایسه این آنومالی‌ها را با مقادیر استاندارد سازمان بهداشت جهانی نشان می‌دهد که در این شکل خط چین قرمز رنگ بیانگر حد استاندارد سازمان بهداشت جهانی برای آرسنیک و نیترات و نمودارهای میله‌ای سبز رنگ مقادیر اندازه‌گیری شده این عناصر در ۳۹ نقطه نمونه برداری است.

دستگاه گوارش نیترات به نیتريت تبدیل می‌شود و نیتريت باعث اکسید شدن آهن موجود در هموگلوبین گلبول‌های قرمز شده و نهایتاً هموگلوبین قادر به حمل اکسیژن نخواهد بود. مصرف آب‌های دارای بیش از حد استاندارد نیترات مسمومیت شدید و حتی کشنده‌ای در نوزادان بوجود می‌آورد و همچنین استفاده مکرر و بلندمدت از آب آشامیدنی آلوده به نیترات موجب بروز بیماری‌های دستگاه گوارش خواهد شد (EPA, 2003). بر طبق استاندارد سازمان بهداشت جهانی، باید غلظت نیترات در آب شرب از ۱۰ میلی‌گرم بر لیتر بیشتر نباشد (WHO, 2008). وجود فلوراید در آب بسیار مهم بوده و مقدار آن از ۱ تا ۱٫۵ میلی‌گرم بر لیتر در آب آشامیدنی برای سالم نگه داشتن لثه و مینای دندان ضروری است. اگر غلظت فلوراید از ۱٫۷ میلی‌گرم بر لیتر فراتر رود اثر مسموم‌کنندگی دارد و طبق دستورالعمل سازمان بهداشت جهانی ۱٫۵ میلی‌گرم بر لیتر آن غلظت مجاز شناخته شده است (Wolfe and Patz, 2002). از مهم‌ترین اثرات سو آرسنیک می‌توان به ناراحتی‌های عصبی، ایجاد زخم بر روی پوست و ابتلا به سرطان‌ها اشاره کرد. آرسنیک عملکرد سلول ایمنی را مختل می‌کند و با توجه به اینکه آرسنیک عنصری غیرضروری و سمی در بدن است؛ نمی‌توان استاندارد، حد طبیعی و یا مرجعی برای آن مشخص نمود. طبق استاندارد سازمان بهداشت جهانی میزان آرسنیک در آب آشامیدنی ۱۰ میکروگرم بر لیتر است و این درحالی است که اثرات سمی در معرض



شکل ۲- مقادیر آرسنیک و نیترات موجود در منابع آب شهرستان ورزقان در مقایسه با استاندارد سازمان بهداشت جهانی.

Fig. 2. Arsenic and Nitrate levels in water resources of Varzeqan city in comparison with the standard of the World Health Organization.

توسعه شاخص‌های کیفی آب زیرزمینی

به منظور ایجاد یک نقشه که نماینده همه ۱۳ پارامتر شیمیایی باشد و کیفیت آب زیرزمینی را از نظر کمی در مقایسه با استاندارد WHO نشان دهد با استفاده از رابطه شاخص GQI (رابطه ۳) لایه های مربوط به متغیرها تلفیق شدند.

$$GQI = 100 - \left[\frac{r_1W_1 + r_2W_2 + \dots + r_nW_n}{n} \right] \quad (3)$$

در این فرمول r رتبه هر پیکسل از نقشه‌های رتبه‌بندی شده و W وزن نسبی هر یک از متغیرهای مورد ارزیابی است که برابر با مقدار میانگین غلظت متغیر پیکسل‌ها در نقشه رتبه‌بندی شده آن متغیر (r) و n تعداد پارامترهای مورد مطالعه ($n=13$) است. در واقع برای محاسبه این شاخص از متغیرهای مختلف میانگین‌گیری وزنی گرفته می‌شود که متغیرهای با مقادیر بیشتر (دارای اختلاف زیاد با مقدار استاندارد) وزن نسبی بیشتر و در نتیجه تاثیرگذاری بالایی خواهند داشت. وزن مختص هر پارامتر بیان‌کننده اهمیت نسبی آن پارامتر در آب زیرزمینی و مقدار رتبه‌بندی میانگین نقشه رتبه‌بندی آن است. در واقع پارامترهایی که تاثیر بیشتری بر کیفیت آب‌های زیرزمینی (میانگین بالا) دارند، در ارزیابی کلی کیفیت آب زیرزمینی مهم‌تر هستند. محاسبه نهایی شاخص با تقسیم حاصلضرب رتبه هر پارامتر در وزن میانگین آن بر تعداد پارامترها، شاخص GQI در محدوده صفر تا ۱۰۰ به دست می‌آید. ۱۰۰ در قسمت اول این معادله موجب می‌شود مقادیر نزدیک به عدد ۱۰۰ نشان‌دهنده کیفیت مطلوب و مقادیر نزدیک به صفر، آب با کیفیت غیرقابل قبول را نشان دهد (Babiker et al., 2007).

شاخص GWQI یکی از کاربردی‌ترین شاخص‌ها در بررسی تغییرات مکانی کیفیت آب زیرزمینی از نظر آشامیدن است که پارامترهای مختلف را با یکدیگر تلفیق و با معیارهای جهانی مثل استاندارد سازمان بهداشت جهانی (WHO) ارتباط می‌دهد. برای محاسبه شاخص GWQI به هر یک از پارامترهای موثر بر کیفیت آب زیرزمینی، بانوجه به نقش و درجه اهمیت تاثیر، عامل وزنی (w_i) بین ۵-۱ اختصاص داده می‌شود (Babai et al., 2007). برای محاسبه شاخص GWQI ابتدا باید وزن هر یک از شاخص‌های کیفی آب را مشخص و سپس از طریق رابطه ۴ مقدار شاخص را برای هر چاه تعیین نمود. جدول ۳ وزن هر یک از شاخص‌های مؤثر در محاسبه شاخص GWQI را نشان می‌دهد. میزان وزن‌های نسبی هر پارامتر مقادیر تجربی بوده که با توجه به اهمیت هر ترکیب از طریق قضاوت مهندسی براساس مطالعات پیشین (Housseini et al., 2004; Giljanovic, 1999) و نظر متخصصان حوزه کیفیت آب شرب (Goher et al., 2014; Mohebbi et al., 2013) به دست آمده است. در روشی که توسط Chander Kumar و همکاران برای بدست آوردن شاخص کیفیت آب‌های زیرزمینی ارائه شده است، فرمول زیر برای محاسبه شاخص GWQI استفاده شده است (Chander Kumar et al., 2011).

توسعه شاخص‌های کیفی در صورتیکه همه مولفه‌های تاثیرگذار در مصرف آب برای یک کاربری خاص را در برگیرند؛ به عنوان روشی معمول در ارزیابی کیفی منابع آب سطحی و زیرزمینی مورد توجه است. در مطالعات انجام شده روش توسعه شاخص‌های کیفی آب زیرزمینی در قالب سه مرحله اصلی انتخاب، استانداردسازی و تجمیع پارامترهای مورد نظر انجام شده است. اولین بار چهارچوب اجرایی شاخص WQI توسط سازمان بهداشت جهانی در سال ۱۹۹۳ تدوین شده است. جهت محاسبه این شاخص حداقل ۳ پارامتر کیفی مورد نیاز بوده و براساس وزن‌دهی که توسط ابداع‌کنندگان برای هر پارامتر در نظر گرفته شده است و با توجه به استاندارد آب شرب که توسط سازمان بهداشت جهانی تعیین شده، کیفیت آب آشامیدنی را بین اعداد صفر تا بی‌نهایت مشخص می‌نماید (WHO, 2008). با توجه به این شاخص، شاخص‌های ارزیابی کیفی دیگری نیز ابداع شده است مانند GWQI و GQI. شاخص GQI اولین بار توسط Babiker و همکاران (۲۰۰۷)، برای ارزیابی کیفیت آب دشت Unamuno ژاپن معرفی و به کار گرفته شده است (Babiker et al., 2007). جهت محاسبه شاخص GQI و تهیه نقشه کیفیت آب زیرزمینی، ابتدا بطور جداگانه برای هر یک از متغیرهای مربوطه نقشه رستری غلظت متغیر در محیط ArcGIS با استفاده از روش درون‌یابی IDW تهیه شده و سپس برای اینکه داده‌های متفاوت دارای یک مقیاس و معیار مشترک شوند با استفاده از رابطه (۱) غلظت هر پیکسل (C_i) در نقشه‌های رستری تهیه شده و با مقدار استاندارد WHO در نرم افزار ArcGIS ارتباط داده می‌شود.

$$C = \frac{C_i - C_{WHO}}{C_i + C_{WHO}} \quad (1)$$

نتیجه این یکسان‌سازی مقیاس‌ها، تولید چندین نقشه جدید به تعداد پارامترهای مورد نظر در ارزیابی کیفیت است که ارزش پیکسل‌های آنها بین ۱- و ۱+ تغییر می‌کند. در صورتیکه ارزش‌های هر پیکسل در نقشه‌های حاصل از یکسان‌سازی مقیاس‌ها برای هر متغیر به ۱- نزدیک‌تر باشند نشانه آلودگی کمتر و هرچه به ۱+ نزدیک‌تر باشند نشانه آلودگی بیشتر آن متغیر در محدوده مورد مطالعه خواهد بود. در مرحله بعد نقشه‌های حاصل از یکسان‌سازی مقیاس‌ها برای هر متغیر به یک نقشه رتبه‌بندی با محدوده بین ۱ تا ۱۰ تبدیل خواهد شد که در این نقشه‌ها رتبه ۱ نشانگر کیفیت خوب آب زیرزمینی و رتبه ۱۰ بیانگر کیفیت بد آب زیرزمینی است. در واقع در این تبدیل واحد باید مقدار (۱-) در نقشه تولیدشده مرحله قبل به (۱) در نقشه رتبه‌بندی شده و همچنین مقادیر (۰) به (۵) و (۱) به (۱۰) در نقشه رتبه‌بندی شده تغییر کند. بدین منظور از رابطه (۲) که یک تابع چند جمله‌ای است، برای تبدیل واحد هر پیکسل نقشه (C) به مقدار جدید (r) استفاده شده است (Babiker et al., 2007).

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

V_{ideal} : مقدار پارامتر کیفی آب که می‌توان از جداول استاندارد بدست آورد. این مقدار برای pH برابر ۷ و برای سایر پارامترهای کیفی آب صفر است.

$V_{standard}$: استاندارد سازمان بهداشت جهانی برای پارامترهای کیفی آب.

در این پژوهش پارامترهای دخیل در محاسبه عبارت است از pH ، EC ، NO_3^- ، HCO_3^- ، Cl^- ، SO_4^{2-} ، Mg^{2+} ، Ca^{2+} ، K^+ ، Na^+ ، TH ، As و F .

$$GWQI = Anti \log \left[\sum w \log_{10} q_n \right] \quad (4)$$

W: ضریب وزنی که مطابق با جداول بدست می‌آید.

q: رتبه کیفی که از طریق فرمول زیر محاسبه می‌شود:

$$q = \left\{ \frac{V_{actual} - V_{ideal}}{V_{standard} - V_{ideal}} * 100 \right\} \quad (5)$$

V_{actual} : میزان پارامتر کیفی آب که با آنالیز آزمایشگاهی بدست می‌آید.

جدول ۳- مقادیر استاندارد و وزن‌های اختصاص یافته به هر پارامتر و طبقه‌بندی رده‌های کیفیت منابع آبی از لحاظ شرب بر مبنای شاخص GQI و GWQI.

Table 3. Standard values and weights assigned to each parameter and classification of water resources quality categories in terms of drinking based on GQI and GWQI index.

Parameter	ISIRI	WHO standard	GWQI		GQI	
			Weight Factor	Relative weight (wi)	Weight	
pH	7.5	6.5 - 9	2	0.05	7.08	
Na ⁺	250	200	3	0.08	4.56	
K ⁺	12	12	1	0.02	5.46	
Ca ²⁺	300	300	2	0.05	4.76	
Mg ²⁺	200	30	2	0.05	3.54	
TH	150	150	1	0.02	8.08	
As	0.01	0.01	5	0.13	7	
Cl ⁻	400	250	3	0.08	4.22	
HCO ₃ ⁻	800	-	2	0.05	5.52	
SO ₄ ²⁻	400	250	2	0.05	4.22	
F ⁻	4	1.5	2	0.08	6.7	
EC	500	1000	3	0.08	7.74	
NO ₃ ⁻	50	10	5	0.13	10	
Total weight	-	-	35	-	-	
GQI	0 - 20		20 - 40	40 - 60	60 - 80	80 - 100
	Water unsuitable for drinking		Very poor water	Poor water	Good water	Excellent water
GWQI	0 - 25		25 - 50	50 - 75	75 - 100	100 <
	Excellent water		Good water	Poor water	Very poor water	Water unsuitable for drinking

هر دو شاخص است روش ترکیبی غیر نظارت شده ترکیب نتایج هر دو شاخص GQI و GWQI را نشان می‌دهد.

$$X_{norm} = \frac{X_i - X_{min}}{X_{max} - X_{min}} \quad (7)$$

در رابطه یاد شده X_{norm} شاخص کیفیت نرمال شده، X_i شاخص کیفیت و X_{max} و X_{min} به ترتیب بالاترین و پایین‌ترین میزان شاخص کیفیت را نشان می‌دهد.

صحت‌سنجی شاخص‌ها و روش ترکیب غیرنظارت شده

برای صحت‌سنجی نتایج حاصل از روش‌های به‌کار رفته در ارزیابی کیفیت آب شرب محدوده مورد مطالعه، از میانگین داده‌های غلظت نیترات و آرسنیک استفاده شد. به این منظور مجموع مقادیر دو پارامتر

روش ترکیب غیر نظارت شده (Unsupervised Method)

روش ترکیب غیرنظارت‌شده یک روش میانگین‌گیری وزنی ساده است که با تجمیع نتایج ۲ شاخص GWQI و GQI از مزایای هر دو روش بهره می‌برد. برای انجام روش ترکیب غیر نظارت‌شده باید توزیع مکانی نتایج هر دو روش در بازه یکسانی تغییر کند. به این منظور نتایج روش‌ها بین بازه صفر و یک نرمال‌سازی شد. ترکیب نتایج حاصل از ۲ روش با رابطه (۶) و نرمال‌سازی داده‌ها با رابطه (۷) انجام شده است:

$$Unsupervised \ Method = \frac{CI_{As-NO_3} \times GQI + CI_{As-NO_3} \times GWQI}{\sum CI_i} \quad (6)$$

در رابطه بالا GWQI و GQI شاخص کیفیت آب زیرزمینی، CI_i شاخص همبستگی بین داده‌های نیترات و آرسنیک با نقشه‌های نهایی

به دست آمده کیفیت آب شرب محدوده مورد مطالعه در ۴ رده غیر قابل شرب، خیلی ضعیف، ضعیف و خوب دسته بندی شده است و خروجی روش ترکیب غیر نظارت شده همبستگی بالاتری (CI) نسبت به GWQI و GQI دارد.

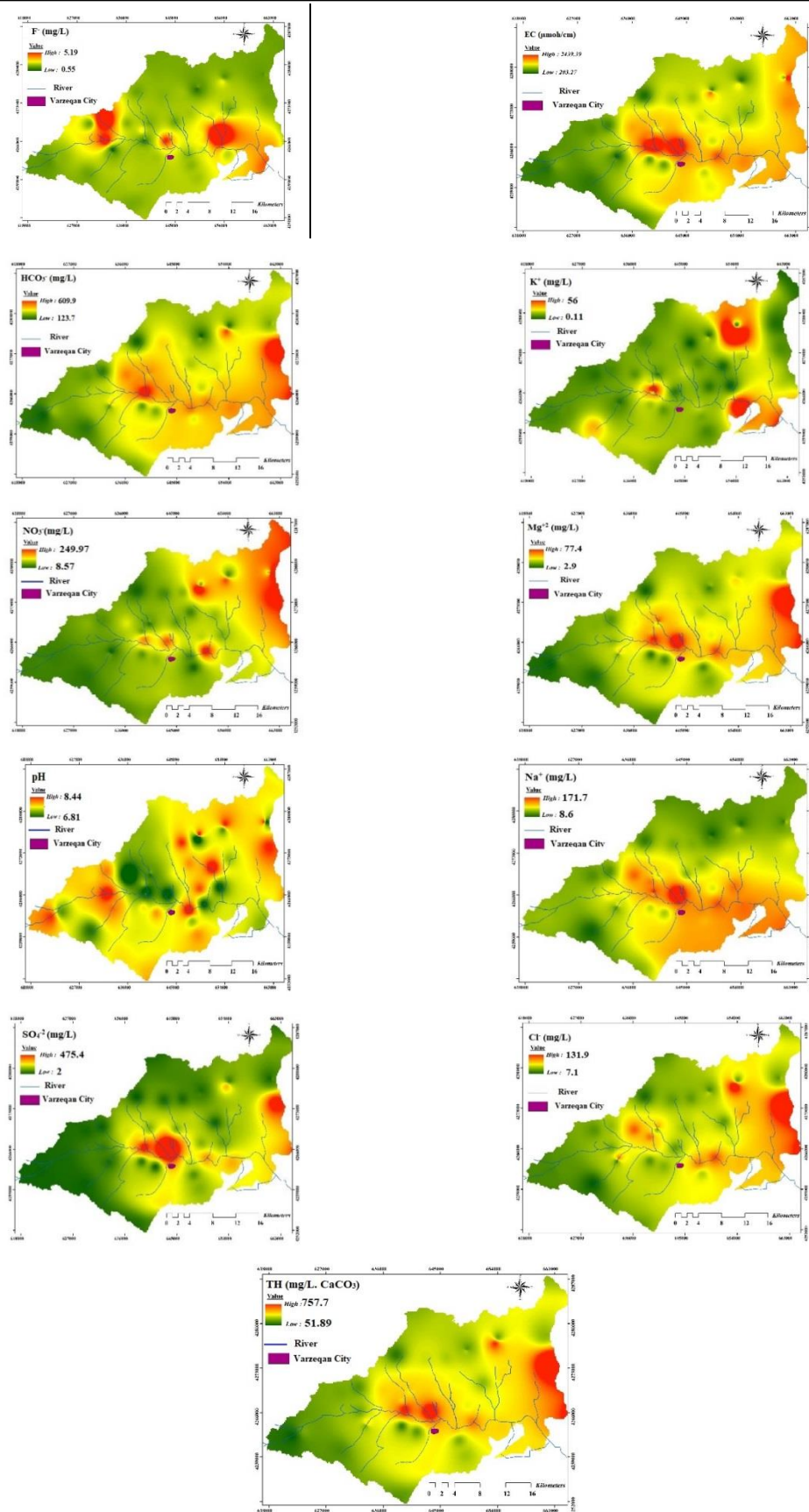
نتایج و بحث

بر اساس نقشه های پهنه بندی برای هریک از پارامترهای مورد ارزیابی در تعیین کیفیت آب از نظر شرب برای دشت ورزقان (شکل ۳) می توان گفت که از بین ۱۳ پارامتر دخیل در ارزیابی کیفیت آب شرب منطقه، ۶ پارامتر هدایت الکتریکی، سختی کل، آرسنیک، منیزیم، فلوراید و نیترات به ترتیب در ۱۰، ۲۹، ۸، ۵، ۵ و ۱۳ موقعیت نمونه برداری بالاتر از استاندارد EPA است که البته برای نیترات طبق استاندارد سازمان تحقیقات صنعتی ایران ۱۳ نقطه نمونه برداری است در صورتی که طبق استاندارد سازمان بهداشت جهانی از بین ۳۹ نقطه نمونه برداری شده ۳۸ چاه دارای آنومالی نیترات است که تحت تاثیر بالا بودن سطح آب زیرزمینی و فعالیت های کشاورزی این آلاینده در اکثر موقعیت های نمونه برداری منطقه بالاتر از حد استاندارد است و در واقع با توجه به ۱۳ پارامتر اندازه گیری شده برای منابع آب زیرزمینی محدوده مورد مطالعه، بیشترین آنومالی مربوط به آرسنیک و نیترات است که این دو پارامتر به دلیل تاثیر گذار بودن در سلامت ساکنین منطقه بالاترین وزن اختصاصی را در تعیین شاخص کیفیت از آن خود می کنند. بر اساس نتایج شاخص های GQI و GWQI، مقدار شاخص GQI از نظر عددی در محدوده ۵۸ تا ۸۲ تغییر می کند که با توجه به جدول ۴، آب های زیرزمینی منطقه مورد مطالعه از نظر استانداردهای آب آشامیدنی در رده کیفیت ضعیف، خوب و عالی دسته بندی شده اند. طبق نتایج شاخص GWQI هم مقادیر عددی در محدوده ۳۵ تا ۲۷۲ نوسان دارد و در ۴ رده کیفیت غیر قابل شرب، خیلی ضعیف، ضعیف و خوب قرار دارند که هر دو شاخص با توجه به نزدیک بودن سازو کار محاسبه و داشتن پارامترهای یکسان برای محاسبه هر دو شاخص، نتایج متفاوتی ارائه دادند که انتخاب یکی از این دو را به عنوان شاخص برتر در ارزیابی کیفیت آب شرب شهرستان ورزقان با مشکل مواجه می کند لذا در ادامه پژوهش با معرفی و به کار گرفتن روش ترکیب غیر نظارت شده نتایج قابل قبول تری حاصل شد که با توجه به صحت سنجی انجام شده این نتیجه تایید گردیده است. در واقع با توجه به نتایج به دست آمده از محاسبه شاخص GQI، GWQI و روش ترکیب غیر نظارت شده بهترین انتخاب جهت تعیین رده های کیفیت آب شرب منطقه روش ترکیب غیر نظارت شده است. جدول ۵ نتایج خروجی شاخص ها و روش ترکیب غیر نظارت شده را به همراه رده های کیفیت آب برای هر منبع نمونه برداری و غلظت ۱۳ پارامتر مورد بررسی در این پژوهش از ۳۹ نقطه نمونه برداری را نشان می دهد.

با بالاترین آلاینده گی و تاثیر گذار در کیفیت آب شرب و باتبع آن موثر در سلامت ساکنین تقسیم بندی و سپس تعداد چاه هایی که مقادیر آنومالی آن ها با نقشه های شاخص ها و روش ترکیب غیر نظارت شده دارای ارزش یکسانی است و در یک گروه قرار می گیرد به ۳ و ۴ ضرب شد. آن تعداد از چاه هایی که مقادیر آنومالی های تاثیر گذار در سلامت افراد و رده کیفیت آب زیرزمینی آن به مقدار ۱ و ۲ و ۳ اختلاف دارند به ترتیب در ۳، ۲ و ۱ ضرب می شوند. سپس مقادیر حاصل با هم جمع بسته می شود و شاخص همبستگی (CI) قابل محاسبه است که همبستگی بین نقشه های کیفیت آب شرب و مقادیر آنومالی ها را نشان می دهد (Fijani et al., 2013). بالاتر به معنای همبستگی بیشتر است. در پژوهش حاضر نتایج نشان داد که GWQI ضریب همبستگی بیشتری با میانگین مقادیر آنومالی ها (آرسنیک، نیترات) دارد که نشان دهنده انطباق بیشتر این آنومالی ها با نقشه کیفیت آب است و درصد رده های کیفیت آب و تعداد این دسته بندی کیفیت ها در هر دو شاخص متفاوت از هم بوده و خروجی شاخص ها در محدوده مورد مطالعه نشان دهنده این است که ۲ شاخص ارزیابی کیفیت آب شرب، با وجود ساختار محاسبه ای یکسان و داشتن تعداد پارامتر یکسان در این ارزیابی، نتایج متفاوتی را برای تعیین رده های کیفیت آب شرب و به ویژه تعیین مناطق غیر قابل شرب که حساس ترین بخش برای مراقبت از سلامت ساکنین منطقه است؛ ارائه می دهند. در نتیجه انتخاب یکی از این دو شاخص (GQI, GWQI) با توجه به خروجی متفاوت نقشه های نهایی و رده های کیفیت، به عنوان بهترین و کاراترین شاخص ارزیابی کیفیت آب شرب محدوده مورد مطالعه، منطقی به نظر نمی رسد. لذا در ادامه پژوهش جهت بهبود نتایج و تعیین دقیق تر مناطق غیر قابل شرب روش غیر نظارت شده که ترکیب نتایج شاخص های GWQI و GQI است؛ به کار گرفته شد تا از مزایای هر دو شاخص برای مشخص ساختن دقیق رده های کیفیت آب شرب استفاده شود.

روش ترکیب غیر نظارت شده

در روش ترکیبی پس از اینکه لایه های مختص به توزیع مکانی شاخص کیفیت هر دو روش تهیه و نرمال سازی شد؛ شاخص همبستگی بین خروجی هر دو شاخص و استاندارد مجموع داده های آنومالی ها به دست آمد. در روش ترکیب غیر نظارت شده وزن هریک از روش ها، با به دست آوردن شاخص همبستگی (CI) بین نتایج آنومالی ها تعیین می شود. به عبارت دیگر روشی که شاخص همبستگی بیشتری دارد بیشترین وزن به آن اختصاص یافته که در پژوهش حاضر به GWQI با داشتن بالاترین CI، بیشترین وزن اختصاص یافت که از مجموع ضرب وزن ها در شاخص کیفیت مختص هر روش، تقسیم بر مجموع وزن ها، شاخص کیفیت روش ترکیب غیر نظارت شده تعیین می شود. I بیانگر موقعیت تعداد سلول ها است. نقشه ترکیبی شاخص کیفیت منابع آب زیرزمینی توسط رابطه (۶) به دست آمد (شکل ۴). که با توجه به نتایج



شکل ۳- توزیع مکانی غلظت متغیرهای موثر در کیفیت آب زیرزمینی حوضه آبریز دشت ورزقان.

Fig. 3. Spatial distribution of concentrations of variables affecting groundwater quality in Varzeqaq plain catchment.

جدول ۴- انطباق نقاط اندازه گیری آنومالی ها (نیترات-آرسنیک) در چندین سطح با مقادیر رده های کیفیت نقشه های خروجی روش ها.

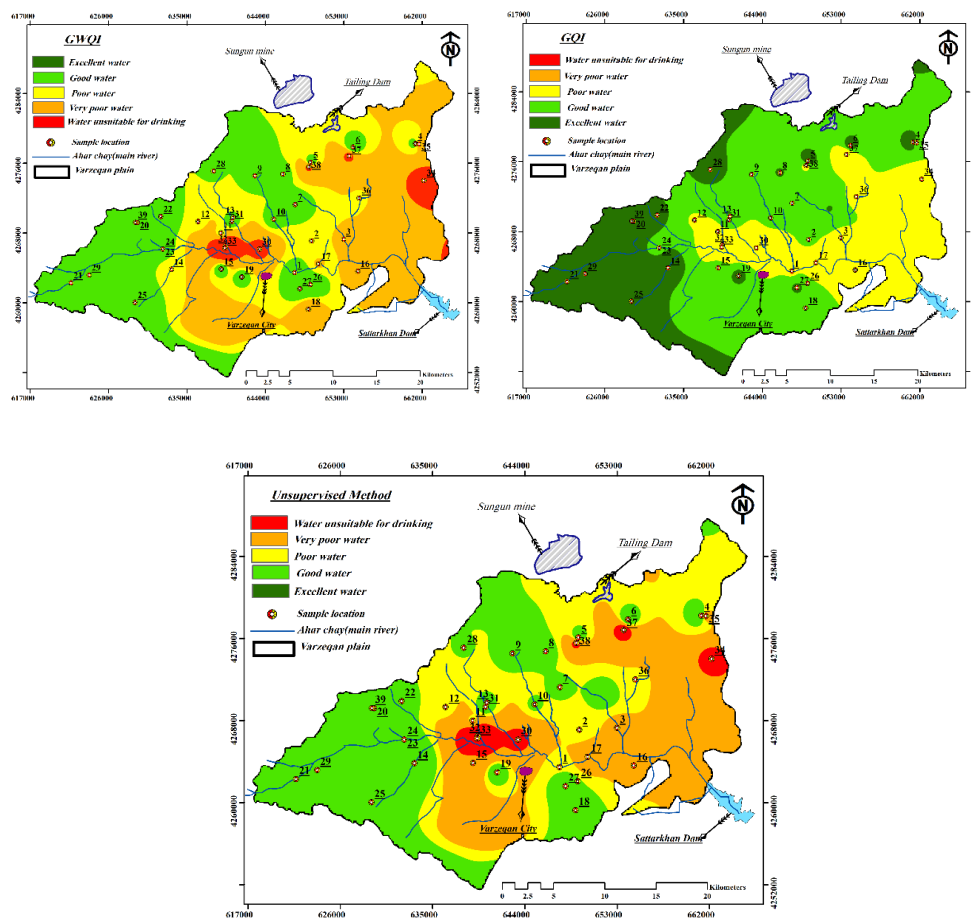
Table 4. Conformity of measuring points of anomalies (nitrate-arsenic) in several levels with the values of quality categories of output maps of methods.

CI	Average(As-NO ₃)				Category	Methods
	High	Moderate	Low	Very Low		
93	0	0	16	-	Excellent water	GOI
	1	2	9	-	Good water	
	2	4	5	-	Poor water	
137	0	0	0	20	Good water	GWQI
	0	3	3	3	Poor water	
	1	1	1	2	Very poor water	
	2	3	0	0	Water unsuitable for drinking	
146	0	0	1	23	Good water	Unsupervised Method
	0	1	3	2	Poor water	
	1	2	1	1	Very poor water	
	2	2	0	0	Water unsuitable for drinking	

جدول ۵- مقادیر پارامترهای مورد استفاده برای ارزیابی کیفیت آب شرب به همراه نتایج خروجی روش ها و تعیین رده کیفیت ۳۹ نقطه نمونه برداری.

Table 5. Values of parameters used to evaluate the quality of drinking water along with the output results of the methods and determining the quality category of 39 sampling points.

Station. N	pH	EC (μS/cm)	TH	HCO ₃ ⁻ (mg/L)	Cl ⁻ (mg/L)	SO ₄ ²⁻ (mg/L)	NO ₃ ⁻ (mg/L)	F ⁻ (mg/L)	Ca ²⁺ (mg/L)	Mg ²⁺ (mg/L)	Na ⁺ (mg/L)	K ⁺ (mg/L)	As (mg/L)	GWQI	GOI	Unsupervised Method
1	8.43	970	339.9	427	70.9	64.2	27.4	1.1	80.2	34	88.9	6.9	0.008	59.76	73.79	163.7
2	8.15	668	259.6	268.4	44.3	46.8	61.9	1.5	62.5	25.2	54.2	1.5	0.009	78.27	74.92	164.25
3	7.35	907	263.6	353.8	40.7	37.5	46.2	5.2	57.7	29.1	95.8	0.3	0.007	97.81	73.85	148.38
4	8.4	625	179.5	280.6	23	6.22	51.9	1.4	35.2	22.3	65.1	0.8	0.002	60.2	78	178.3
5	8.25	432	187.6	209.8	21.2	4.1	35.5	0.9	40.1	21.3	17/6	0.9	0.001	46.88	80.46	188.19
6	8.4	302	131.5	122	17.7	7.5	26/4	1	22.4	18.4	8/3	0.6	0.002	41	81.99	191.42
7	8.25	282	151.4	151/2	23	21	30	0.9	25.6	21.3	14.6	0.9	0.003	46.95	81.02	187.4
8	8.02	663	263.8	251.3	40.7	63.6	27.8	1.2	72.1	20.4	39.4	2.9	0.01	65.45	76.27	171.37
9	8.22	570	207.6	283	23	8.6	47.9	1.2	48.1	21.3	35.4	0.1	0.004	59.43	78.07	178.22
10	7.71	594	231.6	336.7	23	8.7	30.2	1.1	51.3	25.2	34.4	5	0.006	61.5	77.24	176.73
11	7.82	765	299.8	329.4	31.9	45	38.1	1	75.3	27.2	39.4	7	0.007	71.19	75.28	168.2
12	7.65	1087	319.7	402.6	72.6	90.7	39	1.6	72.1	34	93.8	7	0.003	81.65	73.71	162.61
13	6.9	1000	319.9	412/3	76.2	69	71.3	1.1	85	26.2	98.8	3.1	0.003	80.42	74.02	162.72
14	7.6	937	331.5	414/8	67.3	43.1	44.4	1.1	51.3	49.5	72	3.8	0.004	86.18	74.65	168.98
15	8.1	446	163.8	200	19.4	6.9	40.4	1.1	40.1	15.5	28.5	3.2	0.007	53.94	78.46	179.39
16	7.85	420	95.86	195.2	21.2	14.4	35	1.2	27.2	6.8	49.3	5.6	0.054	110.33	77.03	135.4
17	7.76	1096	319.7	409.9	58.4	112.8	66.2	1.3	72.1	34	97.8	25	0.006	95.06	71.12	147.65
18	7.35	1248	419.9	414.8	79.7	121.3	165.6	1.4	88.2	48.6	102.9	5.4	0.004	127.56	70.35	136.1
19	8.02	724	199.7	336.7	46	45	46.4	1.2	54.5	15.5	83.9	2.6	0.003	58.97	76.76	175.7
20	8	438	139.9	219.6	28.3	5.6	48.7	1.2	40.1	9.7	44.3	3.5	0.001	45.59	79.58	183.58
21	7.86	391	155.5	195.2	21.2	5.5	47.1	1	36.8	15.5	25.5	1.3	0.002	46.94	80.05	185.74
22	8.2	272	51.87	126.8	17.7	4.3	25.8	0.9	16	2.9	41.3	2.2	0.006	35.33	82.46	189.76
23	8.06	344	127.5	158.6	30.1	3.6	32.4	4.2	32	11.6	24.5	2.5	0.003	59.04	79.17	171.46
24	8.1	496	127.4	219.6	23	16.1	39.7	5.2	16	21.3	48.5	3.1	0.003	75.82	77.49	161.55
25	8.8	716	171.8	305	28.3	19	35.7	1	48.1	12.6	83.9	4.8	0.008	58.1	76.75	175.3
26	7.45	304	119.6	156.1	7.1	4	18.4	1	40	4.8	10.3	11.7	0.009	43.37	80.24	179.4
27	7.64	644	167	287.9	35.5	30	12.5	1.1	49.6	10.5	78.5	4.2	0.007	49.61	78.62	180.21
28	7.63	256	87.53	131.7	10.6	2	11.5	1	28.8	3.8	19	2.5	0.037	71.89	80.88	164.3
29	7.55	477	158.8	234.2	21.3	6	23.3	1.1	43.2	12.4	38.1	3.1	0.002	41.68	80.34	187.45
30	7.25	1900	661.9	390.4	200.93	478	135.57	2.56	150.4	69.7	172.38	1.72	0.005	169.35	66.94	106.23
31	7.42	700	283.3	335.5	25.9	54.39	19.1	1.01	83.2	18.392	50	1.62	0.004	54.15	77.98	179.59
32	7.06	2520	558.3	610	56.98	178.57	121.4	1.2	128	58.08	121.79	35.07	0.1	272.71	58	25.58
33	7.55	1190	486.6	488	50	170.32	114.65	0.51	118.4	46.5	76.16	2.42	0.075	202.4	69.11	83.7
34	8.23	1100	757.7	610	131.95	189.56	166.6	1.01	176	77.44	55.6	2.72	0.013	168.7	67.96	116.64
35	7.24	1600	179.4	256.2	33.98	27.47	249.6	1.06	44.8	16.45	44.75	1.21	0	110.74	75.5	138.61
36	7.65	500	307.1	309.88	60.9	60.43	80.24	1.03	75.2	29.04	58.9	6.14	0.012	89	73.45	157.13
37	7.53	800	494.8	463.6	110.9	109.9	139.62	1.49	147.2	30.97	45.62	56.17	0.03	151.73	66.82	98.61
38	6.81	1200	215.5	219.6	38	23.07	250.95	0.67	72	8.712	25.4	6.94	0.04	153.45	71.94	104.45
39	8.01	200	315.0	347.7	69	19.23	8.2	0.55	72	32.912	56.9	1.017	0	50.18	81.22	192



شکل ۴- نقشه‌های رده کیفیت آب شرب منطقه مورد مطالعه.

Fig. 4. Drinking water quality category maps of the study area.

برای منابع آبی منطقه در جهت تعیین دقیق‌تر رده‌های کیفیتی آب شرب وجود نداشت که این امر لزوم استفاده از روش ترکیبی غیرنظارت شده را موجه می‌سازد در نتیجه برای اولین بار در این پژوهش درحیطه تعیین کیفیت منابع آبی از لحاظ شرب، با معرفی و استفاده از روش ترکیب غیرنظارت شده به تعیین رده‌های کیفیتی آب شرب پرداخته شد و درواقع روش ترکیب غیرنظارت شده با ترکیب نتایج دو شاخص ذکر شده خروجی دقیق‌تری نسبت به نقشه‌های قبلی ارائه داد که نتایج این روش ترکیبی همخوانی و همبستگی (CI) بیشتری با مناطق دارای آنومالی‌های تاثیرگذار (نیترات - آرسنیک) بر سلامت ساکنین منطقه نشان می‌دهد و این روش نسبت به دو شاخص GWQI و GQI، تعیین دقیق‌تر رده‌های کیفیت آب شرب را ممکن می‌سازد که بیان‌کننده مناسب بودن این روش در ارزیابی کیفیت آب شرب منطقه مورد مطالعه است.

نتیجه‌گیری

هدف از توسعه شاخص‌های کیفی آب آشامیدنی عموماً تشخیص سریع و مناسب مکان‌هایی با بیشترین و کمترین مطلوبیت در سطح یک منطقه جهت اهداف شرب است. در این پژوهش نیز با استفاده از نتایج آنالیزهای آزمایشگاهی به‌دست آمده برای ۳۹ نمونه منبع آب زیرزمینی با پراکندگی حساب شده و با احتساب ۱۳ پارامتر و در نظر گرفتن دستورالعمل‌های سازمان بهداشت جهانی (WHO) و معیارهای سازمان استاندارد تحقیقات صنعتی ایران (ISIRI) با استفاده از دو شاخص معمول و کاربردی GWQI و GQI به تعیین رده‌های کیفیتی منابع آب زیرزمینی از نظر شرب پرداخته شد که برای هر دو شاخص نقشه خروجی با تعیین رده‌های کیفیتی آب آشامیدنی به دست آمد اما با وجود اشتراکات در ساز و کار محاسبه هر دو شاخص، نتایج متفاوتی با تعداد رده‌های متفاوت برای اهداف آشامیدن منابع آب زیرزمینی شهرستان ورزقان به‌دست آمد؛ لذا امکان انتخاب یکی از این دو شاخص

منابع

Abessi, O., Saedi, M., 2011. Groundwater Quality Index Development for Qazvin Province. Environmental Sciences 8, 117 - 128. (in Persian).

- Adimalla, N., 2019. Groundwater Quality for Drinking and Irrigation Purposes and Potential Health Risks Assessment: A Case Study from Semi- Arid Region of South India. *Water Quality Exposure and Health* 11, 109–123.
- Babai, Y., Alavi Moghaddam, M., Qasemzadeh, F., Arbabzvar, M.H., 2007. Arsenic contamination of groundwater in the Kashmar Koohsorkh. *Environmental Science and Technology* 10, 31-5. (in Persian).
- Babiker, I.S., Mohamed, M.A.A., Hiyama, T., 2007. Assessing ground water quality using GIS. *Water Resources Management* 11, 699- 715.
- Bouwer, H., 1987. *Groundwater hydrology*. McGraw-Hill, Lnc. 480.
- Chander Kumar, S., Satyanarayan, Sh., Saumitra, M., Rina, K., 2011. Application of GWQI to assess effect of land use change on groundwater quality in lower Shiwaliks of Punjab: remote Sensing and GIS based approach. *Water Resource Management* 25, 1881-98.
- Condon, M.R., Traver, R.G., Fergusson, W.B., Chadderton, R.A., 1993. Parameter Estimation for a Groundwater Model. *Water Resource Bulletin* 29, 4-36.
- Cordoba, E., Martinez A., Ferrer E., 2010. Water quality indicators: comparison of a probabilistic index and a general quality index, The case of the confederacion hidrografica del jucar(spain). *Ecological Indicator* 10, 1049 - 1054
- Drinking water, Physical and chemical properties, 2009. Institute of Standards and Industrial Research of Iran. pp. 1053.
- Elamassi, K.S., 2012. Assessment of groundwater quality multivariate and spatial analyses in Gaza governorate- Palestine., Master Degree Program, Environmental science. The Islamic University-Gaza, Faculty of Science.
- EPA, 2003. Standard Operating Procedure for Groundwater Sampling. New England. The Office of Environmental Measurement and Evaluation.
- Fernández-Cavia, J., Rovira, C., Díaz-Luque, P., Cavaller, V., 2014. Water quality index (WQI) for official tourist destination websites. Proposal for an assessment system. *Tourism Manage Prospect* 9, 5-13.
- Freeze, R.A., Cherry, J.A., 1979. *Groundwater*. Englewood Cliffs, NJ, Prentice-Hall 604.
- Fijani, E., Nadiri, A. A., Moghaddam, A. A., Tsai, F. T. C., Dixon, B., 2013. Optimization of DRASTIC method by supervised committee machine artificial intelligence to assess groundwater vulnerability for Maragheh–Bonab plain aquifer, Iran. *Journal of Hydrology* 503, 89-100.
- Giljanovic, N.S., 1993. Water quality evaluation by index in Dalmata. *Water Resources* 33, 3423-3440.
- Giordani G, Zaldívar J.M., Viaroli P., 2009. Simple tools for assessing water quality and trophic status in transitional water ecosystems. *Ecological Indictors* 9, 982-91.
- Goher, ME., Hassan, AM., Abdel-Moniem, AH., El-Sayed, SM., 2014. Evaluation of surface water quality and heavy metal indices of Ismailia canal, Nile River, Egypt. *Egyptian Journal of Aquatic Research* 40, 225-233.
- Helena, B., Pardo, R., Vega, M., Barrado, E., Fernandez, J.M, and Fernandez, L., 2000. Temporal evolution of groundwater composition in an alluvial aquifer(Pisuerga River, Spin) by principal component analysis. *Water Research* 34, 807 - 816.
- Housseini, D., Coulibaly, M., Rodriguez, J., 2004. Development of performance indicators for Small Quebec drinking water utilities. *Environmental Management* 73, 243-255.
- Hurley, T., Sadiq, R., Mazumder, A., 2012. Adaptation and evaluation of the Canadian council of ministers of the environment water quality index (CCME WQI) for use as an effective tool to characterize drinking source water quality. *Water Research* 46, 3544-52.
- Lobato, TC., Hauser-Davis, R.A., Oliveira, T.F., Silveira, A.M., Silva, H.A.N, Tavares, M.R.M., 2015. Construction of a novel water quality index and quality indicator for reservoir water quality evaluation: a case study in the amazon region. *Journal of Hydrology* 522, 674-683.
- Machiwal, D., Madan, K.J., Bimal, C.M., 2011. GIS-based assessment and characterization of groundwater quality in a hard rock hilly terrain of western India. *Environmental Monitoring Assessment* 174, 645-663.
- Mateo-Sagasta, J., Marjani, S., Turrall, H., Burke, J., 2017. Water pollution from agriculture: a global review. *FAO IWMI* 35.
- Mohebbi, MR., Saeedi, R., Montazeri, A., Vaghefi, KA., Labbafi, S., Oktaie, S., 2013. Assessment of water quality in groundwater resources of Iran using a modified drinking water quality index (DWQI). *Ecological Indictors* 30, 28-34.
- Mosaferi, M., Pourakbar, M., Shakerkhatibi, M., Fatehifar, E. & Belvasi, M., 2014. Quality modeling of drinking groundwater using GIS in rural communities, northwest of Iran. *Journal of Environmental Health Science and Engineering* 12, 1-14.

- Nadiri, A.A., Asghari Moghaddam, A., Tsai, F.T-C, Fijani, E., 2013. Hydrogeochemical Analysis for Tasuj Plain Aquifer, Iran. *Journal of Earth System* 22, 1091-1105.
- Nadiri, A.A., Sedghi, Z., Kazemian, N., 2018a. Optimization of DRASTIC method using ANN to evaluating of vulnerability of multiple Varzeqan. *Iranian journal of Ecohydrology* 4, 1089-1103. (In Persian).
- Nadiri, A.A., Sedghi, Z., Khatibi, R., Gharekhani, M., 2017c. Mapping vulnerability of multiple aquifers using multiple models and fuzzy logic to objectively derive model structures. *Science of The Total Environment* 593-594, 75-90.
- Nadiri, A.A., Sedghi, Z., Khatibi, R., Sadeghfam, S., 2018b. Mapping specific vulnerability of multiple confined and unconfined aquifers by using artificial intelligence to learn from multiple DRASTIC frameworks. *Journal of Environmental Management* 227, 415-128.
- Rahmani, Z., Khoshneviszadeh, A., Rezaei Kalantari, R., 2014. Evaluation of Boiin Zahra drinking water quality with GWQI. *Scientific Journal of Alborz Medical University* 2, 147-155. (In Persian).
- Rajdeep, K., Singh, R.V., 2011. Assessment for different groundwater quality parameters for irrigation purposes in bikaner city, rajasthan. *Journal of Applied Sciences in Environmental Sanitation* 6, 385 -392.
- Rosado, J.L., Ronquillo, D., Kordas, K., Rojas, O., Alatorre, J., Lopez, P., 2007. Arsenic exposure and cognitive performance in Mexican schoolchildren. *Environmental Health Perspectives* 115, 1371.
- Simoës, F.S., Moriera, A.B., Bisinoti, M.C., Gimenez, S.M.N., Yabe, M.J.S., 2008. Water quality index as a simple indicator of aquaculture effects on aquatic bodies. *Ecological Indicators* 8, 476-484.
- Sorensen, J.P.R., Lapworth, D.J., Nkhuwa, D.C.W., Stuart, M.E., Gooddy, D.C., Bell, R.A., Chirwa, M., Kabika, J., Liemisa, M., Chibesa, M., Pedley, S., 2015. Emerging contaminants in urban groundwater sources in Africa. *Water Resarch* 72, 51-63.
- Terrado, M., Barceló, D., Tauler, R., Borrell, E., De Campos, S., Barceló, D., 2010. Surface-water-quality indices for the analysis of data generated by automated sampling networks. *Trends Analual Chemistry* 29, 40-52.
- Todd, D.K., 1980. *Groundwater Hydrology*. Second Ed., John Wiley & Sons Inc., pp. 535.
- Tziritis, E., Panagopoulos, A., Arampatzis, G., 2014. Development of an operational index of water quality (PoS) as a versatile tool to assist groundwater resources management and strategic planning. *Journal of Hydrology* 517, 339-50.
- WHO (World Health Organization), 2008. *Guidelines for Drinking Water Quality, Second addendum, Vol. 1, Recommendations, -3rd ed.*, ISBN 9789241547604, pp. 1-515.
- Wolfe, A.H., Patz, J.A., 2002. Reactive nitrogen and human health: acute and long-term implications. *Ambio* 31, 5-120.
- Yidana, S.M., Banoeng-Yakubo, B., Akabzaa, T.M., 2010. Analysis of groundwater quality using multivariate and spatial analyses in the Keta basin, Ghana. *Journal of African Earth Science* 58, 220-34.



©2022 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers.