



Assessment of Groundwater Quality Affected by Saltwater Intrusion and Theoretical Mixing Ratio Calculation of Saline and Fresh Groundwater

Mohammad Mirzavand^{1✉} | Seyyed Javad Sadatinejad² | Hamid Kardan Moghaddam³

1. School of Energy Engineering and Sustainable Resources, College of Interdisciplinary Science and Technology, University of Tehran, Tehran, Iran.
2. School of Energy Engineering and Sustainable Resources, College of Interdisciplinary Science and Technology, University of Tehran, Tehran, Iran.
3. Water Research Institute, Ministry of Energy, Tehran, Iran.

✉Corresponding Author: MMirzavand@ut.ac.ir

Received:
24 February 2025

Accepted:
18 March 2025

Published:
19 March 2025

Keywords:

Groundwater,
Saltwater Intrusion,
Mixing,
Hydrogeochemistry,
Kashan.

Extended abstract

Abstract

Groundwater, as a vital resource, constitutes approximately 30% of the Earth's freshwater reserves and serves as the primary source of drinking water for nearly half of the global population, as well as about 40% of the water required for agricultural purposes. Therefore, the importance of managing groundwater resources for sustaining human life and ecosystem stability is undeniable. However, groundwater resources face numerous challenges, with salinity being one of the most significant global concerns (Mirzavand & Walter, 2024). Groundwater salinity refers to the increase in the concentration of dissolved salts in aquifers, which leads to a decline in water quality. This process can render water unsuitable for drinking, irrigation, and industrial use (Yang et al., 2022). The Kashan Plain, located in central Iran, is one of the regions where its groundwater resources are under severe pressure due to salinity. Studies conducted by Mirzavand (2018) have highlighted the challenges facing the Kashan Plain aquifer and emphasized the need for comprehensive assessments to ensure the sustainable management of these resources (Mirzavand, 2018).

Cite this article: Mirzavand, M., Sadatinejad, S.J. & Kradan 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* Title, 5 (2), 63-78. DOI: <http://doi.org/10.22077/jaaq.2025.9007.1102>.



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/>).

According to the findings of Mirzavand's research (2018), the source of salinity in the Kashan Plain aquifer is not the intrusion of saline water from the salt playa but rather the extraction of deep saline water (upcoming) associated with the Miocene marl and Upper Red formations, which is the primary cause of aquifer salinization (Mirzavand, 2018). On a broader scale, numerous studies have investigated the processes of groundwater mixing using hydrogeochemical techniques. For example, research conducted in coastal aquifers has utilized isotopic and chemical tracers to delineate the boundary between seawater and freshwater, providing valuable insights into the extent of saltwater intrusion (Barica, 1972; Bouchaou et al., 2008; Carretero et al., 2022; Xie et al., 2023). Tomaszkiwicz et al. (2014) proposed an index for this purpose, which allows for the calculation of the theoretical percentage of mixing between saline and fresh waters (Tomaszkiwicz et al., 2014). Given that the primary source of water in the Kashan and Aran-Bidgol regions is groundwater, it is essential to examine the mixing ratio of saline and fresh waters resulting from aquifer salinization due to the extraction of deep saline water using hydrogeochemical methods to develop management strategies and mitigate this phenomenon. Therefore, considering the effective performance of the GWISWI index (Amiri et al., 2016), this study will employ this index to investigate the mixing of saline and fresh waters. Additionally, since the only conservative ion used in this index is chloride, this research will also utilize bromide as a suitable conservative ion to examine the mixing processes, and the results of the baseline index and the modified index will be compared. Thus, the objective of this study is to assess groundwater quality affected by saltwater intrusion using the GWISWI index and a modified GWISWI index and to calculate the theoretical percentage of mixing between saline and fresh groundwater using hydrogeochemical data based on two scenarios (intrusion of saline water from the Salt Lake (salt playa) and deep saline water into the aquifer) in the Kashan Plain.

Study Area

The Kashan Plain (located between longitudes 51.05° and 51.54° east and latitudes 33.45° and 34.23° north) is situated in Isfahan Province, in central Iran, covering an area of 2,403 Km² (Figure 1). The aquifer in this region is composed of Miocene marl evaporites and the Upper Red Formation, overlain by low-altitude alluvial fan deposits and valley terrace sediments (up to 350 meters thick). These sediments consist of a mixture of fine silt, coarse silt, clay, sand, gravel, cobbles, boulders, and conglomerates. The Kashan Plain is bounded by the Rig-Boland Erg to the east, hard and karstic formations to the southwest and west, and the salt playa to the northeast. The first water well in this region was drilled in 1956. Since then, with population growth and increasing water demand, the number of pumping wells has exceeded 2,000. As a result, the groundwater level has been declining at an average rate of approximately one meter per year (Mirzavand & Ghazavi, 2015). Due to excessive extraction from semi-deep and deep wells and the low recharge rate of the aquifer in this arid climate (average annual rainfall of 131 mm and potential evaporation of 3,000 mm/year), the region faces a serious challenge of declining water resources (Mirzavand et al., 2020a). The salinity of groundwater in the Kashan Plain ranges from approximately 1,500 to 220,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, with data indicating that the southern, southwestern, and western parts of the aquifer have better water quality compared to the eastern and northeastern parts.

Methodology

In this study, a total of 42 water samples were collected from qanats, deep and shallow wells (exploitation and piezometric wells), drilled boreholes, and the salt playa of Kashan (Figure 1 and Table 1). Before sampling, the bottles were washed with distilled water. Water samples for anions and cations were collected separately in 250-milliliter PVC bottles. Additionally, electrical conductivity (EC), temperature, and pH were measured on-site using portable HACH-150 and Metrohm devices. Cation samples were filtered after collection using filter paper

with a pore size of 0.45 micrometers and acidified by adding two drops of pure nitric acid to reduce the pH to less than 2. The samples were then stored at 4°C and transported to the laboratory. Anion samples were analyzed using an Ion Chromatography (IC) device, and cation samples were analyzed using an Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometer (ICP-MS).

To assess the accuracy of the analyzed data, the Charge Balance Error (CBE) equation (1) was used. The acceptable error margin, calculated using Equation (1), is $\pm 5\%$ (Clark, 2015).

$$CBE = (\%) = \frac{\sum cat - \sum an}{\sum cat + \sum an} \times 100 \quad (1)$$

In this equation, a represents anions, the cat represents cations, and CBE represents the ionic balance error.

Calculation of GWISWI, GWISI, and Theoretical Percentage of Mixing of Saline and Fresh Water

Assessment of Groundwater Quality Affected by Saltwater Intrusion Using GWISWI and GWISI Indices

Tomaszkiewicz et al. (2014) demonstrated in their research that the $f_{Cl_{saltwater}}$ Index alone is not suitable for evaluating saltwater intrusion into groundwater resources. Based on this, they proposed a combined index derived from the integration of $GQI_{Piper(mix)}$ and $GQI_{f_{saltwater}}$ (Equations 2 and 3) and ultimately presented it as Equation (4).

$$GQI_{Piper(mix)} = \left[\frac{Ca^{2+} + Mg^{2+}}{\sum Cations} - \frac{HCO_3^-}{\sum Anions} \right] \times 50 \quad (2)$$

The unit used in this equation is milliequivalents per liter (meq/L).

$$f_{Cl_{saltwater}} = \frac{C_{Cl_{Sample}} - C_{Cl_{Freshwater}}}{C_{Cl_{Saltwater}} - C_{Cl_{Freshwater}}} \times 100 \quad (3)$$

$$GQI_{SWI} = \frac{(GQI_{Piper(mix)} + GQI_{f_{Cl_{saltwater}}})}{2} \quad (4)$$

In Equation (3), $Cl_{freshwater}$ and $Cl_{saltwater}$ represent the minimum and maximum concentrations of Cl among the samples examined, respectively. Since bromide, like chloride, is considered a stable ion in groundwater systems, the use of bromide in calculating the saline water ratio and the water quality index proposed by Tomasziewicz et al. (2014) (Tomaszkiewicz et al., 2014) is justified. Therefore, modifying the equation based on this ion can also yield reliable results. For this purpose, in this study, the water quality index (Equation 4) was first calculated using Equation (3). Additionally, the saline water ratio based on bromide ions was calculated using Equation (5), and subsequently, the An index based on the saline water ratio derived from bromide ions was computed. Finally, Equation (6) was used to calculate the water quality index affected by saltwater intrusion.

$$f_{Br_{saltwater}} = \frac{C_{Br_{Sample}} - C_{Br_{Freshwater}}}{C_{Br_{Saltwater}} - C_{Br_{Freshwater}}} \times 100 \quad (5)$$

$$GQI_{SI} = \frac{(GQI_{Piper(mix)} + GQI_{f_{CI, saltwater}} + GQI_{f_{Br, saltwater}})}{3} \quad (6)$$

In the above equations, CBr sample, CBr freshwater, and CBr saltwater represent the measured bromide concentration in the samples under investigation, the bromide concentration in the freshwater sample, and the bromide concentration in the saline water sample, respectively.

Calculation of the Theoretical Percentage of Mixing of Saline and Fresh Water in the Kashan Plain

In Equation (3), $C_{\bar{Cl}_{sampler}}$ represents the chloride concentration in each of the groundwater samples examined, $C_{\bar{Cl}_{freshwater}}$ represents the chloride concentration in the freshwater sample, and $C_{\bar{Cl}_{saltwater}}$ Represents the chloride concentration in the deep saline water in one scenario and the chloride concentration in the Kashan salt playa in another scenario. Additionally, $f_{\bar{Cl}_{saltwater}}$ Represents the saline water ratio, with a range of variation between 0 and 100. Thus, the index $GQI_{f_{saltwater}}$, which indicates the percentage of deep saline water/salt playa water mixed with the other studied wells, can be calculated using Equation (7) (Appelo & Postma, 2005).

$$GQI_{f_{saltwater}} = (1 - f_{saltwater}) \times 100 \quad (7)$$

Discussion

To assess the quality of groundwater affected by saltwater intrusion, the combined GQISWI index (which relies on chloride concentration and Piper diagram results) and the modified GQISWI index (GQISI), which incorporates bromide concentration in addition to the parameters considered by Tomaszkievicz et al. (2014), were used. The results obtained from calculating these indices are presented in Table 2. As observed, mixing is the most significant process in the context of aquifer salinity, and both indices effectively demonstrate this dominant process. However, as noted, in samples with very low salinity, the results of these two indices do not overlap. In samples where TDS is less than 5000 mg/L (samples 3, 5, 8, and 9), which are classified as fresh to slightly brackish water according to standards (Clark, 2015), these samples are categorized as fresh water in the modified index (GQISI) but as mixed water in the GQISWI index. Therefore, it appears that the results of GQISI are more accurate.

Investigating the theoretical percentage of mixing is important because it allows for the assessment of the extent of saline water intrusion from a specific source into the aquifer in each well. As mentioned, to examine the scenario of the theoretical percentage of mixing of saline water intrusion from deep saline water at the base of the aquifer and saline water from the Salt Lake (salt playa) into the Kashan Plain aquifer, the saline water ratio based on chloride concentration was used. The results of determining the theoretical percentage of mixing based on the two potential salinity sources are presented in Figures 2 and 3, and the percentage of mixing of saline and fresh water in each well based on the intrusion of deep saline water is provided in Table 3.

Based on the results, no mixing resulting from the intrusion of saline water from the Salt Lake (salt playa) is evident. It is worth noting that only in sample number 13, located at the outlet of the aquifer, the mixing percentage is approximately 47%, which could be attributed to evaporation (the water table is about 2 meters deep) and the discharge of saline water from the aquifer into the salt playa (Mirzavand et al., 2020a). In the remaining samples, the results indicate no.

Significant mixing (mixing less than 7%) between the examined samples and the salt playa. On the other hand, the mixing of saline and freshwater with deep saline water is significant (up to 70% in some wells), which could be due to the upcoming process and the extraction of deep saline water, as well as the movement of saline water from the east toward the northeast of the aquifer (Figure 3 and Table 3). It should be noted that this finding has previously been confirmed through isotopic studies by Mirzavand (2018) (Mirzavand, 2018).

Conclusion

In this study, the quality of groundwater affected by saltwater intrusion and the theoretical percentage of mixing between saline and fresh groundwater in the Kashan Plain were investigated. Analysis of TDS values and key ions revealed that the eastern and northeastern parts of the aquifer have the highest salinity levels, while the western and southern parts exhibit better water quality. The results also indicated that the groundwater quality in the Kashan Plain is significantly influenced by mixing processes with saline sources. Hydrogeochemical investigations and ionic composition analysis of the aquifer demonstrated that the salinity is primarily caused by excessive extraction of deep saline water and the upcoming process, rather than direct intrusion of saline water from the salt playa. The calculation of the theoretical percentage of mixing between saline and freshwater confirmed that deep saline water plays a major role in the salinity of the aquifer in most wells in the region. Additionally, the water quality indices GWISWI and GWISI showed that mixing is the dominant process affecting changes in groundwater quality in this area. However, GWISI, which incorporates bromide ions, provides higher accuracy in classifying fresh and saline water compared to GWISWI. Overall, the results of this study highlight the importance of sustainable groundwater management to prevent the spread of salinity and preserve the quality of the Kashan Plain aquifer. It is recommended that controlled extraction of water resources, reduced exploitation of deep saline water, and precise monitoring of salinity changes be considered as key strategies. Furthermore, complementary studies using isotopic methods and numerical modeling can provide a better understanding of the dynamics of saline and freshwater flows resulting from mixing with deep saline water.



بررسی کیفیت آب زیرزمینی متأثر از نفوذ آب شور و محاسبه درصد اختلاط تتئوریکی آب‌های زیرزمینی شور و شیرین

محمد میرزاوند^۱ | سید جواد ساداتی نژاد^۲ | حمید کاردان مقدم^۳

۱. استادیار گروه علوم و فناوری‌های محیطی، دانشکده مهندسی انرژی و منابع پایدار، دانشکده‌گان علوم و فناوری‌های میان‌رشته‌ای، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

۲. دانشیار گروه علوم و فناوری‌های محیطی، دانشکده مهندسی انرژی و منابع پایدار، دانشکده‌گان علوم و فناوری‌های میان‌رشته‌ای، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

۳. استادیار پژوهشی مؤسسه تحقیقات آب، وزارت نیرو، تهران، ایران.

✉ نویسنده مسئول: MMirzavand@ut.ac.ir

چکیده

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۲/۰۶
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۲۸
تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۱۲/۲۹

مدیریت منابع آب زیرزمینی در مناطق خشک و نیمه‌خشک به دلیل چالش‌های ناشی از شوری آب از اهمیت بالایی برخوردار است. دشت کاشان یکی از مناطق ایران مرکزی است که کیفیت آب زیرزمینی آن به دلیل برداشت بی‌رویه و اختلاط با منابع شور در حال کاهش است. این مطالعه با استفاده از روش‌های هیدروژئوشیمیایی، درصد اختلاط تتئوریکی آب‌های شور و شیرین را ارزیابی کرده و تأثیر نفوذ آب شور بر کیفیت آبخوان را بررسی می‌کند. نوآوری این تحقیق در به‌کارگیری شاخص‌های GWISI و GWISWI برای ارزیابی دقیق‌تر فرآیند اختلاط آب‌های زیرزمینی و تعیین درصد اختلاط آب‌های شور و شیرین برای اولین بار در این منطقه است. در این پژوهش، ۴۲ نمونه آب از چاه‌ها، قنات‌ها و پلایای نمکی دشت کاشان برداشت و با استفاده از کروماتوگرافی یونی (IC) و طیف‌سنجی جرمی پلازما جفت‌شده القایی (ICP-MS) آنالیز شدند. نتایج نشان داد که بخش‌های شرقی و شمال شرقی آبخوان دارای بالاترین میزان شوری ($212000 \text{ mg/L} < \text{TDS}$) هستند، در حالی که بخش‌های جنوبی و غربی کیفیت آب بهتری دارند. همچنین، اختلاط با شورابه‌های عمقی (آپکنینگ) عامل اصلی شوری بوده به‌طوری که در برخی چاه‌ها تا حدود ۷۰٪ اختلاط وجود دارد. از طرفی نتایج نشان داد که نفوذ آب شور از پلایای نمکی به داخل آبخوان وجود ندارد. این یافته‌ها ضرورت مدیریت پایدار منابع آب زیرزمینی، کنترل برداشت، و کاهش بهره‌برداری از شورابه‌های عمقی را برجسته می‌سازد.

کلیدواژه‌ها:

آب زیرزمینی،
هجوم آب شور،
اختلاط،
هیدروژئوشیمی،
کاشان.

مقدمه

آب‌های زیرزمینی به‌عنوان یک منبع حیاتی، حدود ۳۰ درصد از ذخایر آب شیرین زمین را تشکیل می‌دهد و به‌عنوان منبع اصلی آب آشامیدنی برای نزدیک به نیمی از جمعیت جهان و حدود ۴۰ درصد از آب مورد نیاز بخش کشاورزی، مورد استفاده قرار می‌گیرد. بنابراین اهمیت مدیریت منابع آب زیرزمینی در حفظ حیات انسان و پایداری اکوسیستم غیرقابل انکار است. با این وجود، منابع آب زیرزمینی با چالش‌های متعددی مواجه هستند که شوری یکی از مهم‌ترین نگرانی‌های جهانی محسوب می‌شود (Mirzavand & Walter, 2024). شوری آب زیرزمینی به افزایش غلظت نمک‌های محلول در آبخوان‌ها اشاره دارد که منجر به کاهش کیفیت آب می‌شود. این فرآیند می‌تواند آب را برای آشامیدن، آبیاری و مصارف صنعتی نامناسب سازد (Yang et al., 2022). اکثر آب‌های شور زیرزمینی از نظر پیدایش، شامل (۱) آب‌های زیرزمینی شور ذاتی، (۲) آب‌های زیرزمینی شور در نتیجه پیش‌روی آب دریا، (۳) آب‌های زیرزمینی شور در نتیجه پیش‌روی ناگهانی سیل ایجاد شده به‌وسیله آب دریا، (۴) آب‌های زیرزمینی شور در نتیجه جریان و نفوذ جانبی آب دریا، (۵) آب‌های زیرزمینی شور در نتیجه پخش شدن نمک‌های دریایی، (۶) آب‌های زیرزمینی شور در نتیجه تبخیر در نزدیکی سطح زمین، (۷) آب‌های زیرزمینی شور در نتیجه انحلال مواد معدنی در زیر زمین، (۸) آب‌های زیرزمینی شور در نتیجه اثر فیلتراسیون غشایی، (۹) آب‌های زیرزمینی شور با منشأ ژئوترمال، (۱۰) آب‌های زیرزمینی شور با منشأ خشکی به‌صورت دخالت انسانی و (۱۱) آب‌های زیرزمینی شور با منشأ چندگانه می‌باشند (Carretero et al., 2022; Mirzavand et al., 2020; Naderi et al., 2014). بنابراین با وجود منابع مختلف شوری، درک دینامیک اختلاط آب شور و شیرین در مدیریت و کاهش شوری بسیار مهم است. ارزیابی دقیق نسبت اختلاط این دو نوع آب به شناسایی میزان آلودگی، تعیین منابع شوری و توسعه راهکارهای مؤثر برای جبران این مشکل کمک می‌کند. روش‌های هیدروژئوشیمیایی که ترکیب شیمیایی آب زیرزمینی را تجزیه و تحلیل می‌کنند، در کمی‌سازی این فرآیندهای اختلاط بسیار مؤثر بوده‌اند. دشت کاشان، واقع در ایران مرکزی، یکی از مناطقی است

که منابع آب زیرزمینی آن تحت فشار شدید ناشی از شوری قرار دارد. مطالعات انجام‌شده توسط میرزاوند (۱۳۹۷) چالش‌های پیش روی آبخوان دشت کاشان را برجسته کرده و بر لزوم ارزیابی‌های جامع برای مدیریت پایدار این منابع تأکید دارند (Mirzavand, 2018). بر اساس نتایج حاصل از تحقیقات میرزاوند (۱۳۹۷)، منشأ شوری آبخوان دشت کاشان، هجوم آب شور از پلایای نمکی نبوده، بلکه برداشت آب از شورابه‌های عمقی (آپکینینگ) که در ارتباط با سازنده‌ای مارن می‌وسن و قرمز بالایی هستند عامل اصلی شور شدن آبخوان است (Mirzavand, 2018). در مقیاس وسیع‌تر، مطالعات متعددی فرآیندهای اختلاط آب‌های زیرزمینی را با استفاده از تکنیک‌های هیدروژئوشیمیایی بررسی کرده‌اند. به‌عنوان مثال، تحقیقات انجام‌شده در آبخوان‌های ساحلی از ردیاب‌های ایزوتوپی و شیمیایی برای مشخص کردن مرز بین آب دریا و آب شیرین استفاده کرده‌اند که دیدگاه‌های ارزشمندی درباره میزان نفوذ آب شور ارائه می‌دهد (Barica, 1972; Bouchaou et al., 2008; Carretero et al., 2022; Xie et al., 2023). توماسزکوویچ و همکاران (۲۰۱۴) برای این منظور شاخصی را ارائه کردند که بر اساس آن می‌توان درصد اختلاط تئوریک آب‌های شور رو شیرین را محاسبه کرد (Tomaszkiewicz et al., 2014). توجه به اینکه منبع آب مصرفی در منطقه کاشان و آران و بیدگل آب‌های زیرزمینی هستند، بررسی نسبت اختلاط آب شور و شیرین در نتیجه شور شدن آبخوان تحت تأثیر برداشت شورابه‌های عمقی با استفاده از روش‌های هیدروژئوشیمیایی برای تدوین راهکارهای مدیریت و کاهش این پدیده ضروری است. لذا با توجه به عملکرد خوب شاخص GWISWI (Amiri et al., 2016)، در این پژوهش از این شاخص جهت بررسی اختلاط آب‌های شور و شیرین استفاده خواهد شد. از طرفی با توجه به اینکه تنها یون محافظه‌کاری که در این شاخص استفاده شده است یون کلر است، در این پژوهش از یون برماید به‌عنوان یون محافظه‌کار مناسب برای بررسی فرآیند اختلاط نیز استفاده خواهد شد و نتایج شاخص مبنا و شاخص اصلاح‌شده با هم مقایسه خواهد شد. لذا هدف این مطالعه، بررسی کیفیت آب زیرزمینی متأثر از نفوذ آب شور با استفاده از شاخص GWISWI و شاخص

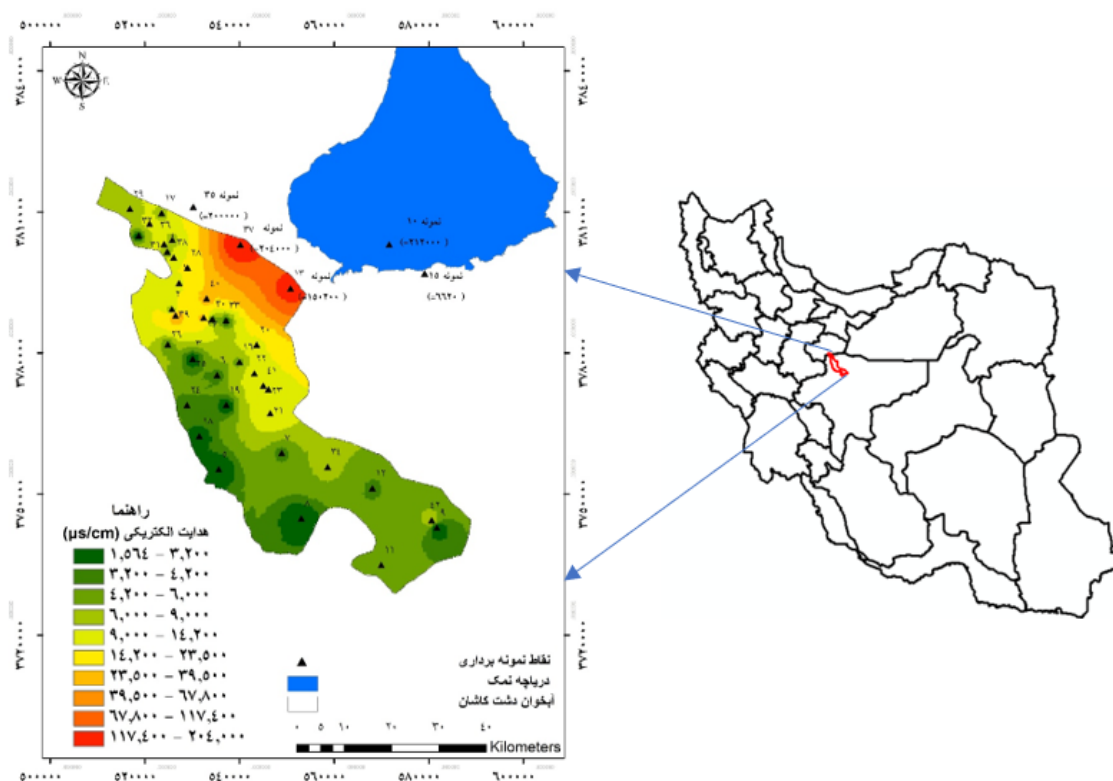
غرب توسط سازندهای سخت و کارستی و در شمال شرق توسط پلاهای نمکی، محدود شده است. اولین چاه آب در این منطقه در سال ۱۹۵۶ حفر شده است. از آن زمان، با افزایش جمعیت و تقاضای آب، تعداد چاههای پمپاژ به بیش از ۲۰۰۰ حلقه رسیده است. در نتیجه، سطح آب زیرزمینی سالانه حدود یک متر در حال کاهش است (Mirzavand & Ghazavi, 2015). به دلیل برداشت بیش از حد از چاههای نیمه عمیق و عمیق و میزان تغذیه کم آبخوان در این اقلیم خشک (میانگین بارندگی سالانه ۱۳۱ میلی متر و تبخیر بالقوه ۳۰۰ میلی متر در سال)، این منطقه با چالش جدی کاهش منابع آب روبه رو است (Mirzavand et al., 2020a). مقدار شوری آبهای زیرزمینی در دشت کاشان از حدود ۱۵۰۰ تا ۲۲۰۰۰۰ میکرو زیمنس بر سانتی متر در در تغییر است که بر اساس این داده ها، جنوب، جنوب غرب و غرب آبخوان کیفیت مناسب تری نسبت به شرق و شمال شرق آبخوان دارد (شکل ۱).

اصلاحی GWISWI و محاسبه درصد اختلاط تئوریکی آبهای زیرزمینی شور و شیرین با استفاده از داده های هیدروژئوشیمیایی بر مبنای دو سناریو (نفوذ آب شور دریاچه نمک (پلاهای نمکی) و شورابه عمقی به داخل آبخوان) در دشت کاشان است.

مواد و روش ها

منطقه مورد مطالعه

دشت کاشان (بین طول های جغرافیایی ۵۱/۰۵ و ۵۱/۵۴ درجه شرقی و عرض های جغرافیایی ۳۳/۴۵ و ۳۴/۲۳ درجه شمالی) در استان اصفهان، در ایران مرکزی واقع شده و مساحتی برابر با ۲۴۰۳ کیلومتر مربع دارد (شکل ۱). بستر آبخوان این منطقه از رسوبات تبخیری مارن می و سن و سازند قرمز بالایی تشکیل شده است که روی آن آبرفت های مخروط افکنده ای کم ارتفاع و رسوبات تراس دره ای (به ضخامت ۳۵۰ متر) قرار دارند. این رسوبات شامل ترکیبی از سیلت ریز، سیلت درشت، رس، ماسه، شن، قلوه سنگ، تخته سنگ و کنگلومرا هستند. دشت کاشان در شرق توسط ارگ ریگ بلند، در جنوب غرب و



شکل ۱. موقعیت نقاط نمونه برداری و تغییرات شوری آبخوان دشت کاشان.

Fig 1. The Location of Sampling Points and Salinity Variation in The Kashan Plain Aquifer.

نمونه‌برداری و آنالیز نمونه‌ها

در این مطالعه تعداد ۴۲ نمونه آب از قنات‌ها، چاه‌های عمیق و کم‌عمق (چاه‌های بهره‌برداری و پیزومتری)، چاهک‌های حفاری شده و پلایای نمکی کاشان جمع‌آوری شد (شکل ۱ و جدول ۱). پیش از نمونه‌گیری، بطری‌ها با آب مقطر شسته شدند. نمونه‌های آب برای آنیون‌ها و کاتیون‌ها به‌طور جداگانه در بطری‌های PVC با حجم ۲۵۰ میلی‌لیتر جمع‌آوری شدند. همچنین، مقادیر هدایت الکتریکی (EC)، دما و pH در محل با استفاده از دستگاه‌های قابل حمل HACH-150 و Metrohm اندازه‌گیری شدند. نمونه‌های کاتیون پس از برداشت، با

کاغذ صافی با اندازه منافذ ۰/۴۵ میکرومتر فیلتر شده و با افزودن دو قطره اسید نیتریک خالص، مقدار pH به کمتر از ۲ تقلیل یافت. سپس نمونه‌ها در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد نگهداری و به آزمایشگاه منتقل شدند. نمونه‌های آنیونی با استفاده از دستگاه Ion Chromatography (IC) و نمونه‌های کاتیونی با استفاده از Inductively coupled (Argon) plasma-Mass Spectrometer (ICP-MS) آنالیز شدند. به‌منظور بررسی دقت داده‌های آنالیز شده، از معادله خطای تعادل بار یونی (CBE) استفاده شد. مقدار خطای قابل قبول با استفاده از معادله (۱) برابر $\pm 5\%$ است (Clark, 2015).

$$CBE = (\%) = \frac{\sum cat - \sum an}{\sum cat + \sum an} \times 100 \quad (1)$$

توماسزکویچ و همکاران (۲۰۱۴) (Tomaszkiewicz et al., 2014)، طی تحقیقات خود نشان دادند که به‌تنهایی اندیس مناسبی برای ارزیابی نفوذ آب شور به منابع آب زیرزمینی نیست. بر همین اساس، یک اندیس ترکیبی از ترکیب و (رابطه ۲ و ۳) پیشنهاد دادند و در نهایت آن را به‌صورت رابطه (۴) ارائه کردند.

که در این رابطه an نشان‌دهنده آنیون، cat نشان‌دهنده کاتیون و CBE نشان‌دهنده خطای تعادل بار یون است.

محاسبه GWISWI و GWISI و درصد اختلاط
تئوریک آب شور و شیرین
بررسی کیفیت آب زیرزمینی متأثر از نفوذ آب شور
با استفاده از شاخص GWISWI و GWISI

$$GQI_{Piper(mix)} = \left[\frac{Ca^{2+} + Mg^{2+}}{\sum Cations} - \frac{HCO_3^-}{\sum Anions} \right] \times 50 \quad (2)$$

واحد مورد استفاده در این رابطه، میلی‌اکی‌والانت بر لیتر است.

$$f_{Cl_{Saltwater}} = \frac{C_{Cl_{Sample}} - C_{Cl_{Freshwater}}}{C_{Cl_{Saltwater}} - C_{Cl_{Freshwater}}} \times 100 \quad (3)$$

$$GQI_{SWI} = \frac{(GQI_{Piper(mix)} + GQI_{f_{Cl_{saltwater}}})}{2} \quad (4)$$

محاسبه نسبت شورابه و اندیس کیفیت آب که توسط توماسزکویچ و همکاران (۲۰۱۴) ارائه شده است (Tomaszkiewicz et al., 2014). بنابراین تغییر معادله بر اساس این یون نیز می‌تواند نتایج خوبی ارائه دهد. به‌همین منظور، در این تحقیق ابتدا با استفاده از رابطه (۳) مقدار

در رابطه (۳) $Cl_{saltwater}$ و $Cl_{freshwater}$ به‌ترتیب کمترین و بیشترین مقدار غلظت Cl در بین نمونه‌های مورد بررسی می‌باشد. با توجه به اینکه یون برماید نیز همانند یون کلراید، یک یون پایدار در سیستم آب‌های زیرزمینی به‌حساب می‌آید. بنابراین استفاده از یون برماید در

شورابه براساس یون بروماید محاسبه گردید و برای محاسبه شاخص کیفیت آب متأثر از نفوذ آب شور، از رابطه (۶) استفاده گردید.

$$f_{Br_{Saltwater}} = \frac{C_{Br_{Sample}} - C_{Br_{Freshwater}}}{C_{Br_{Saltwater}} - C_{Br_{Freshwater}}} \times 100 \quad (5)$$

$$GQI_{SI} = \frac{(GQI_{Piper(mix)} + GQI_{f_{Cl} saltwater} + GQI_{f_{Br} saltwater})}{3} \quad (6)$$

که در رابطه (۳)، غلظت کلراید هر کدام از نمونه‌های آب زیرزمینی مورد بررسی، غلظت کلراید در نمونه آب شیرین و در یک سناریو غلظت نمونه کلراید در محدوده شورابه‌های عمقی برداشت شده است و در سناریوی دیگر غلظت نمونه کلراید در پلایای نمکی کاشان، می‌باشد. همچنین نسبت شورابه با دامنه تغییرات بین صفر تا صد است. به این ترتیب می‌توان مقدار شاخص که نمایانگر درصد آب شور شورابه عمقی / شورابه پلایای نمکی ترکیب شده با سایر چاه‌های مورد مطالعه می‌باشد را به‌صورت رابطه (۷) محاسبه نمود (Appelo & Postma, 2005).

$$GQI_{f_{saltwater}} = (1 - f_{saltwater}) \times 100 \quad (7)$$

دسته قرار دارند. نمونه‌هایی مانند ۸، ۱۵، ۱۸، ۱۹، ۲۴، ۲۵، ۲۹ و ۳۰ در این بازه قرار گرفته‌اند. گروه سوم شامل آب‌های شور ($100000 \text{ mg/L} < \text{TDS}$) هستند که تعداد قابل توجهی از نمونه‌ها، از جمله ۲، ۱۴، ۲۰، ۲۱، ۲۲، ۲۳، ۲۶، ۲۷، ۲۸، ۳۱، ۳۲، ۳۳، ۳۴، ۳۶، ۳۸، ۳۹، ۴۰ و ۴۱ در این بازه قرار دارند. و در نهایت گروه چهارم شامل آب‌های شورابه‌ای ($\text{TDS} > 100000 \text{ mg/L}$) هستند که برخی از نمونه‌ها شامل ۱۰، ۱۳، ۳۵ و ۳۷ دارای مقادیر بسیار بالای TDS هستند که نشان‌دهنده ماهیت فوق‌شور (شورابه‌ای) این آب‌ها است. به‌طور کلی بررسی ترکیب یون‌های اصلی در منابع آب مورد مطالعه نشان می‌دهد که فرآیندهای متعددی در کنترل کیفیت آب دخیل هستند. مقادیر بالای سدیم و کلراید در بسیاری

شاخص کیفیت آب (رابطه ۴) محاسبه شد و همچنین با استفاده از رابطه (۵) نسبت شورابه براساس یون بروماید محاسبه گردید و متعاقب آن، شاخص براساس نسبت

که در روابط فوق C_{Br} sample، C_{Br} freshwater و C_{Br} saltwater به ترتیب غلظت اندازه‌گیری شده برم در نمونه‌های مورد بررسی، غلظت بروماید در نمونه آب شیرین و غلظت بروماید در نمونه آب شور است.

محاسبه درصد اختلاط تئوریکی آب‌های شور و شیرین در دشت کاشان

به‌منظور تعیین درصد اختلاط تئوریکی از یون کلراید به‌عنوان ردیاب پایدار استفاده شد که معادله آن به‌صورت رابطه (۳) است. در این رابطه، فرض شده است که منشأ اصلی آب شور، شورابه‌های عمقی است که توسط میرزاوند (۱۳۹۷) با استفاده از مطالعات ایزوتوپی به اثبات رسیده است (Mohammad Mirzavand, 2018).

نتایج و بحث

هیدرو ژئوشیمی کلی آبخوان

نتایج آنالیزهای هیدروژئوشیمیایی در جدول (۱) ارائه شده است. بررسی مقادیر کل مواد جامد محلول (TDS) در نمونه‌های آب آبخوان دشت کاشان نشان می‌دهد که کیفیت آب از آب‌های شیرین تا شورابه متغیر است. بر اساس طبقه‌بندی استاندارد (Clark, 2015)، نمونه‌های مورد بررسی در چهار گروه قرار می‌گیرند. گروه اول شامل آب‌های شیرین ($\text{TDS} < 1000 \text{ mg/L}$) است که این گروه کمترین تعداد نمونه را شامل می‌شود و تنها نمونه ۹ (جنوب آبخوان) در این بازه قرار دارد ($\text{TDS} = 896 \text{ mg/L}$). گروه دوم شامل آب‌های لب‌شور ($1000 < \text{TDS} < 10000 \text{ mg/L}$) است و ه بخش عمده‌ای از نمونه‌ها در این

نمونه‌ها، خصوصاً در آب‌های شور، غلظت بالای سولفات مشاهده می‌شود که احتمالاً ناشی از انحلال ژپس و انیدریت است که این کانی‌ها به‌ویژه در سازند قم، قرمز بالایی و پایینی گزارش شده است (Mirzavand et al., 2020b). مطالعات انجام شده توسط میرزاوند (۱۳۹۷) در ارتباط با منشأ شوری آبخوان کاشان نشان دهنده اثر شورابه‌های عمقی (از طریق فرآیند آپکنینگ) بر آبخوان می‌باشد (Mirzavand, 2018)، لذا در این بخش در ارتباط با منشأ شوری آبخوان بحث نمی‌شود.

از نمونه‌ها، خصوصاً در آب‌های شور و شورابه‌ای، حاکی از تداخل آب شور و شیرین، تأثیر فرآیندهای تبخیری و انحلال سنگ‌های تبخیری مانند هالیت است (Mirzavand et al., 2020b). حضور کلسیم و منیزیم بیانگر انحلال سنگ‌های آهکی و دولومیتی در آبخوان است که عمدتاً به‌دلیل وجود سازندهای آهکی در غرب آبخوان است (Mirzavand et al., 2020a). که مقادیر متوسط تا بالای این یون در نمونه‌های برداشت شده از غرب آبخوان نیز مؤید همین موضوع است که نشان‌دهنده هوازدهی و انحلال سنگ‌های کربناته است. همچنین در برخی

جدول ۱. نتایج آنالیز هیدروژئوشیمیایی منابع آب مورد بررسی (Ppm)

Table 1. Results of Hydrogeochemical Analysis of the Investigated Water Resources (Ppm)

کد نمونه	سدیم	پتاسیم	کلسیم	منیزیم	کلراید	کربنات‌بی	سولفات	برم	کل املاح محلول	هدایت الکتریکی
Id	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Br ⁻		
۱	۱۷۷۸/۲۶	۰/۰۱	۷۲۱/۴۷	۶۹/۰۷	۴۰/۴۷	۱۳/۰۸	۷۷۰/۱۶	۳/۳۲۰	۷۳۹۱/۲۸	۱۳۰۰۰
۲	۲۴۰۸/۰۱	۰/۰۱	۸۷۹/۸۰	۱۲۳/۸۶	۴۴۷۳	۳۰/۸۸	۸۴۸/۲	۴/۷۳۸	۸۷۸۱/۱۱	۴۳۳۰
۳	۷۲۹/۰۲	۰/۰۱	۸۴۴/۹۷	۱۸۹/۸۴	۱۷۷۸	۱۵/۹۷	۱۵۱۲/۲۸	۱/۹۲۴	۸۰۶۰/۶۹	۲۱۰۰
۴	۱۸۲۳/۹	۰/۰۱	۸۲۲/۱۱	۹۶/۳۷	۲۸۸۶	۷/۹۲	۱۷۰/۲	۲/۰۹۰	۶۴۰۸/۱۸	۴۲۸۰
۵	۲۰۲/۱۸	۰/۰۱	۱۷۸/۹۳	۴۸/۷۰	۲۸۷/۹۷	۲۹/۱۴	۳۴۸/۹۷	۰/۸۵۰	۱۰۸۴/۲۳	۱۷۸۳
۶	۸۸۹/۴۳	۰/۰۱	۲۸۴/۸۳	۱۰۳/۴۸	۶۰/۷۰۲	۲۸/۴۹	۱۲۴۹/۴۸	۱/۱۱۸	۲۷۸۹/۸۲	۳۳۸۰
۷	۸۳۰/۸۴	۰/۰۰	۲۸۰/۳۸	۷۷/۲۲	۱۱۸۰/۲۶	۸/۷۸	۶۱۹/۴۱	۰/۷۱۴	۲۶۹۳/۴۰	۳۶۳۰
۸	۳۶۸/۰۸	۰/۰۰	۱۶۷/۱۸	۸۹/۷۰	۱۷۷/۸	۱۶/۲۲	۷۲۶/۸۱	۰/۸۲۴	۱۸۰۸/۶۹	۲۲۱۰
۹	۲۵۰/۹۸	۰/۰۰	۸۴/۸۲	۴۵/۹۲	۷۱	۱۷/۴۴	۴۳۳/۲۷	۰/۳۸۶	۸۹۶/۱۷	۱۴۶۲
۱۰	۸۳۸۹۷/۴۸	۱/۸۹	۶۶۷/۸۶	۱۴۸۸۰/۷۸	۱۸۸۰/۲۳	۴۰/۲	۷۶۸/۷	۶۸/۸۹۱	۲۹۱۸۳۰/۴	۲۱۲۰۰۰
۱۱	۱۰۴۱/۱۴	۰/۰۰	۲۲۲/۵۰	۸۵/۷۳	۱۰۳۴/۴۷	۱۷/۶۸	۱۵۷۳/۰۱	۰/۸۱۲	۳۹۳۷/۴۸	۴۴۲۰
۱۲	۷۶۸/۱۸	۰/۰۰	۲۰۳/۸۹	۸۹/۴۴	۱۱۷۲/۲۳	۱۲/۴۴	۷۸۸/۶	۰/۸۴۰	۳۰۲۹/۷۹	۴۰۰۰
۱۳	۳۸۴۷۲/۲۷	۱/۱۷	۱۰۶۹۴/۸۲	۲۶۸۸/۲۶	۸۷۹۳۸	۱/۴۶	۸۹۰	۲۹/۰۱	۱۳۷۶۴۸/۴	۱۸۰۲۰۰
۱۴	۱۸۹۰/۱۹	۰/۰۰	۳۴۰/۸۲	۴۱/۲۷	۲۶۸۹/۷	۴/۲۶	۱۸۱۳/۹	۱/۹۳۸	۶۷۷۸/۴۶	۱۰۱۰۰
۱۵	۹۴۴/۱۳	۰/۰۶	۲۰۷/۳۴	۶۱/۸۷	۱۳۰۰	۱۳/۰۵	۱۴۴۰/۳	۱/۵۲۱	۴۰۰۱/۵۴	۶۶۲۰
۱۶	۸۶۳/۱۷	۰/۰۲	۳۴۹/۳۰	۱۲۶/۸۲	۱۰۸۳/۶	۱۹/۸۱	۱۱۸۸/۹	۱/۵۸۷	۳۸۶۰/۸۳	۸۱۸۰
۱۷	۱۰۴۲/۶۹	۰/۰۰	۶۲۳/۹۳	۸۶/۹۳	۲۰۲۶/۶	۳/۱۷	۱۱۲۹/۴	۲/۳۶۷	۴۸۸۱/۴۸	۷۸۰۰
۱۸	۳۷۱/۶۳	۰/۰۱	۱۶۰/۰۴	۷۶/۲۸	۳۹۰/۸	۲۵/۸۸	۸۹۲/۴۸	۰/۸۹۱	۱۶۰۴/۴۰	۲۳۰۰
۱۹	۴۱۳/۹۰	۰/۰۱	۱۱۹/۳۶	۴۰/۹۲	۳۸۸	۳۰/۲۴	۳۲۸/۲	۰/۶۲۹	۱۲۷۸/۸۸	۱۸۷۲
۲۰	۲۳۸۳/۸۸	۰/۰۲	۸۴۷/۶۸	۳۳۷/۸۱	۴۸۹۲/۸	۱۳/۲۹	۲۰۳۸/۲	۳۰/۸۷	۱۰۲۰۴/۷۶	۱۳۸۱۰
۲۱	۱۴۰۰/۷۸	۰/۰۱	۱۰۷۹/۸۶	۳۲۵/۶۷	۴۸۱۰	۶/۴۶	۷۷۳/۸	۱/۶۴۳	۸۳۹۳/۴۲	۱۳۲۹۰
۲۲	۲۰۴۶/۳۱	۰/۰۱	۸۸۳/۷۹	۲۷۲/۹۲	۳۸۱۰/۱	۱۸/۱۲	۲۲۴۷/۶	۲/۷۷۱	۸۹۶۹/۸۳	۱۱۷۲۰
۲۳	۲۸۱۲/۸۰	۰/۰۳	۸۸۲/۸۸	۲۲۸/۰۸	۸۲۸۹/۶۸	۱۴/۸۷	۱۴۷۷	۴/۷۱۸	۱۰۶۳۸/۷۸	۱۴۲۸۰
۲۴	۴۶۸/۳۶	۰/۰۰	۳۲۶/۹۸	۸۸/۲۰	۷۲۰/۸۲	۲۳/۱۷	۱۰۷۱	۰/۹۹۱	۲۶۸۶/۲۹	۳۲۹۰
۲۵	۴۸۲/۴۰	۰/۰۰	۱۷۳/۴۷	۸۷/۸۴	۳۷۷/۱۸	۲۱/۲۲	۸۶۳/۷	۰/۶۳۱	۱۶۶۷/۳۴	۲۲۷۰
۲۶	۸۴۲/۷۰	۰/۰۰	۴۳۹/۹۶	۷۹/۹۳	۱۷۳۹/۸	۱۰/۷۳	۴۹۴/۷۱	۱/۴۲۶	۳۶۰۳/۲۶	۳۹۳۰
۲۷	۱۹۴۱/۲۴	۰/۰۳	۸۶۸/۴۲	۷۳۰/۱۳	۱۱۲۴۴	.	۹۹۴۸/۶	۱۴/۷۴۲	۲۴۷۲۶/۴۳	۲۷۲۰۰
۲۸	۲۸۹۷/۰۶	۰/۰۲	۱۸۶۸/۸۳	۴۹/۸۴	۸۶۸۰	۶/۳۴	۱۳۹۰/۶	۲/۴۸۹	۱۱۸۸۶/۸۸	۱۴۴۷۰
۲۹	۱۰۳۰/۳۶	۰/۰۰	۴۸۱/۸۸	۱۰۲/۱۴	۱۴۷۴/۸	۶/۲۲	۱۸۴۱/۹	۲/۱۶۸	۴۹۳۴/۸۲	۸۶۶۰
۳۰	۸۳۸/۵۱	۰/۰۱	۹۴/۸۲	۸۶/۸۸	۷۴۵/۵	۱۵/۷۳	۸۲۸/۴۷	۰/۶۶۲	۲۰۰۳/۳۸	۱۶۱۹
۳۱	۱۹۴۴/۶۷	۰/۰۰	۸۳۲/۶۹	۶۳/۳۷	۲۸۶۷/۹	۱۰/۲۴	۱۲۲۰/۲	۱/۸۶۰	۶۶۳۴/۹۹	۱۰۴۲۰
۳۲	۷۶۸/۸۰	۰/۰۰	۹۹	۱۰/۷۰	۸۱۶/۸	۱۹/۸۱	۸۹۴/۳	۰/۸۶۹	۲۲۹۸/۰۱	۱۹۲۳
۳۳	۷۹۶/۶۶	۰/۰۱	۲۰۴/۲۱	۱۱۱/۳۶	۹۹۴	۲۳/۴۱	۹۷۸/۲۲	۱/۱۹۳	۳۰۹۸/۸۲	۲۷۳۰
۳۴	۱۱۱۴/۸۴	۰/۰۱	۳۸۷/۱۹	۷۰/۸۷	۱۶۸۰/۲	۸/۸۳	۹۸۴/۴	۱/۴۶۸	۴۱۸۲/۳۸	۶۳۸۰
۳۵	۶۰۸۸۳/۷۸	۰/۱۹	۳۳۸۷۳/۴۳	۴۸۴۴/۰۹	۱۹۷۳۰/۹	.	۱۸۱	۱۷۰/۰۳	۲۹۶۷۳/۱۸	۲۰۰۰۰۰
۳۶	۱۱۵۹/۷۳	۰/۰۰	۶۵۴/۶۸	۲۵/۹۹	۲۷۳۳/۸	۲/۴۳	۸/۳	۱/۹۵۴	۴۸۸۰/۶۸	۶۷۲۰
۳۷	۷۴۲۳۳/۳۸	۰/۸۶	۹۶۰/۳۶	۲۴۳۸/۳۴	۲۰۴۸۰۰	۱/۷	۱۰۰۸۰	۳/۷۰۳	۲۹۲۸۰۰۴	۲۰۴۰۰۰
۳۸	۲۲۰۰/۲۹	۰/۰۱	۱۳۶/۸۶	۹/۴۸	۳۶۲۷	۴/۸۷	۱۶۲۸/۸	۱/۹۸	۷۶۰۲/۰۸	۱۲۲۸۰
۳۹	۸۲۸۴/۸۶	۰/۰۹	۱۳۶۶/۶۷	۳۶۹/۷۸	۱۳۷۱۰	.	۲۹۷۶	۱۲/۲۰	۲۶۷۰/۷۳۹	۳۷۴۰۰
۴۰	۳۶۲۳۳/۱۲	۰/۱۳	۶۷۷/۲۲	۶۷۷/۲۲	۱۱۹۹۹	.	۱۱۱۰	۱۷/۶۹	۲۰۳۱۴/۶۸	۲۸۸۰۰
۴۱	۱۸۱۸	۰/۰۲	۱۲۸۸/۸۶	۴۶۷/۸۹	۶۰۰۹/۳	۱۶/۲۲	۱۱۶۹/۳	۲/۸۷	۱۰۴۳۲/۸۲	۱۴۰۲۰
۴۲	۲۲۲۶/۳۴	۰/۰۱	۴۲۶/۰۷	۳۱۳/۳۰	۲۲۹۱/۱	۱۳/۰۵	۱۳۸۵/۸	۱/۵۷	۶۶۵۰/۴۷	۷۶۶۰

به‌منظور بررسی کیفیت آب زیرزمینی متأثر از نفوذ آب شور، از شاخص ترکیبی GQISWI (که تکیه بر غلظت

بررسی کیفیت آب زیرزمینی متأثر از نفوذ آب شور

می‌شود، در نمونه‌های با شوری خیلی کم، نتایج این دو شاخص با هم هم‌پوشانی ندارد. در نمونه‌هایی که TDS کمتر از ۵۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر می‌باشد (نمونه ۳، ۵، ۸ و ۹)، و از نظر استاندارد جزو آب‌های شیرین تا لب‌شور هستند (Clark, 2015)، این نمونه‌ها در شاخص اصلاح‌شده (GQISI) جزو آب‌های شیرین طبقه‌بندی شده‌اند ولی در شاخص GQISWI، جزو آب‌های ترکیبی طبقه‌بندی شده‌اند. بنابراین، به نظر می‌رسد که نتایج GQISI از دقت بیشتری برخوردار است.

کلراید و نتایج پایپر داشت) و همچنین، از شاخص اصلاح‌شده GQISWI (GQISI) که علاوه بر پارامترهای در نظر گرفته شده توسط توماسزکی و همکاران (۲۰۱۴)، غلظت برماید نیز در رابطه آن دخالت داده شده، استفاده شد. نتایج به‌دست آمده از محاسبه شاخص‌های مذکور در جدول (۲) ارائه شده است. همان طور که مشاهده می‌شود، اختلاط مهم‌ترین فرآیند در بحث شوری آبخوان می‌باشد که هر دو شاخص این فرایند غالب را به‌خوبی نشان می‌دهند، با این وجود، همان‌طور که ملاحظه

جدول ۲. نتایج ارزیابی اندیس کیفیت آب زیرزمینی متأثر از نفوذ آب شور با استفاده از شاخص GQISWI و شاخص

GQISI

Table 2. Results of the Evaluation of the Groundwater Quality Index Affected By Saltwater Intrusion Using the GQISWI Index and the GQISI Index.

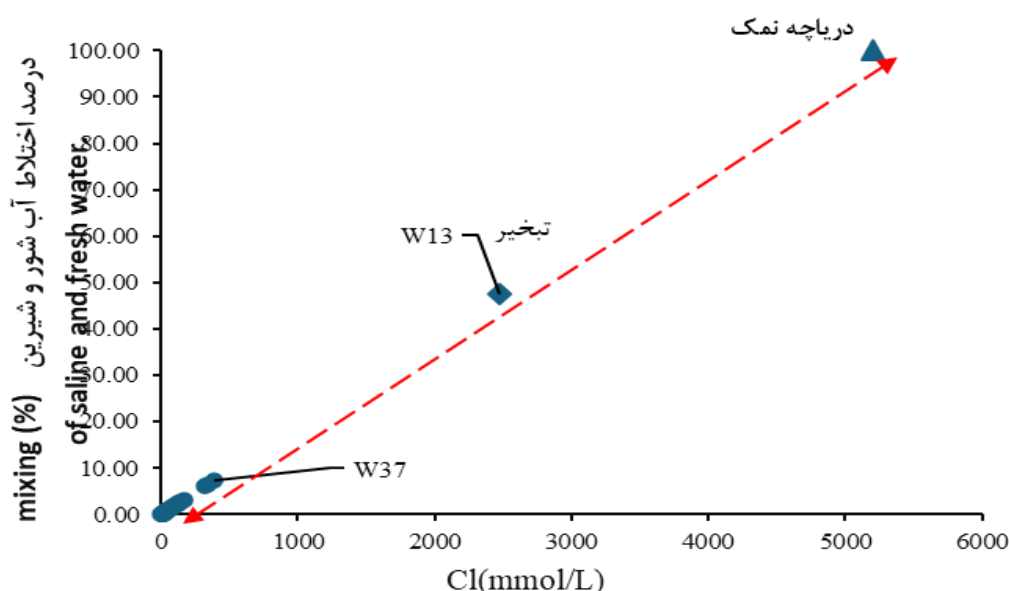
فرآیند process	GQISI	فرآیند process	GQISWI	کد Id	فرآیند process	GQISI	فرآیند process	GQISWI	کد Id
اختلاط	۷۱/۸۰	اختلاط	۵۹/۷۱	۲۲	اختلاط	۷۰/۱۵	اختلاط	۵۷/۶۴	۱
اختلاط	۶۹/۱۷	اختلاط	۵۷/۱۹	۲۳	اختلاط	۶۹/۲۴	اختلاط	۵۷/۳۰	۲
اختلاط	۷۴/۸۶	اختلاط	۶۳/۰۱	۲۴	آب* شیرین	۷۶/۱۹	اختلاط*	۶۵/۶۸	۳
اختلاط	۷۴/۷۹	اختلاط	۶۲/۶۵	۲۵	اختلاط	۷۰/۷۷	اختلاط	۵۷/۶۷	۴
اختلاط	۷۲/۹۸	اختلاط	۶۰/۵۱	۲۶	آب* شیرین	۷۵/۸۰	اختلاط*	۶۴/۰۹	۵
اختلاط	۶۶/۶۴	اختلاط	۶۰/۶۹	۲۷	اختلاط	۷۳/۵۸	اختلاط	۶۱/۱۹	۶
اختلاط	۷۱/۰۹	اختلاط	۵۸/۴۵	۲۸	اختلاط	۷۳/۸۶	اختلاط	۶۱/۳۱	۷
اختلاط	۷۲/۳۴	اختلاط	۶۰/۰۹	۲۹	آب* شیرین	۷۶/۵۴	اختلاط*	۶۴/۱۹	۸
اختلاط	۷۱/۶۷	اختلاط	۵۷/۹۸	۳۰	آب* شیرین	۷۷/۱۷	اختلاط*	۶۶/۰۴	۹
اختلاط	۶۹/۹۴	اختلاط	۵۶/۰۵	۳۱	شورابه	۴/۲۴	شورابه	۶/۲۷	۱۰
اختلاط	۶۸/۶۱	اختلاط	۵۳/۳۲	۳۲	اختلاط	۷۰/۳۲	اختلاط	۵۶/۰۷	۱۱
اختلاط	۷۱/۷۴	اختلاط	۵۸/۴۸	۳۳	اختلاط	۷۱/۷۲	اختلاط	۵۸/۲۰	۱۲
اختلاط	۷۱/۰۸	اختلاط	۵۷/۶۹	۳۴	شورابه	۴۲/۲۲	آب شور	۳۴/۴۴	۱۳
شورابه	-۴۴/۳۸	شورابه	۷/۱۵	۳۵	اختلاط	۶۸/۵۱	اختلاط	۵۴/۱۸	۱۴
اختلاط	۷۲/۱۴	اختلاط	۵۹/۶۳	۳۶	اختلاط	۶۹/۸۱	اختلاط	۵۵/۸۲	۱۵
آب شور	۱۲/۹۸	شورابه	-۳/۵۷	۳۷	اختلاط	۷۳/۴۲	اختلاط	۶۱/۳۳	۱۶
اختلاط	۶۶/۳۰	اختلاط	۵۰/۸۸	۳۸	اختلاط	۷۲/۵۱	اختلاط	۶۰/۴۹	۱۷
اختلاط	۶۱/۸۶	اختلاط	۵۱/۶۷	۳۹	اختلاط	۷۳/۵۹	اختلاط	۶۰/۸۱	۱۸
اختلاط	۶۵/۰۶	اختلاط	۶۰/۴۶	۴۰	اختلاط	۷۴/۲۳	اختلاط	۶۱/۸۰	۱۹
اختلاط	۷۳/۶۶	اختلاط	۶۲/۳۷	۴۱	اختلاط	۷۱/۰۴	اختلاط	۵۸/۸۱	۲۰
اختلاط	۷۰/۹۱	اختلاط	۵۷/۵۱	۴۲	اختلاط	۷۴/۴۸	اختلاط	۶۲/۹۲	۲۱

بررسی درصد اختلاط تئوریک از این نظر مهم است که می‌تواند مقدار پیشروی آب‌های شور را از یک منبع

بررسی کیفیت آب زیرزمینی متأثر از نفوذ آب شور

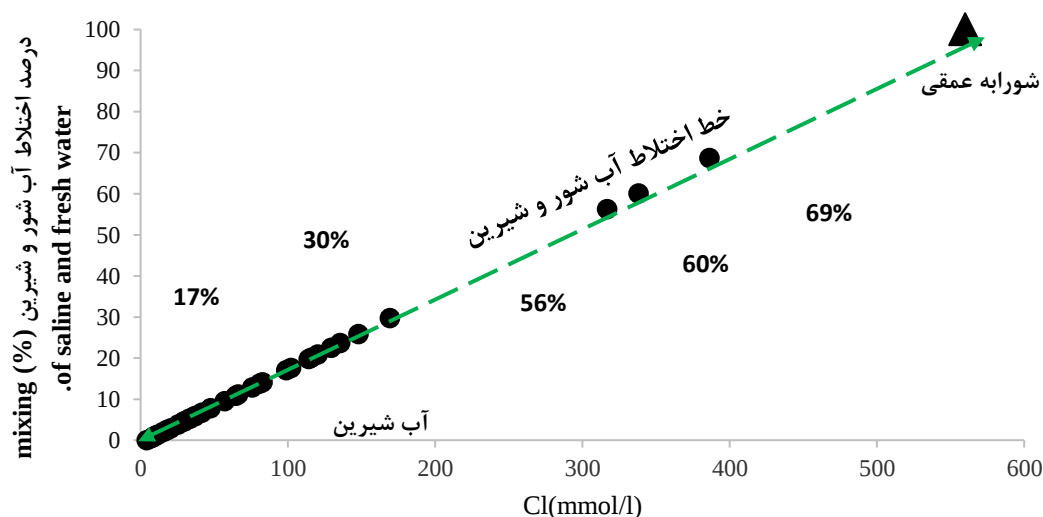
کلراید استفاده شده است. نتایج تعیین درصد اختلاط تئوریکی براساس دو منبع شوری احتمالی در شکل‌های (۲ و ۳) و همچنین درصد اختلاط آب شور و شیرین در هر چاه براساس هجوم آب شور از شورابه عمقی در جدول (۳) ارائه شده است.

مشخص به داخل آبخوان در هر چاه بررسی کند. همان‌طور که بیان شد، به‌منظور بررسی و سناریوی درصد اختلاط تئوریکی هجوم آب شور از شورابه‌های کف آبخوان و همچنین آب شور دریاچه نمک (پلایای نمکی) به داخل آبخوان دشت کاشان، از نسبت شورابه براساس غلظت



شکل ۲. نمودار درصد اختلاط تئوریکی آب شور و شیرین در دشت کاشان براساس سناریوی هجوم آب شور از دریاچه نمک به آبخوان

Fig. 2. Diagram of the Theoretical Mixing Percentage of Saline and Fresh Water in the Kashan Plain Based on the Scenario of Saltwater Intrusion from the Salt Lake Into the Aquifer.



شکل ۳. نمودار درصد اختلاط تئوریکی آب شور و شیرین براساس سناریوی هجوم آب شور از شورابه‌های عمقی (کف آبخوان).

Fig. 3. Diagram of the Theoretical Mixing Percentage of Saline and Freshwater Based on the Scenario of Saltwater Intrusion from Deep Brine Water (Aquifer's Bed).

مورد بررسی و پلایای نمکی می‌باشد. از طرفی، اختلاط آب‌های شور و شیرین با شورابه عمقی بالا بوده (در برخی چاه‌ها حدود ۷۰٪) که این اختلاط می‌تواند در نتیجه فرآیند آپکنینگ و برداشت از شورابه‌های عمقی و حرکت آب شور از شرق به سمت شمال شرق آبخوان باشد (شکل ۳ و جدول ۳). لازم به ذکر است که این موضوع قبلاً با استفاده از مطالعات ایزوتوپی توسط میرزاوند (۱۳۹۷) نیز تایید شده است (Mirzavand, 2018).

همان‌طور که ملاحظه می‌شود، اختلاطی در نتیجه هجوم آب شور از دریاچه نمک (پلایای نمکی) دیده نمی‌شود. لازم به ذکر است که تنها در نمونه شماره ۱۳ که در خروجی آبخوان می‌باشد در صد اختلاط حدود ۴۷٪ می‌باشد که آن هم می‌تواند به دلیل اثر تبخیر (سطح ایستابی در حدود ۲ متری است) و از طرفی به دلیل تخلیه شورابه‌های آبخوان به پلایای نمکی باشد (M. Mirzavand et al., 2020a). در بقیه نمونه‌ها، نتایج نشان نشان دهنده عدم اختلاط (اختلاط کمتر از ۷٪ می‌باشد) بین نمونه‌های

جدول ۳. درصد اختلاط تئوریک آب شور و شیرین در هر چاه در نتیجه اختلاط شورابه عمقی با فرآیند آپکنینگ

Table 3. Theoretical Mixing Percentage of Saline and Fresh Water in Each Well as a Result of Deep Brine Water Mixing with the Upcoming Process.

درصد اختلاط		درصد اختلاط		درصد اختلاط		درصد اختلاط آب شور	
آب شور	کد	آب شور	کد	آب شور	کد	شور	کد
mixing percentage of saline water	Id	mixing percentage of saline water	Id	mixing percentage of saline water	Id	mixing percentage of saline water	Id
۷/۷۷	۳۴	۲/۹۱	۲۴	۵/۲۰	۱۲	۲۰	۱
۱۱	۳۶	۱/۱۷	۲۵	۱۳	۱۴	۲۰	۲
۱۸	۳۸	۵/۹۳	۲۶	۴/۶۰	۱۶	۵/۷۷	۳
۶۹	۳۹	۵۶	۲۷	۹/۵۰	۱۷	۱۴	۴
۶۰	۴۰	۲۶	۲۸	۱/۳۲	۱۸	۰/۷۲	۵
۳۰	۴۱	۶/۷۳	۲۹	۰/۶۱	۱۹	۲/۳۴	۶
۱۱	۴۲	۲/۵۱	۳۰	۲۲	۲۰	۵/۲۴	۷
۱۰۰	شورابه	۱۴	۳۱	۰/۲۴	۲۱	۰/۹۳	۸
-	-	۱/۹۵	۳۲	۱۷	۲۲	۰	آب شیرین
-	-	۳/۸۳	۳۳	۲۰	۲۳	۴/۵۰	۱۱

شورابه‌های عمقی و فرآیند آپکنینگ (Upconing) است، نه نفوذ مستقیم آب شور از پلایای نمکی. محاسبه درصد اختلاط تئوریک آب‌های شور و شیرین نیز تأیید کرد که در اکثر چاه‌های منطقه، شورابه‌های عمقی نقش مهمی در شوری آبخوان دارد. همچنین، شاخص‌های کیفیت آب GWISWI و GWISI نشان دادند که فرآیند اختلاط عامل غالب در تغییر کیفیت آب زیرزمینی در این منطقه است. با این حال، GWISI که شامل یون بروماید نیز است، دقت بالاتری در طبقه‌بندی آب‌های شیرین و شور نسبت به GWISWI دارد. به‌طور کلی، نتایج این پژوهش اهمیت مدیریت پایدار منابع آب زیرزمینی را برای جلوگیری از گسترش شوری و حفظ کیفیت آبخوان دشت کاشان برجسته می‌کند. پیشنهاد می‌شود که برداشت کنترل‌شده

نتیجه‌گیری

در این مطالعه، اقدام به بررسی کیفیت آب زیرزمینی متأثر از نفوذ آب شور و همچنین محاسبه درصد اختلاط تئوریک آب‌های زیرزمینی شور و شیرین در دشت کاشان شد. بررسی مقادیر TDS و یون‌های کلیدی نشان داد که بخش‌های شرقی و شمال شرقی آبخوان دارای بالاترین میزان شوری هستند، در حالی که بخش‌های غربی و جنوبی کیفیت آب بهتری دارند. همچنین نتایج نشان داد که کیفیت آب زیرزمینی دشت کاشان به شدت تحت تأثیر فرآیندهای اختلاط با منابع شور قرار دارد. بررسی‌های هیدروژئوشیمیایی و آنالیز ترکیب یونی آبخوان نشان داد که شوری آب عمدتاً ناشی از برداشت بیش از حد از

Research. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-33922-6>

Mirzavand, M. (2018). *Determine the Origin and Mechanism of Groundwater Salination in Kashan Plain using Isotopic and Hydro-geochemical Methods*.

Mirzavand, M & Ghazavi, R. (2015). A Stochastic Modelling Technique for Groundwater Level Forecasting in an Arid Environment Using Time Series Methods. *Water Resources Management*, 29(4), 1315–1328. <https://doi.org/10.1007/s11269-014-0875-9>

Mirzavand, M., Sadeghi, S. H. & Bagheri, R. (2020). Groundwater and soil salinization and geochemical evolution of Femenin-Ghahavand plain, Iran. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(34), 43056–43066. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-10229-w>

Nadri, A., Bagheri, R., Raeisi, E., Ayatollahi, S. S. & Bolandparvaz-Jahromi, K. (2014). Hydrodynamic behavior of Kangan gas-capped deep confined aquifer in Iran. *Environmental Earth Sciences*, 71(4), 1925–1936.

Tomaszkiewicz, M., Abou Najm, M. & El-Fadel, M. (2014). Development of a groundwater quality index for seawater intrusion in coastal aquifers. *Environmental Modelling and Software*, 57, 13–26. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.03.010>

Xie, R., Zhen, L., Wu, X. & Li, J. (2023). Isotopic compositions (δD , $\delta^{18}O$) and end-member mixing for the control interface in a complex tidal region. *Science of the Total Environment*, 866. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.161438>

Yang, F., Jia, C., Yang, H. & Yang, X. (2022). Development, hotspots, and trend directions of groundwater salinization research in both coastal and inland areas: a bibliometric and visualization analysis from 1970 to 2021. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(45), 67704–67727. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-22134-5>

از منابع آب، کاهش بهره‌برداری از شورابه‌های عمقی و پایش دقیق تغییرات شوری به‌عنوان راهکارهای کلیدی در نظر گرفته شوند. همچنین، مطالعات تکمیلی با استفاده از روش‌های ایزوتوپی و مدل‌سازی عددی می‌توانند درک بهتری از دینامیک جریان‌های آب شور و شیرین در نتیجه اختلاط با شورابه‌های عمقی ارائه دهند.

منابع

Amiri, V., Nakhaei, M., Lak, R. & Kholghi, M. (2016). Assessment of seasonal groundwater quality and potential saltwater intrusion: a case study in Urmia coastal aquifer (NW Iran) using the groundwater quality index (GQI) and hydrochemical facies evolution diagram (HFE-D). *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 30(5), 1473–1484. <https://doi.org/10.1007/s00477-015-1108-3>

Appelo, C. A. J. & Postma, D. (2005). *Geochemistry, Groundwater and Pollution*. CRC Press.

Barica, J. A. N. (1972). *Salinization of groundwater in arid zones*. 6(October 1971), 925–933.

Bouchaou, L., Michelot, J. L., Vengosh, A., Hsissou, Y., Qurtobi, M., Gaye, C. B., Bullen, T. D. & Zuppi, G. M. (2008). Application of multiple isotopic and geochemical tracers for investigation of recharge, salinization, and residence time of water in the Souss-Massa aquifer, southwest of Morocco. *Journal of Hydrology*, 352(3–4), 267–287. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.01.022>

Carretero, S., Rodrigues Capítulo, L., Dapeña, C., Fabiano, M. & Kruse, E. (2022). A chemical and isotopic approach to investigate groundwater dynamics in a coastal aquifer. *Catena*, 213. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106229>

Clark, I. D. (2015). *Groundwater Geochemistry and Isotopes*. Taylor & Francis Group.

Mirzavand, M., Ghasemieh, H., Sadatinejad, S. J. & Bagheri, R. (2020a). An overview of source, mechanism, and investigation approaches in groundwater salinization studies. *International Journal of Environmental Science and Technology*. <https://doi.org/10.1007/s13762-020-02647-7>

Mirzavand, M., Ghasemieh, H., Sadatinejad, S. J. & Bagheri, R. (2020b). Delineating the Source and Mechanism of Groundwater Salinization in Crucial Declining Aquifer Using Multi-Chemo-Isotopes Approaches. *Journal of Hydrology*, 586. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124877>

Mirzavand, M & Walter, J. (2024). Delineating the mechanisms controlling groundwater salinization using chemo-isotopic data and meta-heuristic clustering algorithms (case study: Saguenay-Lac-Saint-Jean region in the Canadian Shield, Quebec, Canada). *Environmental Science and Pollution*

